



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

# ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Σ. ΓΡΟΥΝΤΑΣ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2020





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επιβλέπων:** Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15<sup>η</sup> Ιουνίου 2020

.....

Κ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Ηρ. Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Π. Τσαραμπάρης

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2020

.....  
ΙΩΑΝΝΗΣ Σ. ΓΡΟΥΝΤΑΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Ιωάννης Σ. Γρουντάς, 2020

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

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μονοκρυσταλλικού πυριτίου υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασιακής καταπόνησης, ώστε να προσδιορισθεί η επίπτωση που διαφαίνεται στην παρεχόμενη ισχύ.

Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως μεταβάλλεται η χαρακτηριστική ρεύματος - τάσης (I-V) του φωτοβολταϊκού στοιχείου υπό διαφορετικές τιμές έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, οι οποίες ανάγονται σε πρότυπες συνθήκες σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60891, με τελικό σκοπό τη μεταξύ τους αντιπαραβολή. Πιο συγκεκριμένα:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται οι κατάλληλες διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή, περιγράφονται οι ημιαγωγίμες διατάξεις, τα διάφορα είδη τους καθώς και τα βασικά τους χαρακτηριστικά.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το φωτοβολταϊκό στοιχείο καθώς και τα χαρακτηριστικά του μεγέθη και τα διάφορα είδη που υφίστανται.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της και τα όργανα μέτρησής της.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφερόμαστε στο υλικό επικάλυψης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, τη σύνθεση του και τους μηχανισμούς γήρανσης που υπεισέρχονται.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων και κατ'επέκταση των πλαισίων.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην έννοια της τυποποίησης και στο πρότυπο IEC 60891.

Στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται το πειραματικό μέρος και συγκεκριμένα τα όργανα μέτρησης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, οι συνθήκες μετρήσεων, παρουσιάζονται οι πίνακες τιμών, οι χαρακτηριστικές καμπύλες και το τελικό συμπέρασμα.

### Λέξεις κλειδιά

Φωτοβολταϊκό στοιχείο, φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, δίοδος, ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου, χαρακτηριστική I-V, βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου, μονοκρυσταλλικό πυρίτιο



## **ABSTRACT**

This diploma thesis attempts to consult the behavior of a single crystal silicon photovoltaic panel under different thermal stresses, in order to define the results on the produced power.

In particular, we observe how the photovoltaic panel's current – voltage diagram (I-V) change, under different solar-radiation and temperature values, that are reduced to STC conditions in accordance with the norm IEC 60891. More particularly:

In the first chapter, we describe the suitable elements that are used in the PV conversion, the semiconductors, their species and their characteristics.

In the second chapter, we analyze the PV phenomenon, the PV cells, the different species and their characteristics.

In the third chapter, we refer to the sun irradiance and the measurement devices.

In the fourth chapter, we describe the composition and the degradation mechanisms of the encapsulant of the PV cells.

In the fifth chapter, we mention the factors that affect the output of the PV cells.

In the sixth chapter, we refer to the standardization norms and especially to the IEC 60891.

In the seventh chapter, we describe the experimental part. Particularly, we refer to the measurements instruments that we used and the measurements conditions, the tables of numeric values, the I-V diagrams and the final conclusions.

### **Keywords**

PV cell, photovoltaic panel, solar-radiation, diode, equivalent circuit of PV cell, I-V diagram, PV cell efficiency, single crystal silicon.





## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πρώτα από όλα τους γονείς μου για την ηθική και υλική στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ την οικογενειά μου, τη γυναίκα μου και τα παιδιά μου, για την αμέριστη συμπαράσταση κατά τη φοίτηση μου στη σχολή.

Ευχαριστώ τον καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Κύριο Κωνσταντίνο Δέρβο για την πολύτιμη βοήθεια κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον κύριο Θεόδωρο Αργυρόπουλο για τη συμβολή του στη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στο συνάδελφό μου Κύριο Κυριάκο Παναγιωτόπουλο για την εκτίμηση που έδειξε στο πρόσωπό μου και την καθοδήγηση που μου επέδειξε.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στο φίλο μου Θωμά, για την ενθάρρυνση και καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Τέλος, αλλά εξίσου σημαντικά, ευχαριστώ το Θεό που μου έδωσε υγεία και δύναμη να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>14</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....</b>	<b>15</b>
1.1 Οι ενεργειακές ζώνες.....	15
1.2 Διατάξεις φωτοβολταϊκής μετατροπής.....	16
1.2.1 Δίοδοι p-n.....	16
1.2.2 Ημιαγωγός τύπου n.....	17
1.2.3 Ημιαγωγός τύπου p.....	18
1.2.4 Η διάδος Schottky.....	18
1.3 Σύγκριση ΦΒ διατάξεων p-n και Schottky.....	20
1.4 Ηλεκτρικά φορτία που δεν συμβάλλουν άμεσα στην αγωγιμότητα.....	21
1.5 Ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού.....	21
1.6 Το ενεργειακό διάκενο $E_G$ .....	23
1.7 Θερμοδυναμική ισορροπία.....	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ, ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....</b>	<b>24</b>
2.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	24
2.1.1 Η ενεργός περιοχή.....	24
2.1.2 Η οπτική διέγερση της διόδου.....	25
2.2.3 Τάση ανοικτοκύκλωσης και φωτόρρευμα.....	26
2.2 Οι εξισώσεις I-V του ΦΒ στοιχείου.....	28
2.3 Χαρακτηριστική I-V ΦΒ στοιχείου.....	29
2.3 Χαρακτηριστικά στοιχεία ΦΒ στοιχείου.....	30
2.3.1 Ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ).....	30
2.3.2 Τάση ανοικτοκύκλωσης ( $V_{oc}$ ).....	31
2.3.3 Μέγιστη παροχή ισχύος.....	31
2.4 Το ιδανικό ΦΒ στοιχείο.....	32
2.5 Το πραγματικό (μη ιδανικό) ΦΒ στοιχείο.....	35
2.6 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	36
2.6.1 Μονοκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία.....	36
2.6.2 Πολυκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία.....	37
2.6.3 ΦΒ στοιχεία λεπτών υμενίων.....	38
2.6.5 Φωτοβολταϊκά στοιχεία δισεληνογαλλιοϊνδιούχου χαλκού (CuInGaSe <sub>2</sub> , CIGS) ..	40
2.6.6 Φωτοβολταϊκά στοιχεία τελλουριούχου καδμίου (CdTe).....	40
2.6.7 Φωτοβολταϊκά στοιχεία αρσενικούχου γάλλιου (GaAs).....	41
2.7 Άλλες τεχνολογίες ΦΒ στοιχείων.....	42
2.7.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυεπίπεδης επαφής.....	42
2.7.2 Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	42
2.7.3 Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	43
2.7.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία βαφής (Dye – sensitized).....	44
2.7.5 Φωτοβολταϊκά στοιχεία συγκέντρωσης (CPV).....	45
2.7.6 Φωτοβολταϊκά στοιχεία περοβσκήτη.....	46
2.7.7 Φωτοβολταϊκά κβαντισμένης Κουκίδας (Quantum Dot Photovoltaics).....	46
2.8 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	47

2.9 Χαρακτηριστικά μεγέθη φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	47
2.9.1 Υλικό ΦΒ στοιχείων.....	47
2.9.2 Ισχύς STC.....	47
2.9.3 Οριακές τιμές ρεύματος και τάσης.....	47
2.9.4 Θερμοκρασιακή εξάρτηση συντελεστών.....	48
2.9.5 Χαρακτηριστικά παρεχόμενης ισχύος.....	48
2.9.6 Λοιπά χαρακτηριστικά.....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ, ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ</b>	<b>48</b>
.....	.....
3.1 Το φως.....	48
3.2 Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας.....	49
3.3 Μέλαν σώμα.....	49
3.4 Κίνηση της Γης.....	50
3.4.1 Η σχετική θέση του ήλιου και ηλιακού συλλέκτη.....	51
3.4.2 Παράλληλη εγκατάσταση σταθερών ΦΒ συλλεκτών.....	52
3.4.3 Ηλιακοί ιχνηλάτες.....	52
3.5 Δομή του ήλιου.....	52
3.5.1 Εκπεμπόμενη πυκνότητα ισχύος.....	54
3.5.2 Η ισχύς “ενός Ήλιου”.....	54
3.6 Η αέρια μάζα (Α.Μ).....	55
3.7 Όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας.....	56
3.7.1 Πυρανόμετρο.....	56
3.7.2 Φωτοδίοδος.....	56
3.7.3 Ακτινόμετρο.....	56
3.7.4 Καταγραφικό Campbell - Stokes.....	57
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΛΙΚΟ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....</b>	<b>57</b>
4.1 : Φίλτρο EVA.....	57
4.2 Ιδιότητες φίλτρου EVA.....	59
4.3 Διαδικασία παραγωγής ΦΒ πάνελ.....	63
4.4 Μηχανισμοί και συνέπειες γήρανσης του EVA.....	65
4.4.1: Περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες.....	66
4.4.2: Φωτογήρανση.....	67
4.4.3: Αποχρωματισμός.....	68
4.4.4: Αποκόλληση.....	68
4.4.5 : Σχηματισμός φυσαλίδων.....	69
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΒ</b>	<b>70</b>
<b>ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....</b>	<b>70</b>
5.1 Θερμοκρασία.....	70
5.2 Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας.....	72
5.3 Ρύπανση των πλαισίων.....	73
5.4 Ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού.....	73
5.5 Ανακλαστικότητα.....	74
5.6 Επανασύνδεση στην πίσω όψη.....	74
5.7 Οι αντιστάσεις $R_s$ και $R_{sh}$ .....	74
5.8 Γωνία τοποθέτησης των ΦΒ πλαισίων.....	75
5.9 Σκίαση.....	75
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ.....</b>	<b>76</b>
6.1 Ιστορικό.....	76
6.2 Συστήματα τυποποίησης.....	77
6.2.1 Ευρωπαϊκό σύστημα τυποποίησης.....	78
6.2.2 Εθνικό Σύστημα Τυποποίησης.....	79

6.3 Οργανισμοί Τυποποίησης.....	79
6.3.2 Ευρωπαϊκοί Οργανισμοί Τυποποίησης .....	81
6.3.3 Εθνικοί Οργανισμοί Τυποποίησης.....	82
6.4 Το πρότυπο IEC 60891 .....	84
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>84</b>
7.1 Διαδικασία μετρήσεων χαρακτηριστικών ΦΒ κελιών .....	84
7.2 Αναγωγή μετρήσεων σε συνθήκες STC .....	87
7.3 Υπολογισμός της τιμής της εσωτερικής αντίστασης $R_s$ .....	88
7.4 Ανάλυση μετρήσεων.....	89
7.4.1 Μετρήσεις κελιού χωρίς θερμοκρασιακή καταπόνηση .....	89
7.4.2 Μετρήσεις κελιού με θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 300°C .....	102
7.4.3 Μετρήσεις κελιού με θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 450°C .....	115
7.5 Συμπεράσματα.....	129
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>130</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και την ψήφιση του πρωτοκόλλου του Κιότο μέχρι την ενεργοποίησή του το 2005 δημιουργήθηκε η ανάγκη για την ένταξη μεγαλύτερης διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό σύστημα. Το πρωτόκολλο του Κιότο καθορίζει σε κάθε χώρα ένα συγκεκριμένο όριο εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα γεγονός που καθιστά απαραίτητη την εκμετάλλευση των ΑΠΕ. Μια σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας αποτελεί το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα δημιουργήθηκαν ουσιαστικά το 1954 και τέθηκαν σε εφαρμογή το 1958 στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών. Τα φωτοβολταϊκά όπως προκύπτει και από την ονοματολογία τους, χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για την συγκεκριμένη διεργασία χρησιμοποιούνται κυρίως υλικά με ηλεκτροστατικά φράγματα δυναμικού τα οποία διευκολύνουν την εξέλιξη του φωτοβολταϊκού φαινομένου όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που χρησιμοποιούνται συνήθως, αποτελούνται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τα πάνελ αυτά τοποθετούνται κυρίως σε σημεία όπου υπάρχει η βέλτιστη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και η μεγαλύτερη κατά το δυνατόν διάρκεια ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια της μέρας, με σκοπό την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του συνόλου των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για το λόγο αυτό είναι σύνηθες η παρατήρηση φωτοβολταϊκών πάνελ τόσο σε οροφές κτηρίων για οικιακή αλλά και βιομηχανική χρήση αλλά και σε διάφορες πεδινές εκτάσεις όπου δεν υπάρχουν εμπόδια στην επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία.

Η χώρα η οποία κατέχει την πρώτη θέση στη χρήση των φωτοβολταϊκών αποτελεί η Αυστραλία η οποία εκμεταλλεύεται στο έπακρον τόσο την υψηλής διάρκειας ηλιοφάνεια λόγω της φυσικής της θέσης όσο και της υψηλής εστίασης σε ερευνητικά θέματα για την βελτίωση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και του βαθμού απόδοσής τους.

Όσον αφορά την Ευρώπη, υπάρχει η οδηγία για τη σταδιακή μείωση των λιγνιτικών εργοστασίων καθώς και η ελάττωση της εκμετάλλευσης της πυρηνικής ενέργειας γεγονός που θα καταστήσει αναγκαία την αύξηση της χρησιμοποίησης των ΑΠΕ και φυσικά των φωτοβολταϊκών. Η Ελλάδα συγκεκριμένα καταλαμβάνει μία από τις κύριες θέσεις όσον αφορά την πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας σε σύγκριση με της υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες. Αυτό όμως δεν έχει οδηγήσει σε μια σταθερή ανοδική πορεία στην αγορά και χρησιμοποίηση των φωτοβολταϊκών. Αυτό οφείλεται κυρίως στην έλλειψη ενός νομοθετικού πλαισίου που να ενθαρρύνει αλλά και να οργανώνει τις διάφορες επενδυτικές κινήσεις. Επιπλέον, δεν έχει καθοριστεί σωστά η

διαδικασία αποσύνθεσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων μετά το πέρας της διάρκειας ζωής τους. Αυτό σημαίνει ότι με την καλύτερη έρευνα του χρόνου ζωής των φωτοβολταϊκών και του τρόπου επιμήκυνσής του θα μπορούσαμε αρχικά να ελαχιστοποιήσουμε το χρόνο κατά τον οποίο αυτά θα παραμείνουν ανενεργά λόγω γήρανσης και μεταγενέστερα να ερευνήσουμε τους τρόπους διαχείρισής τους στο χρόνο αυτό.

Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να ελεγχθούν διεξοδικά οι διάφοροι παράγοντες και μηχανισμοί γήρανσης του υλικού επικάλυψης των φωτοβολταϊκών για την παραγωγή αποτελεσμάτων τα οποία θα μας πληροφορήσουν για τους τρόπους βελτιστοποίησής τους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

### **1.1 Οι ενεργειακές ζώνες**

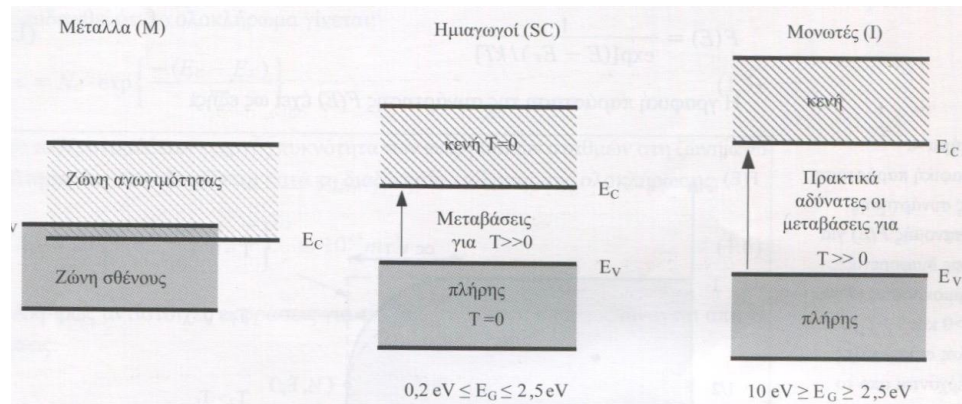
Τα ηλεκτρόνια στα κρυσταλλικά στερεά μπορούν να υπάρξουν μόνο σε σαφώς καθοριζόμενες ενεργειακές ζώνες (οι προσμίξεις ή κρυσταλλικές ατέλειες δεν υπακούουν στον περιορισμό αυτό). Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα θεμελιώδη κανόνα των ηλεκτρονικών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τα ημιαγωγιμα υλικά. Η αναλυτική φυσική των ενεργειακών ζωνών είναι πολύπλοκη, αλλά μπορεί εύκολα να αποκτηθεί μια ποιοτική γνώση εξετάζοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ των εξωτερικών ηλεκτρονίων, π.χ του πυριτίου (Si), καθώς τα άτομα από το υλικό αυτό συνωθούνται για τη δημιουργία σε συγκεκριμένες αποστάσεις που αντιστοιχούν στο κρυσταλλικό στερεό.

Μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των ατόμων συντελούν στην εμφάνιση μιας ενεργειακά κατώτερης ζώνης, η οποία εμπεριέχει 4N στάθμες που αντιστοιχούν αριθμητικά με τον αριθμό των ηλεκτρονίων τα οποία βρίσκονται στις εξωτερικές στιβάδες των N ατόμων πυριτίου.

Επίσης, δημιουργείται μια ενεργειακά ανώτερη ζώνη, η οποία περιλαμβάνει 4N στάθμες. Παρατηρούμε ότι ο συνολικός αριθμός των διατιθέμενων ενεργειακών ζωνών παραμένει αναλλοίωτος (8N). Οι εμφανιζόμενες ζώνες (ανώτερη και κατώτερη) αναφέρονται απλώς ως ζώνη αγωγιμότητας και ζώνη σθένους αντίστοιχα. Μια πλήρης ζώνη σθένους δε μπορεί να συντελέσει στην αγωγιμότητα του μέσου. Όταν η ζώνη είναι πλήρης, δεν υπάρχουν (υψηλότερες) ενεργειακές στάθμες στις οποίες θα μπορούν να τοποθετηθούν τα ηλεκτρόνια.

Αυτό αποτελεί το βασικό μηχανισμό αγωγιμότητας των υλικών : για να άγει ένα σύστημα πρέπει με κάποιο τρόπο να τοποθετηθούν κάποια ηλεκτρόνια μέσα στη

ζώνη αγωγιμότητας ή να αφαιρεθούν κάποια ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους, αφήνοντας έτσι κάποιες στάθμες κενές. (οπή)



Σχήμα 1.1 : Ενεργειακές ζώνες ανάλογα με το είδος του υλικού [1].

## 1.2 Διατάξεις φωτοβολταϊκής μετατροπής

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο συνίσταται στη μετατροπή μέρους του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται συνήθως με την απορρόφηση του φωτός από κατάλληλες διατάξεις, όπως είναι η δίοδος p-n και σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται η δίοδος Schottky με ημιδιαφανή επικάλυψη μετάλλου.

### 1.2.1 Δίοδοι p-n

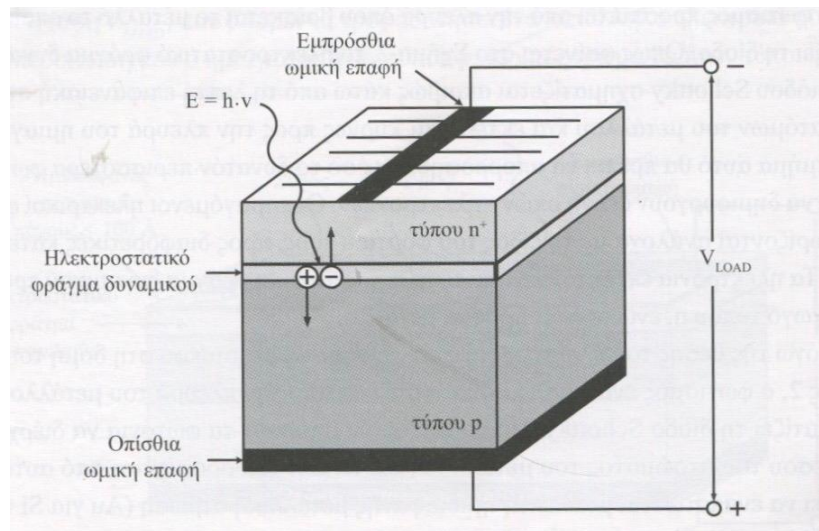
Στα ΦΒ στοιχεία που βασίζουν τη λειτουργία τους σε διόδους p-n τα φωτόνια απορροφούνται μέσα ή γύρω από την περιοχή της επαφής p-n και δημιουργούν ζεύγη οπών - ηλεκτρονίων τα οποία διαχωρίζονται από το ηλεκτροστατικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n ενώ οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου p. Οι δημιουργούμενοι ηλεκτρικοί φορείς οδηγούνται προς τα εξωτερικά ηλεκτρόδια μέσω των ωμικών επαφών. Η ωμική επαφή της άνω όψης έχει μεγάλα ανοίγματα, ώστε να επιτρέπεται στο φως να απορροφάται απευθείας από τον ημιαγωγό. Στους ακροδέκτες του εξωτερικού κυκλώματος εμφανίζεται τάση  $V_{load}$ , που μπορεί να τροφοδοτήσει το ηλεκτρικό φορτίο.

Τα ΦΒ στοιχεία πυριτίου, που περιλαμβάνουν στο εσωτερικό τους τη δίοδο p-n για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή, δέχονται πάντοτε το φωτισμό από την πλευρά του ημιαγωγού τύπου n. Αυτή η επιλογή διασφαλίζει μεγαλύτερη απόδοση για τη μετατροπή ενέργειας. Το συνολικό ενεργό εύρος της διάταξης στο οποίο συμβαίνει αποτελεσματικά η οπτοηλεκτρική μετατροπή περιλαμβάνει το εύρος του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού της επαφής p-n, επαυξημένο



εκατέρωθεν από τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας για τους ημιαγωγούς τύπου p και n αντίστοιχα.

Στη δίοδο p-n οι ηλεκτρικοί φορείς μειονότητας της κάθε πλευράς μεταφέρονται εκατέρωθεν του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού με διάχυση, που συνιστά από τη φύση της ένα κλασικό (μη κβαντομηχανικό), αργό μηχανισμό μεταφοράς ηλεκτρικών φορέων. Η διάχυση ενεργοποιείται από τη δημιουργία διαφοράς της συγκέντρωσης των ηλεκτρικών φορέων στο χώρο εκατέρωθεν του φράγματος δυναμικού. Διευκρινίζεται ότι για τη δίοδο p-n το ρεύμα καθορίζεται από τους φορείς μειονότητας που υπάρχουν στους ημιαγωγούς τύπου p και n αντίστοιχα.



Σχήμα 1.2: Δίοδος p-n [1]

### 1.2.2 Ημιαγωγός τύπου n

Στον ημιαγωγό τύπου n και πιο συγκεκριμένα για το πυρίτιο χρησιμοποιούνται ως άτομο προσμίξεων δοτών τα πεντασθενή χημικά στοιχεία φώσφορος (P), αρσενικό (As) και αντιμόνιο (Sb). Το ιδανικό άτομο της πρόσμιξης θα πρέπει να έχει κατά το δυνατόν την ίδια ατομική ακτίνα με αυτή του ατόμου του κρυσταλλικού πλέγματος (Si). Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η εισαγωγή κρυσταλλικών αταξιών. Επίσης, το παραπλήσιο μέγεθος των προσμειγνυόμενων ατόμων διασφαλίζει ότι οι ενεργειακές στάθμες των δοτών θα εισάγονται ενεργειακά πολύ κοντά στην κορυφή του ενεργειακού διακένου. Το γεγονός αυτό διασφαλίζει ότι ο ιοντισμός των ατόμων της πρόσμιξης θα πραγματοποιείται με χαμηλή ενέργεια ενεργοποίησης. Η τελική επιλογή του είδους των προσμειγνυόμενων ατόμων έγκειται πρωτίστως στη μέθοδο που θα ακολουθηθεί για την εισαγωγή των προσμίξεων στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού. Μετά τον ιοντισμό τους, τα άτομα των δοτών ελευθερώνουν ηλεκτρόνια προς τη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού και σχηματίζονται θετικά ιόντα. Τα

σχηματιζόμενα θετικά ιόντα παραμένουν εγκλωβισμένα στον κρύσταλλο όπου είχαν αρχικά εισαχθεί και δεν μπορούν να μετακινηθούν με την επιβολή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια που εισάγονται στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ελεύθερα να κινηθούν υπό την επίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Στο σύνολο του ο κρύσταλλος εμφανίζεται ως ηλεκτρικά ουδέτερος. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν ενεργειακές τιμές πάνω από τη στάθμη του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας  $E_c$ .

### 1.2.3 Ημιαγωγός τύπου p

Στον ημιαγωγό τύπου p, υπάρχει αρχική συγκέντρωση  $N_A$  τρισθενών ατόμων αποδεκτών. Πιο συγκεκριμένα για το πυρίτιο τα άτομα προσμίξεων αποδεκτών επιλέγονται ανάμεσα από τα τρισθενή χημικά στοιχεία βόριο (B), γάλλιο (Ga), ίνδιο (In) και αλουμίνιο (Al). Τα κριτήρια επιλογής για το στοιχείο της πρόσμιξης είναι ίδια με αυτά που αφορούν τον ημιαγωγό τύπου n, που αναλύθηκε παραπάνω. Η εισαγωγή των σταθμών των αποδεκτών  $E_A$  πραγματοποιείται πολύ κοντά στον πυθμένα του ενεργειακού διακένου, ο οποίος ταυτίζεται με την κορυφή της ζώνης σθένους  $E_v$ . Το τελευταίο εξασφαλίζει τον ιοντισμό με χαμηλή ενέργεια ενεργοποίησης των ατόμων πρόσμιξης. Μέσω της θερμικής ενεργοποίησης των τρισθενών προσμίξεων συντελείται ο ιοντισμός τους.

### 1.2.4 Η δίοδος Schottky

Η δίοδος αυτή κατασκευάζεται από την επαφή μεταξύ ενός μετάλλου κι ενός ημιαγωγού. Το κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού υλικών (μετάλλου και ημιαγωγού), ώστε να σχηματιστεί μια ανορθωτική επαφή, είναι οι τιμές της ηλεκτροσυγγένειας του ημιαγωγού και του έργου εξόδου του μετάλλου. Για την κατασκευή καλής ποιότητας διόδων Schottky, χρησιμοποιείται μονοκρυσταλλικό πυρίτιο που περιλαμβάνει στην επιφάνεια του ένα επιταξιακό στρώμα τύπου n πάχους περίπου 50μm. Το επιταξιακό στρώμα πυριτίου έχει αναπτυχθεί επάνω σε έντονα νοθευμένο υπόστρωμα πυριτίου τύπου  $n^+$ . Ο φωτισμός προκύπτει από την πλευρά όπου βρίσκεται το μέταλλο το οποίο σχηματίζει τη δίοδο. Το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού της διόδου Schottky σχηματίζεται ακριβώς κάτω από τη λεπτή επιφανειακή στρώση του μετάλλου και εκτείνεται κυρίως προς την πλευρά του ημιαγωγού.

Στο τμήμα αυτό πρέπει να απορροφηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα φωτόνια, ώστε να δημιουργηθούν ζεύγη οπών και ηλεκτρονίων. Οι παραγόμενοι ηλεκτρικοί φορείς διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος του φορτίου τους, προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται από το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού προς τον ημιαγωγό τύπου n, ενώ οι οπές προς το μέταλλο. Λόγω της θέσης του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού, ο φωτισμός ενδείκνυται να προσπίπτει από την πλευρά του μετάλλου που σχηματίζει τη

δίοδο Schottky. Προκειμένου τα φωτόνια να διέρχονται διαμέσου του στρώματος του μετάλλου (και να μην απορροφώνται από αυτό), θα πρέπει να εναποτίθεται μια λεπτή ημιδιαφανής μεταλλική στρώση (Au για Si τύπου n, εναλλακτικά Al για τύπου p). Το ημιδιαφανές μεταλλικό υμένιο κατασκευάζεται είτε απο υποατομικό στρώμα του μετάλλου είτε από ολιγοατομικό στρώμα του μετάλλου. Το υποατομικό στρώμα χαρακτηρίζεται από την τιμή της αναλογίας ατόμων του μετάλλου ως προς τα άτομα του πυριτίου που υπάρχουν στην επιφάνεια. Η αναλογία θα πρέπει να είναι μικρότερη της μονάδας. Ένα υποατομικό μεταλλικό στρώμα αρκεί για να δημιουργηθεί το απαιτούμενο ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού της διόδου Schottky και ταυτόχρονα διασφαλίζει την ωμική επαφή που απαιτείται για τη συλλογή των ηλεκτρικών φορέων από τη φωτιζόμενη όψη.

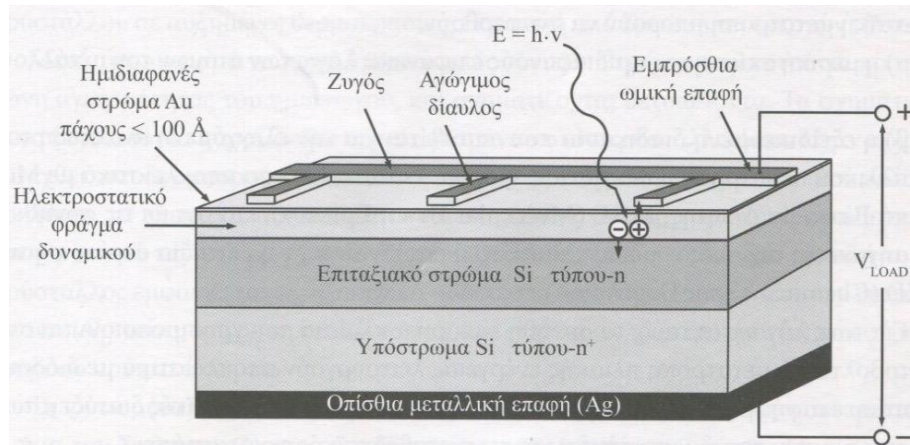
Επάνω από το ημιδιαφανές στρώμα του μετάλλου εναποτίθενται αγώγιμοι δίαυλοι μεγάλου πάχους, οι οποίοι μειώνουν την αντίσταση σειράς και μεταφέρουν τους ηλεκτρικούς φορείς της φωτιζόμενης επιφάνειας προς τα εξωτερικά ηλεκτρόδια με χαμηλές απώλειες. Οι ωμικοί δίαυλοι της άνω όψης φέρουν μεγάλα ανοίγματα τα οποία επιτρέπουν στο φως να απορροφάται απευθείας από το τμήμα του ημιαγωγού που καλύπτεται μόνο από την ημιδιαφανή στρώση του μετάλλου.

Τα φωτόνια που απορροφώνται στην περιοχή της επαφής δημιουργούν ζεύγη οπών – ηλεκτρονίων, τα οποία διαχωρίζονται απο το ηλεκτροστατικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n, ενώ οι οπές προς το μέταλλο που δημιουργεί τη δίοδο Schottky. Μόλις οι οπές φτάσουν στο ημιδιαφανές μεταλλικό ηλεκτρόδιο που σχηματίζει τη δίοδο Schottky, επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια του μετάλλου, οπότε στο φωτιζόμενο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που σχηματίζει τη δίοδο Schottky και στους αγώγιμους μεταλλικούς δίαυλους ολισθαίνουν μόνο ηλεκτρόνια. Η ολίσθηση των ηλεκτρονίων στο μέταλλο γίνεται προς την αντίθετη διεύθυνση από την κίνηση των οπών τού ημιαγωγού, σχηματίζοντας ρεύμα που έχει την ίδια συμβατική φορά με το ρεύμα των οπών στον ημιαγωγό.

Τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται από την απορρόφηση των φωτονίων εκτρέπονται προς τα κάτω στον ημιαγωγό τύπου n και συλλέγονται από το ηλεκτρόδιο της οπίσθιας όψης. Στους ακροδέκτες του εξωτερικού κυκλώματος εμφανίζεται η τάση  $V_{load}$ , που μπορεί να τροφοδοτήσει ένα κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο.

Η δίοδος Schottky αποτελεί μια διάταξη στερεάς κατάστασης στην οποία το ρεύμα καθορίζεται από τους φορείς πλειονότητας του ημιαγωγού και η μεταφορά των φορέων εκατέρωθεν του φράγματος συντελείται με θερμοϊονική εκπομπή, η οποία σε αντίθεση με τη διάχυση συνιστά ταχύτατο μηχανισμό μεταφοράς ηλεκτρικών φορέων. Η θερμοϊονική εκπομπή συνδέεται με την

κυματική φύση του ηλεκτρικού φορέα, η οποία ενεργοποιείται όταν οι ηλεκτρικοί φορείς διέρχονται επάνω από ένα ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού.



Σχήμα 1.3 : Δίοδος Schottky [1]

### 1.3 Σύγκριση ΦΒ διατάξεων p-n και Schottky

Το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού στις διόδους Schottky εκτείνεται σχεδόν έως την φωτιζόμενη επιφάνεια του ημιαγωγού με αποτέλεσμα μεγάλο πλήθος φωτονίων να απορροφάται από την ενεργό περιοχή. Στις διόδους p-n το φράγμα δυναμικού βρίσκεται στο εσωτερικό της δομής και έτσι πολλά φωτόνια απορροφώνται πριν φτάσουν το φράγμα δυναμικού με αποτέλεσμα σημαντικές απώλειες.

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούν για την μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική διόδους Schottky καταφέρνουν να πετύχουν μεγαλύτερες αποδόσεις, ωστόσο περιορίζεται κατασκευαστικά σε μικρό εμβαδό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καθίστανται ιδανικές για την κατασκευή αισθητήρων ανίχνευσης φωτεινής ακτινοβολίας. Τα μειονεκτήματα των διόδων Schottky όσο αφορά την φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι τα ακόλουθα:

α) Μερική σκίαση της ημιδιαφανούς επιφάνειας λόγω των ατόμων του μετάλλου

β) Η πολύπλοκη διαδικασία της μοριακής επιταξίας δέσμης MBE (Molecular Beam Epitaxy) που απαιτείται για την ανάπτυξη του υποατομικού μεταλλικού πλέγματος, η οποία διαφέρει από τις συνήθεις βιομηχανικές τεχνικές ευρείας κλίμακας.

Για τους προαναφερθέντες λόγους στην κατασκευή των εμπορικών πλαισίων χρησιμοποιείται αποκλειστικά η δίοδος πυριτίου επαφής p-n.

#### 1.4 Ηλεκτρικά φορτία που δεν συμβάλλουν άμεσα στην αγωγιμότητα

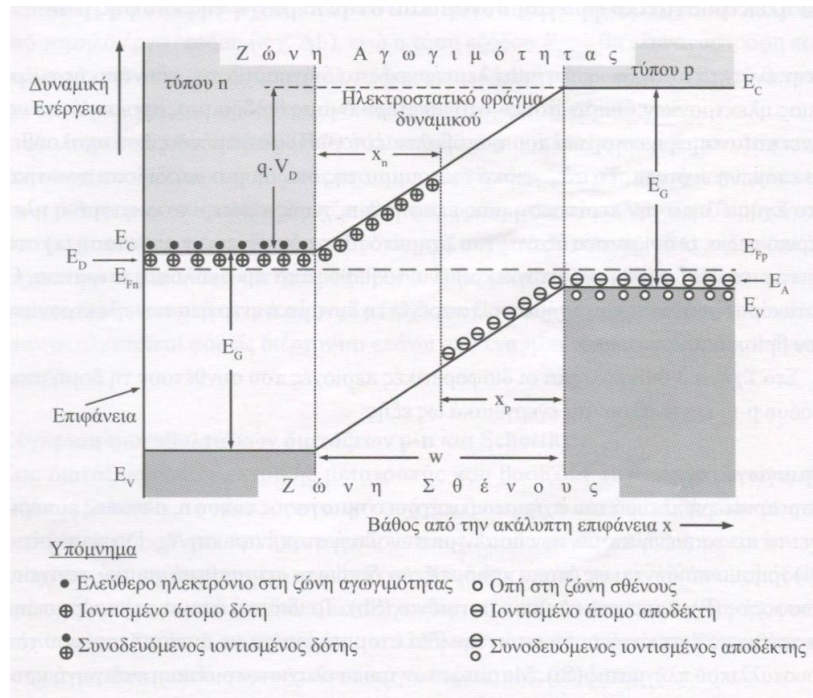
Ο ρόλος των ηλεκτρονίων που διαθέτουν ενεργειακές στάθμες χαμηλότερες από την κορυφή της ζώνης σθένους  $E_v$  είναι να συμβάλουν στη συνοχή μεταξύ των ατόμων του υλικού, αφού είναι δεσμευμένα από τα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος σχηματίζοντας ομοιοπολικούς χημικούς δεσμούς. Κατά συνέπεια, τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη σθένους δεν συντελούν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Μετά την ολοκλήρωση του ιοντισμού των προσμίξεων τα θετικά και αρνητικά ιόντα επίσης δε συντελούν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα αφού βρίσκονται «εγκλωβισμένα» στο κρυσταλλικό πλέγμα και δεν μπορούν να μετακινηθούν υπό την επίδραση εξωτερικών ηλεκτρικών πεδίων.

#### 1.5 Ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού

Στο μέσο του παρακάτω σχήματος φαίνεται η περιοχή  $w$  της επαφής η οποία αποτελεί το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού. Τα χαρακτηριστικά της είναι το ύψος  $(q \cdot V_d)$  το οποίο μετριέται σε eV και το εύρος  $w$  το οποίο μετριέται σε  $\mu\text{m}$ . Το φράγμα δημιουργείται από την αντιστάθμιση των οπών και ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην περιοχή της επαφής καθώς αποσπώνται από τα ιόντα που προέρχονται. Η αντιστάθμιση αυτή συμβαίνει κατά την κατασκευή της διάταξης με ταχύτατη ροή ηλεκτρονίων από το υλικό με την υψηλότερη στάθμη Fermi προς εκείνο με τη χαμηλότερη (σε χρόνο της τάξης των  $10^{-12}$  s) και αποτελεί προϋπόθεση για τη θερμοδυναμική ισορροπία στην περιοχή της επαφής.

Αφού ολοκληρωθεί το μεταβατικό στάδιο της επανασύνδεσης οπών – ηλεκτρονίων, διαμορφώνονται οι κατανομές φορτίου από τα ασυνόδευτα ιόντα δοτών – αποδεκτών. Οι ασυνόδευτοι δότες καταλαμβάνουν περιοχή  $x_n$  στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου n και οι ασυνόδευτοι αποδέκτες περιοχή  $x_p$  στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου p αντίστοιχα. Οι κατανομές των θετικών φορτίων των ασυνόδευτων δοτών και των αρνητικών φορτίων των ασυνόδευτων αποδεκτών δημιουργούν το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού, το συνολικό εύρος του οποίου είναι το άθροισμα :

$$W = x_p + x_n.$$



Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστικά ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού [1]

Με την προϋπόθεση ότι οι συγκεντρώσεις δοτών  $N_D$  και αποδεκτών  $N_A$  παραμένουν σταθερές σε συνάρτηση με την απόσταση  $x$ , η μορφή του ηλεκτροστατικού πεδίου του φράγματος δυναμικού θα είναι τριγωνική. Ο προσδιορισμός του φράγματος δυναμικού γίνεται πλήρως από το ύψος του  $(q \cdot V_d)$  και το εύρος ( $w$ ).

Κατά την θερμοδυναμική ισορροπία μιας διόδου  $p$ - $n$  απουσία εξωτερικής πόλωσης και φωτισμού, οι αναλυτικές εξισώσεις για το δυναμικό διάχυσης ( $V_D$ ) και το εύρος του φράγματος δυναμικού ( $w$ ) δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$V_D = \frac{k \times T}{q} \times \ln\left(\frac{n_{no}}{n_{po}}\right) = \frac{k \times T}{q} \times \ln\left(\frac{p_{po}}{p_{no}}\right)$$

Όπου

$V_D$  το δυναμικό διάχυσης της διόδου

$k$  η σταθερά Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23} J / K$ )

$T$  η απόλυτη θερμοκρασία

$q$  το στοιχειώδες φορτίο ( $1,6 \times 10^{-19} C$ )

$n_{no}$  η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου  $n$  (δείκτης  $n$ ) στην κατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας (δείκτης  $o$ )

$n_{po}$  η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου p (δείκτης p) στην κατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας (δείκτης ο)

$p_{po}$  η συγκέντρωση των οπών στον ημιαγωγό τύπου p (δείκτης p) στην κατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας (δείκτης ο)

$n_{no}$  η συγκέντρωση των οπών στον ημιαγωγό τύπου n (δείκτης n) στην κατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας (δείκτης ο)

$$w = \sqrt{\frac{2 \times e_0 \times e_s}{q} \times \frac{N_D^+ + N_A^-}{N_D^+ \times N_A^-} \times V_D}$$

w το εύρος του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού

$\epsilon_0$  η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού ( $8,85 \times 10^{-12} F / m$ )

$\epsilon_s$  η σχετική διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού (11,4 για το πυρίτιο)

q το στοιχειώδες φορτίο ( $1,6 \times 10^{-19} C$ )

$N_D^+$  η συγκέντρωση των ιοντισμένων δοτών

$N_A^-$  η συγκέντρωση των ιοντισμένων αποδεκτών

$V_D$  το δυναμικό διάχυσης της διόδου

Από τις παραπάνω εξισώσεις είναι προφανής η εξάρτηση του εύρους w από τις συγκεντρώσεις των προσμίξεων δοτών και αποδεκτών των ημιαγωγών τύπου n και p αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, με τη μείωση της συγκέντρωσης των ιοντισμένων δοτών  $N_D^+$  στον ημιαγωγό τύπου n διευρύνεται το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού. Για τη δίοδο πυριτίου p-n μια τυπική τιμή του εύρους είναι από 0,1μm έως 1μm.

## 1.6 Το ενεργειακό διάκενο $E_G$

Το ενεργειακό διάκενο συνίσταται στην διαφορά των ενεργειακών σταθμών μεταξύ του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας και της κορυφής την ζώνη σθένους, δηλαδή:

$$E_G = E_C - E_V$$

Η τιμή του ενεργειακού διακένου μετράται σε eV και εκφράζει την ενέργεια του ομοιοπολικού χημικού δεσμού που συνδέει τα άτομα του ημιαγωγού μεταξύ

τους. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή αυτή για το πυρίτιο ισούται με 1,1eV. Οι τιμές ενέργειας που δύναται να έχουν τα ηλεκτρόνια δίνονται από τις λύσεις της εξίσωσης Schrödinger. Από την τελευταία προκύπτει ότι είναι αδύνατον να υπάρξουν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς στο εσωτερικό του ενεργειακού διακένου.

### 1.7 Θερμοδυναμική ισορροπία

Όταν μια δίοδος βρεθεί σε σταθερή θερμοκρασία για ικανό χρονικό διάστημα απουσία οπτικών ή ηλεκτρικών διεγέρσεων μεταπίπτει σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Κατά την κατάσταση αυτή δημιουργείται μέσα στο ενεργειακό διάκενο μια οριζόντια στάθμη Fermi σε όλο το μήκος της διόδου. Στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας αναμένεται απουσία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρόνια ζώνης αγωγιμότητας ή οπές ζώνης σθένους) στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού, αφού το τελευταίο εμποδίζει να βρίσκονται εκεί. Συνεπώς, η περιοχή W είναι γνωστή και ως “περιοχή αποθήσεως ηλεκτρικών φορέων” (depletion layer width).

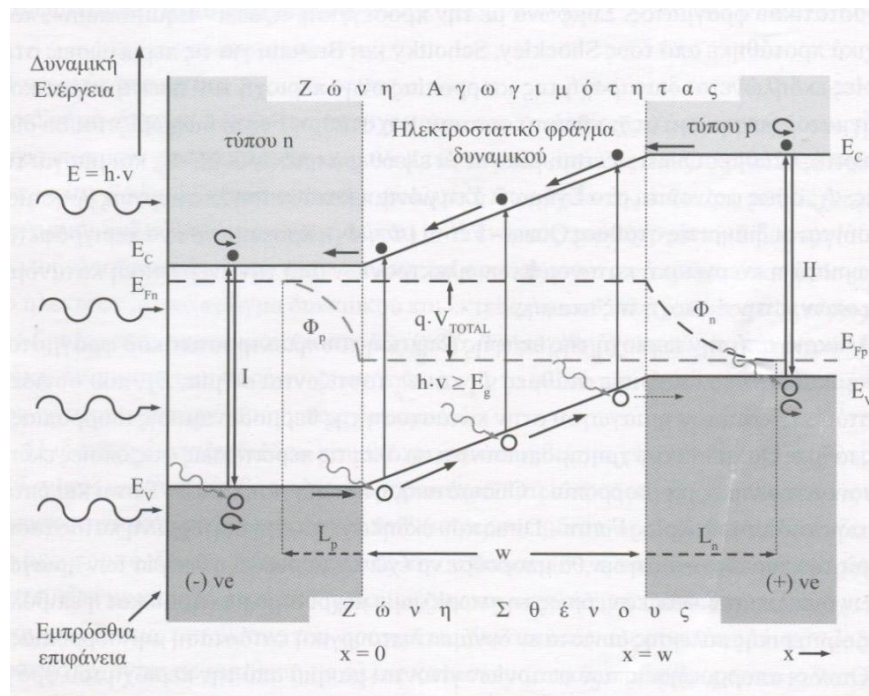
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ, ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

### 2.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

#### 2.1.1 Η ενεργός περιοχή

Αρχικά, η ακάλυπτη επιφάνεια της διάταξης που αντιστοιχεί στον ημιαγωγό τύπου n, δέχεται φωτόνια ενέργειας  $E = h \cdot \nu$ , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ξεκινάει την ανάπτυξη του στην ενεργό περιοχή που αρχικά ισούται με το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού και στη συνέχεια επεκτείνεται στο εύρος των περιοχών  $w + L_p + L_n$ , όπου  $L_p$  και  $L_n$  τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας των υλικών εκατέρωθεν του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού.





Σχήμα 2.1: Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας διόδου p-n [1]

Προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση κατά τη διάρκεια της φωτοβολταϊκής μετατροπής, απαιτείται η μεγιστοποίηση του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού της διάταξης διόδου που χρησιμοποιείται. Το τελευταίο μπορεί να επιτευχθεί με χαμηλά ποσοστά προσμίξεων και υψηλή τιμή του δυναμικού διάχυσης, προδιαγραφές που συχνά έρχονται σε αντίθεση με κατασκευαστικές επιδιώξεις των σχεδιαστών φωτοβολταϊκών διατάξεων, αφού για παράδειγμα για την ελαχιστοποίηση της αντίστασης σειράς απαιτούνται υψηλά ποσοστά νόθευσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις που υφίστανται αντικρουόμενες κατασκευαστικές επιλογές, ο κατασκευαστής επιλέγει το βέλτιστο συνδυασμό των χαρακτηριστικών, ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

### 2.1.2 Η οπτική διέγερση της διόδου

Έχοντας σα δεδομένο ότι το φως προσπίπτει στην επιφάνεια του ημιαγωγού τύπου n, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, η αλληλεπίδραση των φωτονίων θα πραγματοποιηθεί κατά κύριο λόγο με τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους, τα οποία με τη σειρά τους ευθύνονται για το σχηματισμό των χημικών δεσμών που συγκρατούν τα άτομα μεταξύ τους. Με την προϋπόθεση ότι η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού, κάθε φωτόνιο δύναται να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους που βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Το ηλεκτρόνιο αφού απορροφήσει την ενέργεια του φωτονίου

διεγείρεται προς τη ζώνη αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα να αφήσει μια κενή ενεργειακή κατάσταση στο πράγμα, δηλαδή μια οπή. Το αποτέλεσμα της οπτικής διέγερσης είναι η εισαγωγή ζευγών οπών στη ζώνη σθένους και ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας σε όλο το εύρος της επαφής p-n καθώς και του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού.

Λόγω της διαρκούς εισαγωγής ηλεκτρικών φορέων στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού εξαιτίας της συνεχούς οπτικής διαταραχής, το υλικό δεν μπορεί να μεταβεί σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Κατά τον φωτισμό της διόδου εκδηλώνεται διαταραχή της ισορροπίας και έτσι σύμφωνα με την προσέγγιση “ Quasi - Equilibrium” η στάθμη Fermi διαχωρίζεται σε δύο διακριτές οι στάθμες Quasi - Fermi, μία για τα ηλεκτρόνια  $\Phi_n$  και μία για τις οπές  $\Phi_p$ . Για την περιοχή μακριά από την επαφή οι δύο διακριτές αυτές στάθμες ταυτίζονται σε μία  $E_f$ , που αποτελεί την στάθμη Fermi του ημιαγωγού στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Στην περίπτωση που η απορρόφηση των φωτονίων γίνεται μακριά από την περιοχή του φράγματος δυναμικού, τα δημιουργούμενα ζεύγη οπών - ηλεκτρονίων κινούνται με την θερμική ταχύτητά τους γύρω από τις θέσεις δημιουργίας τους. Στη συνέχεια, αφού ζήσουν το χρόνο ζωής τους τα ζεύγη οπών - ηλεκτρονίων επανασυνδέονται και χάνονται. Οι συγκεκριμένες απορροφήσεις των φωτονίων δε συμβάλουν στην φωτοβολταϊκή μετατροπή ενέργειας κι έχουν ως μοναδικό αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της φωτοβολταϊκής μετατροπής.

Στην περίπτωση που η απορρόφηση των φωτονίων γίνεται στην περιοχή του φράγματος δυναμικού, τα παραγόμενα ζεύγη οπών - ηλεκτρονίων διαχωρίζονται από το ηλεκτροστατικό πεδίο προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η δυναμική της ενέργειας και να αποκτήσουν θεμελιώδεις καταστάσεις στη δομή του υλικού. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται το γεγονός ότι οι ηλεκτρικοί φορείς δε θα μπορέσουν να επανασυνδεθούν.

Τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας που βρίσκονται χωροταξικά εκατέρωθεν του φράγματος δυναμικού, αποτελούν ενεργό τμήμα που συμμετέχει στη φωτοβολταϊκή μετατροπή. Η ιδανική διάταξη θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ελάχιστο αριθμό επανασυνδέσεων μακριά από το φράγμα δυναμικού.

### **2.2.3 Τάση ανοικτοκύκλωσης και φωτόρρευμα**

Κατά τη διάρκεια της οπτικής διέγερσης τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n και οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου p. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται η κατανομή φορτίου που παρατηρείται σε μια ορθά πολωμένη

δίοδο p-n. Οι στάθμες  $\Phi_n$  και  $\Phi_p$  είναι οριζόντιες και διαχωρίζονται με την ενεργειακή διαφορά:

$$\Phi_n - \Phi_p = q \cdot V_{\text{total}}$$

όπου  $V_{\text{total}}$  η τιμή της τάσεως εξόδου στους εξωτερικούς αποδέκτες της φωτιζόμενος δίοδος p-n. Για μία ανοικτοκυκλωμένη δίοδο p-n η σχέση για την τάση ανοικτοκύκλωσης στην μόνιμη κατάσταση είναι η ακόλουθη:

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \times \ln\left(\frac{L_n + L_p}{(L_n / \tau_n) \times n_p + (L_p / \tau_p) \times p_n} \times g_{opt} + 1\right)$$

όπου

$V_{oc}$  η τάση ανοικτοκύκλωσης

$k$  η σταθερά Boltzmann

$T$  η απόλυτη θερμοκρασία

$q$  το στοιχειώδες φορτίο

$L_n$  το μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου p

$L_p$  το μήκος διάχυσης των οπών στο ημιαγωγό τύπου n

$\tau_n$  ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων που συνιστούν φορείς μειονότητας

$\tau_p$  ο χρόνος ζωής των οπών που συνιστούν φορείς μειονότητας

$n_p$  η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου p

$p_n$  η συγκέντρωση των οπών στον ημιαγωγό τύπου p

$g_{opt}$  ο ρυθμός για τη δημιουργία ζευγών οπών – ηλεκτρονίων

Το φωτόρρευμα, του οποίου η σχέση δίνεται παρακάτω, εξαρτάται από την απορροφούμενη φωτεινή ισχύ και παρέχεται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα με διεύθυνση του ρεύματος ανάστροφης πολωμένης δίοδος:

$$I_{opt} = q \times A \times (L_n + L_p) \times g_{opt}$$

όπου

$I_{opt}$  το φωτόρρευμα

$q$  το στοιχειώδες φορτίο

- A το εμβαδόν της επιφάνειας που δέχεται το φωτισμό
- $L_n$  το μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου p
- $L_p$  το μήκος διάχυσης των οπών στο ημιαγωγό τύπου n
- $g_{opt}$  ο ρυθμός για τη δημιουργία ζευγών οπών – ηλεκτρονίων

Από την παραπάνω σχέση παρατηρούμε ότι για δεδομένη τιμή φωτισμού το συνολικό φωτόρρευμα αυξάνει ανάλογα με το μέγεθος του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Πρακτικά η τάξη μεγέθους για το φωτόρρευμα στα εμπορικά φωτοβολταϊκά στοιχεία κυμαίνεται από 3A έως 7A. Παράλληλα με την αύξηση του εμβαδού επιτυγχάνεται και η σημείωση τη συνολικής αντίστασης σειράς  $R_s$ .

## 2.2 Οι εξισώσεις I-V του ΦΒ στοιχείου

Υποθέτοντας μια ιδανική δίοδο η οποία διεγείρεται ηλεκτρικά και οπτικά, οι εξισώσεις ρεύματος – τάσεως προκύπτουν από την επαλληλία ρευμάτων από τις περιπτώσεις όπου στη δίοδο επιβάλλεται μόνο φωτισμός και στην άλλη όπου βρίσκεται στο σκοτάδι και της επιβάλλεται ηλεκτρική διέγερση. Οι γενικευμένες εξισώσεις έχουν ως εξής:

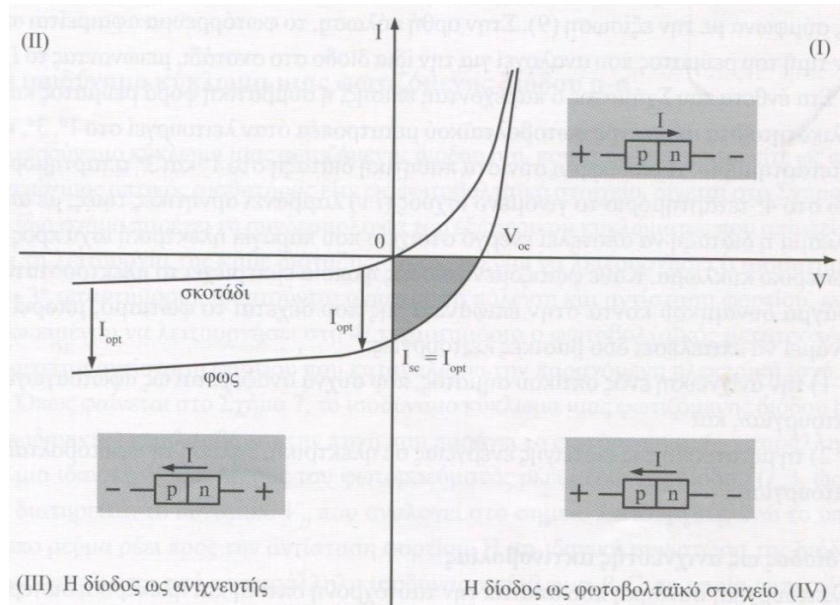
$$I_{fwd} = I_s \times \left( e^{\frac{qV_{fwd}}{kT}} - 1 \right) - q \times A \times (L_n + L_p) \times g_{opt}$$

$$I_{rev} = I_s + q \times A \times (L_n + L_p) \times g_{opt}$$

όπου

- $I_{fwd}$  το συνολικό ρεύμα ορθής πόλωσης
- $I_{rev}$  το συνολικό ρεύμα ανάστροφης πόλωσης
- $I_s$  το ανάστροφο ρεύμα κόρου
- $V_{fwd}$  η εξωτερικά επιβαλλόμενη ορθή πόλωση
- k η σταθερά Boltzmann
- T η απόλυτη θερμοκρασία
- A το εμβαδόν της επιφάνειας που δέχεται το φωτισμό
- q το στοιχειώδες φορτίο
- $L_n$  το μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου p
- $L_p$  το μήκος διάχυσης των οπών στο ημιαγωγό τύπου n
- $g_{opt}$  ο ρυθμός για τη δημιουργία ζευγών οπών – ηλεκτρονίων

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η γραφική παράσταση I-V μιας δίοδου p-n όταν υφίσταται ηλεκτρική και οπτική διέγερση ταυτόχρονα.

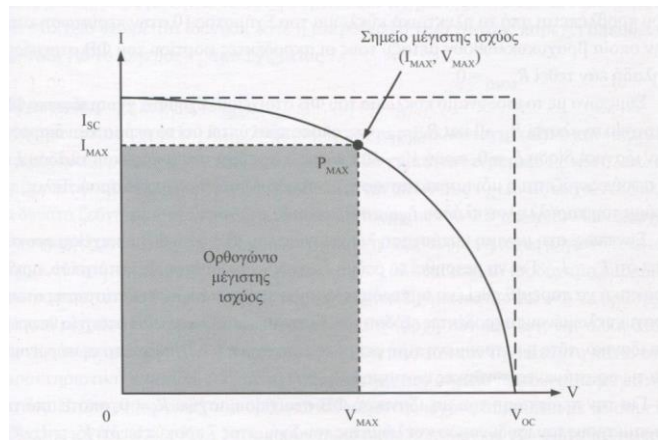


Σχήμα 2.2: Χαρακτηριστική I-V [1]

Στο 4ο τεταρτημόριο η δίοδος μετατρέπεται σε ενεργό φωτοβολταϊκό στοιχείο και παρέχει ηλεκτρική ισχύ, αφού η ισχύς λαμβάνει αρνητική τιμή ( $v > 0$ ,  $i < 0$ ). Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας φωτιζόμενης διόδου p-n που λειτουργεί ως φωτοβολταϊκό στοιχείο περιλαμβάνει την πηγή που ισοδυναμεί με το παραγόμενο φωτόρρευμα και παράλληλα συνδεδεμένη μια ιδανική δίοδο μέσω της οποίας ρέει ρεύμα  $I_D$  με σκοπό τη διατήρηση του δυναμικού  $V_D$  που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας, ενώ το υπόλοιπο ρεύμα ρέει προς την αντίσταση του φορτίου. Το παράλληλο ισοδύναμο RC ( $R_{SHUNT}$ ,  $C_D$ ) προσομοιώνει την μη ιδανική συνιστώσα της διόδου. Η αντίσταση  $R_{SHUNT}$  εισάγεται λόγω των μηχανισμών μεταφορά ηλεκτρικών φορέων εκατέρωθεν του φράγματος, ενώ η αντίσταση  $R_S$  λόγω του υποστρώματος και το ωμικών επαφών. Οι ιδανικές τιμές προκύπτουν για  $R_S \rightarrow 0$  και  $R_{SHUNT} \rightarrow \infty$ , ενώ οι τυπικές πραγματικές τιμές είναι  $R_{SHUNT} = 10^8 \Omega$  και  $R_S = 2-5 \Omega$ .

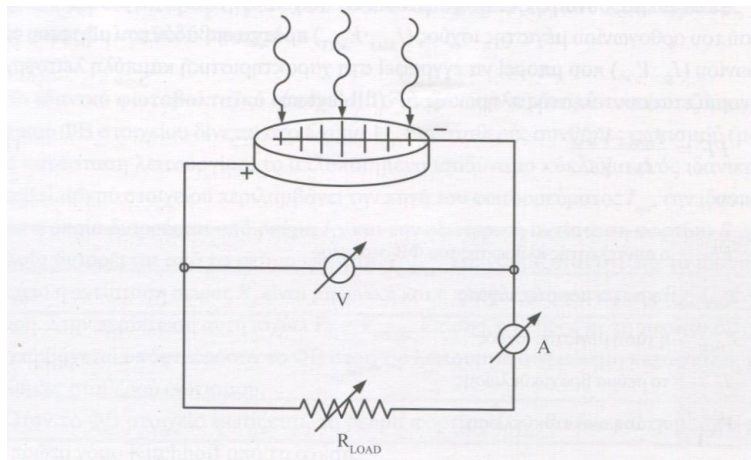
### 2.3 Χαρακτηριστική I-V ΦΒ στοιχείου

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η χαρακτηριστική I-V ΦΒ στοιχείου, όπου το γραμμοσκιασμένο ορθογώνιο αντιστοιχεί στην μέγιστη παρεχόμενη ισχύ  $P_{max}$ .



Σχήμα 2.3 : Παροχή μέγιστης ισχύος από ΦΒ στοιχείο [1]

Το απαιτούμενο κύκλωμα για τη χάραξη της γραφικής παράστασης I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.4 : Διάταξη για καταγραφή χαρακτηριστικής I-V [1]

## 2.3 Χαρακτηριστικά στοιχεία ΦΒ στοιχείου

### 2.3.1 Ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ )

Υποθέτοντας μηδενική τάση στο κύκλωμα του σχήματος 2.4 ( $V=0$ ), προκύπτει η μέγιστη δυνατή τιμή για το ρεύμα, το οποίο ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ). Το ρεύμα αυτό προκύπτει πρακτικά αν βραχυκυκλώσουμε τους ακροδέκτες του φορτίου του ΦΒ στοιχείου, δηλαδή  $R_{load}=0$ .

### 2.3.2 Τάση ανοικτοκύκλωσης ( $V_{oc}$ )

Η τάση ανοικτοκύκλωσης προκύπτει αν ανοικτοκυκλώσουμε τους ακροδέκτες εξόδου του ΦΒ στοιχείου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση της τάσης αυτής όταν  $R_{load} = \infty$  και  $I_{load} = 0$ . Πρακτικά είναι η  $V_{oc}$  μετριέται αν στη θέση της αντίστασης του φορτίου συνδεθεί βολτόμετρο με άπειρη εσωτερική αντίσταση.

### 2.3.3 Μέγιστη παροχή ισχύος

Αν εξετάσουμε όλα τα δυνατά ζεύγη ρεύματος – τάσης, ένα σημείο λειτουργίας  $I_{max}$ ,  $V_{max}$  είναι αυτό που μεγιστοποιεί την ισχύ ( $P_{max}$ ), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3. Ο λόγος του εμβαδού του ορθογωνίου μέγιστης ισχύος  $I_{max} \times V_{max}$  προς το εμβαδό του ορθογωνίου  $I_{sc} \times V_{oc}$  ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (fill factor):

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

όπου

- FF ο συντελεστής πλήρωσης του ΦΒ στοιχείου
- $I_{max}$  το ρεύμα μέγιστης ισχύος
- $V_{max}$  η τάση μέγιστης ισχύος
- $I_{sc}$  το ρεύμα βραχυκύκλωσης
- $V_{oc}$  η τάση ανοικτοκύκλωσης

Οι παράμετροι FF,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  αποτελούν τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη για την αξιολόγηση της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και καθορίζουν το συντελεστή απόδοσής του, όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta = \frac{P_{HLEKTRIKH}}{P_{OPTIKH}} = \frac{P_{max}}{H \times A} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{H \times A} = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{H \times A}$$

όπου

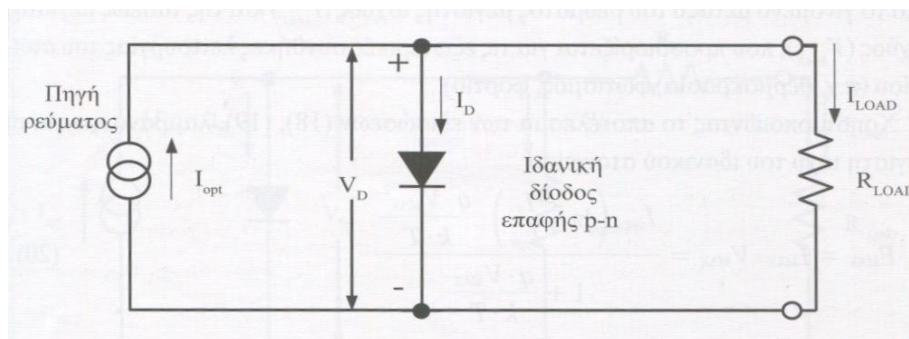
- $\eta$  ο συντελεστής απόδοσης
- $P_{max}$  η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς
- H η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

- A το εμβαδόν του ΦΒ στοιχείου
- FF ο συντελεστής πλήρωσης του ΦΒ στοιχείου
- $I_{max}$  το ρεύμα μέγιστης ισχύος
- $V_{max}$  η τάση μέγιστης ισχύος
- $I_{sc}$  το ρεύμα βραχυκύκλωσης
- $V_{oc}$  η τάση ανοικτοκύκλωσης

Από τον παραπάνω τύπο γίνεται εύκολα κατανοητό ότι μεγιστοποίηση των παραμέτρων FF,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  συνεπάγεται αύξηση της απόδοσης της φωτοβολταϊκής μετατροπής.

## 2.4 Το ιδανικό ΦΒ στοιχείο

Για το ιδανικό στοιχείο ισχύει ότι η αντίσταση σειράς  $R_s$  έχει μηδενική τιμή, ενώ η παράλληλη αντίσταση  $R_{SHUNT}$  άπειρη τιμή. Επίσης, αφού έχουμε σταθερές συνθήκες φωτισμού και συνεπώς βρισκόμαστε στην μόνιμη κατάσταση ο κλάδος της χωρητικότητας παραλείπεται. Το φωτόρρευμα  $I_{opt}$  αντιπροσωπεύεται από μια πηγή ρεύματος, η ιδανική δίοδος διαρρέεται από ρεύμα  $I_D$  και το φορτίο από ρεύμα  $I_{load}$ . Το ιδανικό μοντέλο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.5: Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού ΦΒ στοιχείου [1]

Όταν το ΦΒ στοιχείο φωτίζεται ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$I_{load} = I_{opt} - I_D$$

όπου το ρεύμα  $I_D$  είναι το ρεύμα ορθής πόλωσης της διόδου και δίνεται από τη σχέση:

$$I_D = I_S \times (e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1)$$

όπου



- $I_D$  το ρεύμα ορθής πόλωσης
- $I_S$  το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης
- $V_D$  η τάση ορθής πόλωσης στα άκρα της διόδου
- $q$  το στοιχειώδες φορτίο
- $k$  η σταθερά Boltzman
- $T$  η απόλυτη θερμοκρασία

Συνδυάζοντας τις σχέσεις προκύπτει ότι:

$$I_{load} = I_{opt} - I_S \times (e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1)$$

Η τάση στα άκρα του φορτίου μεγιστοποιείται όταν το ρεύμα  $I_D$  λάβει τη μέγιστη τιμή, γεγονός που προκύπτει όταν ανοικτοκυκλώσουμε τους ακροδέκτες του φορτίου ( $R_{load}=\infty$ ) ή ισοδύναμα  $I_{load}=0$ . Τότε όλο το φωτόρρευμα θα ρέει μέσω της διόδου και έτσι στα άκρα της θα σχηματιστεί η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc} = V_D$ , η τιμή της οποίας δίνεται από τον παρακάτω τύπο, με δεδομένο πάντα ότι το στοιχείο είναι ιδανικό :

$$V_{oc} = \frac{k \times T}{q} \times \ln\left(\frac{I_{opt}}{I_S} + 1\right)$$

Η παρεχόμενη ισχύς από το ιδανικό ΦΒ στοιχείο το οποίο τροφοδοτεί φορτίο  $R_{load}$  είναι  $I_{load} \times V_{load} = I_{load} \times V_D$ , αφού  $V_{load} = V_D$  :

$$P_{load} = I_{load} \cdot V_{load} = I_{load} \cdot V_D = \left[ I_{opt} - I_S \cdot (e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1) \right] \cdot V_D$$

όπου

- $P_{load}$  η παρεχόμενη ισχύς στο  $R_{load}$
- $V_{load}$  η τάση στα άκρα του φορτίου  $R_{load}$
- $I_{load}$  το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο  $R_{load}$
- $V_D$  η τάση στα άκρα της φωτιζόμενης διόδου

Για τη μεγιστοποίηση της ισχύος  $P_{load}$ , απαιτείται ο μηδενισμός της πρώτης παραγώγου ως προς την τάση  $V_{load}$ , δηλαδή:

$$\frac{dP_{load}}{dV_{load}} = 0$$

Αντικαθιστώντας παίρνουμε:

$$\frac{dP_{load}}{dV_{load}} = \frac{d \left( I_{opt} - I_S \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V_{load}}{k \cdot T}} - 1 \right) \right) \cdot V_{load}}{dV_{load}} = 0$$

Η παραπάνω εξίσωση ικανοποιείται όταν  $V_{load} = V_{MAX}$ , δηλαδή:

$$- \left[ \frac{q \cdot I_S}{k \cdot T} \cdot e^{\frac{q \cdot V_{MAX}}{k \cdot T}} \right] \cdot V_{MAX} + \left[ I_{opt} - I_S \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V_{MAX}}{k \cdot T}} - 1 \right) \right] = 0$$

Μετά την εκτέλεση πράξεων λαμβάνουμε την τιμή της τάσης  $V_{MAX}$  που μεγιστοποιεί την ισχύ ( $P_{MAX}$ ):

$$e^{\frac{q \cdot V_{MAX}}{k \cdot T}} \times \left( \frac{q \cdot V_{MAX}}{k \cdot T} + 1 \right) = \frac{I_{opt}}{I_S} + 1 = e^{\frac{q \cdot V_{OC}}{k \cdot T}}$$

Η τιμή του  $I_{MAX}$  προκύπτει αν θέσουμε όπου  $V_D$  την υπολογισθείσα τιμή της  $V_{MAX}$ :

$$I_{MAX} = I_{opt} - I_S \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V_{MAX}}{k \cdot T}} - 1 \right) = I_{opt} \cdot \left[ \frac{\frac{I_{opt}}{I_S} + 1}{1 + \frac{q \cdot V_{MAX}}{k \cdot T}} - 1 \right]$$

Μετά την εκτέλεση πράξεων προκύπτει:

$$I_{MAX} = \frac{I_{opt} \times \left( 1 + \frac{I_S}{I_{opt}} \right) \times \frac{q \cdot V_{MAX}}{k \cdot T}}{1 + \frac{q \cdot V_{MAX}}{k \cdot T}}$$

Η μέγιστη παρεχόμενη ισχύς του ιδανικού ΦΒ στοιχείου προκύπτει από το γινόμενο  $I_{MAX} \times V_{MAX}$ :

$$P_{MAX} = I_{MAX} \times V_{MAX} = \frac{I_{opt} \times \left( 1 + \frac{I_S}{I_{opt}} \right) \times \frac{q \cdot V_{MAX}^2}{k \cdot T}}{1 + \frac{q \cdot V_{MAX}}{k \cdot T}}$$

Το ζεύγος ( $I_{MAX}, V_{MAX}$ ) έχει ιδιαίτερη σημασία στη λειτουργία του ΦΒ στοιχείου, αφού παρέχει τη μέγιστη ισχύ και καλείται σημείο λειτουργίας. Μάλιστα, γίνεται

προσαρμογή της τιμής του φορτίου  $R_{load}$  στην τιμή  $R_{MAX} = V_{MAX} / I_{MAX}$  από συσκευές που ονομάζονται MPPT (Maximum Power Point Trackers), οι οποίες με χρήση αλγορίθμων και ηλεκτρονικών ισχύος ανιχνεύουν τις κατάλληλες τιμές της τάσης και του ρεύματος με την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης.

## 2.5 Το πραγματικό (μη ιδανικό) ΦΒ στοιχείο

Στο κυκλωματικό ισοδύναμο του πραγματικού ΦΒ στοιχείου του σχήματος 2.6 διακρίνονται δύο στοιχεία πλέον του ιδανικού στοιχείου, η αντίσταση  $R_S$  και η αντίσταση  $R_{SHUNT}$ . Η αντίσταση  $R_S$  εκφράζει το σύνολο των αντιστάσεων των ωμικών επαφών και του όγκου των υλικών. Ο παράλληλος κλάδος της αντίστασης  $R_{SHUNT}$  διαρρέεται από το ρεύμα  $I_{SHUNT}$  και αντιπροσωπεύει την αύξηση του ρεύματος που διαρρέει τη δίοδο λόγω της μη ιδανικής συμπεριφοράς της. Ο συγκεκριμένος κλάδος έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανάστροφη πόλωση του ΦΒ στοιχείου. Το ρεύμα  $I_D$  που διαρρέει τον κλάδο της ιδανικής δίοδου δημιουργείται από τη μεταφορά ηλεκτρικών φορέων μειονότητας εκατέρωθεν του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού. Όπως φανερώνει το ισοδύναμο κύκλωμα το ρεύμα  $I_{load}$  που διαρρέει το φορτίο δίνεται από τον τύπο:

$$I_{load} = I_{opt} - I_D - I_{SHUNT}$$

Η τάση  $V_D$  στα άκρα της δίοδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_D = V_{load} + I_{load} \times R_S$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις παίρνουμε:

$$I_{load} = I_{opt} - I_S \times \left( e^{\frac{q(V_{load} + I_{load} \times R_S)}{k \times T}} - 1 \right) - \frac{V_{load} + I_{load} \times R_S}{R_{SHUNT}}$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$  θέτοντας  $V_{load}=0$  και αντικαθιστώντας το  $I_{load}$  με  $I_{SC}$ :

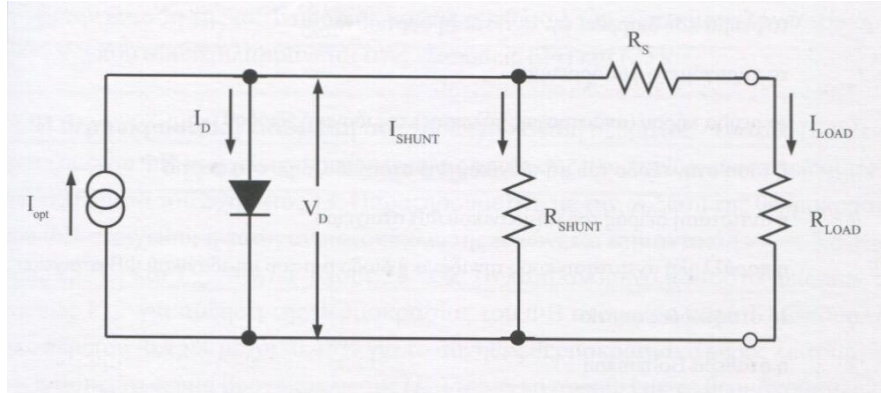
$$I_{SC} = I_{opt} - I_S \times \left( e^{\frac{q \times R_S \times I_{SC}}{k \times T}} - 1 \right) - \frac{R_S - I_{SC}}{R_{SHUNT}}$$

όπου το  $I_{SC}$  μετράται στη βραχυκυκλωμένη έξοδο.

Η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{OC}$  εξάγεται αν μηδενίσουμε το ρεύμα στον ανοικτοκυκλωμένο κλάδο του φορτίου. Τότε είναι  $V_D = V_{OC}$  και  $I_{SHUNT} = V_{OC} / R_{SHUNT}$

και λαμβάνουμε:

$$I_{opt} = I_D + I_{SHUNT} \supset I_S \times (e^{\frac{qV_{OC}}{kT}} - 1) + \frac{V_{OC}}{R_{SHUNT}}$$



Σχήμα 2.6 : Ισοδύναμο κύκλωμα μη ιδανικού ΦΒ στοιχείου [1]

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές των  $I_{SC}$  και  $V_{OC}$  δεν είναι σταθερές και εξαρτώνται από:

- α) τη θερμοκρασία της διόδου
- β) την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

## 2.6 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το μικρότερο δομικό στοιχείο που λαμβάνει μέρος στη φωτοηλεκτρική μετατροπή είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο ή αλλιώς cell. Τα εμπορικά ΦΒ στοιχεία κατασκευάζονται από διόδους επαφής p-n και το εμβαδόν τους ξεκινάει από μερικά  $cm^2$  και φτάνει έως τα  $180cm^2$ .

### 2.6.1 Μονοκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία

Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή αλλιώς ενεργειακής πυκνότητας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του είναι το υψηλό κόστος σε σύγκριση με το πολυκρυσταλλικό. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής τους είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (Float Zone), οι οποίες βασίζονται

στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το σχήμα τους συνήθως είναι κυκλικό με διάμετρο μέχρι έξι ίντσες και πάχος περίπου 300μm. Η απόδοσή τους στη βιομηχανία κυμαίνεται από 15-18%, ενώ σε εργαστηριακό επίπεδο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις που αγγίζουν έως και το 24,7%. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μονοκρυσταλλικού στοιχείου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 2.7: Μονοκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο [2]

### 2.6.2 Πολυκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία

Η παραγωγή κρυστάλλων πολυκρυσταλλικού πυριτίου συνήθως γίνεται με την επεξεργασία επαναχρησιμοποιημένου πυριτίου ηλεκτρονικής καθαρότητας με τη χρήση μίας από τις δύο παρακάτω μεθόδους:

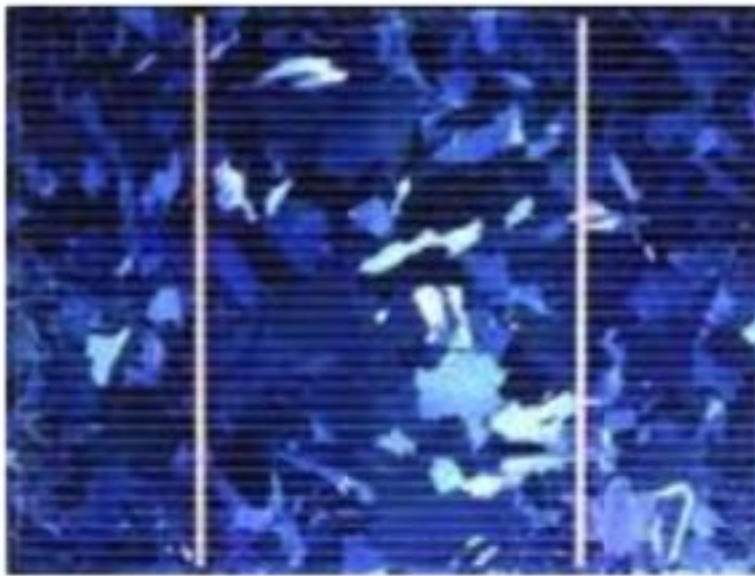
α) Στην πρώτη μέθοδο μικροκρύσταλλοι πυριτίου τοποθετούνται σε ορθογώνιο καλούπι, το οποίο θερμαίνεται μέχρι το σημείο τήξης. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας πολυκρύσταλλος στη δομή του οποίου περιέχονται μονοκρυσταλλικά τμήματα. Στη συνέχεια ο κρύσταλλος αυτός καθαρίζεται εξωτερικά και στη συνέχεια κόβεται σε λεπτά εγκάρσια φύλλα (wafers) πάχους περίπου 350μm. Η μέθοδος αυτή προσομοιάζει τη μέθοδο Czochralski, με τη διαφορά ότι το προϊόν της χύτευσης παρουσιάζει πολύ κρυσταλλική μορφή. Κατά την τελική επεξεργασία το φύλλο διαμορφώνεται σε πολυκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου με την βοήθεια χημικών μεθόδων και τεχνολογία μικροηλεκτρονικής καθαρότητας.

β) Στη δεύτερη μέθοδο έχουμε απευθείας κατασκευή του wafer με τη βοήθεια ενός επιπέδου ορθογώνιου καλουπιού, στο οποίο τοποθετούνται

μικροκρύσταλλοι πυριτίου, στη συνέχεια θερμαίνονται μέχρι το σημείο τήξης τους και με τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης διευρύνεται το μέγεθος τους.

Τα χαρακτηριστικά των πολυκρυσταλλικών δίσκων που παράγονται με μία από τις παραπάνω μεθόδους εξαρτώνται από την ομοιομορφία

στο αρχικό ποσοστό συγκέντρωσης των προσμίξεων, το μέγεθος των μονοκρυσταλλικών τμημάτων και από την κοινή περιοχή μεταξύ των διαδοχικών μονοκρυσταλλικών περιοχών. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα των δίσκων είναι τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας, τα οποία λαμβάνουν τιμή από 50-280 $\mu\text{m}$  σε αντίθεση με τα μονοκρυσταλλικά που η αντίστοιχη τιμή είναι περίπου 300 $\mu\text{m}$ . Άλλος καθοριστικός παράγοντας για την ποιότητα είναι ο ρυθμός επανασύνδεσης μεταξύ οπών – ηλεκτρονίων.



Σχήμα 2.8: Πολυκρυσταλλικό Φβ στοιχείο [3]

### 2.6.3 ΦΒ στοιχεία λεπτών υμενίων

Οι συμφέρουσες τεχνικές κατασκευής των ΦΒ στοιχείων λεπτών υμενίων, που μπορούν μάλιστα να πραγματοποιηθούν σε μεγάλη κλίμακα, τα καθιστά πολύ δημοφιλή στην αγορά καταλαμβάνοντας έτσι μεγάλο τμήμα της. Οι τεχνικές αυτές είναι η LPE (Liquid Phase Epitaxy), η CVD (Chemical Vapour Deposition) και η MBE (Molecular Beam Epitaxy) με την τελευταία να χρησιμοποιείται κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο και όχι για βιομηχανική χρήση μεγάλης κλίμακας.

Η κατασκευή τους βασίζεται στην εναπόθεση τουλάχιστον δύο λεπτών ημιαγωγικών υμενίων πάχους περίπου 1 $\mu\text{m}$  πάνω σε κατάλληλο υπόστρωμα, το οποίο μπορεί να είναι υάλινη ή μεταλλική επιφάνεια ή κρύσταλλος κάποιου

ημιαγωγού. Τα δύο αυτά υμένια είναι ημιαγωγός τύπου n και τύπου p και τοποθετούνται στην άνω όψη που δέχεται στο φωτισμό δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό το απαιτούμενο ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού για τη λειτουργία του στοιχείου.

#### **2.6.4 ΦΒ στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si)**

Η διατήρηση της απόδοσης των στοιχείων άμορφου πυριτίου σε υψηλές θερμοκρασίες συγκριτικά με τα υπόλοιπα είδη, τα καθιστά ιδανικά όταν οι συνθήκες χρήσης το επιβάλλουν. Ωστόσο, η απόδοση τους είναι μόλις 6% σε σχέση με την απόδοση των υπολοίπων ειδών που κυμαίνεται από 12 – 17%. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της μέγιστης ισχύος ανά μονάδα °C αύξησης της θερμοκρασίας είναι -0,2%, ενώ για τα υπόλοιπα είδη είναι της τάξης του -0,4% έως -0,5%.

Η διαδικασία παραγωγής των στοιχείων a-Si γίνεται με συμπύκνωση προϊόντων θερμικής διάσπασης αερίων πυριτιούχων ένωση, με αποτέλεσμα πολλοί από τους χημικούς δεσμούς να είναι ατελείς. Η τιμή του ενεργειακού διακένου κυμαίνεται από 1,2–1,6eV, σε αντίθεση με αυτό το μονοκρυσταλλικού πυριτίου που αντιστοιχεί σε 1,1eV. Σημειώνεται ότι η ιδανική τιμή του ενεργειακού διακένου για να υπάρχει μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1,45eV, γεγονός που καθιστά το a-Si να συμπεριφέρεται καλύτερα στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Ακόμη ένα πλεονέκτημα του a-Si είναι ο μεγαλύτερος συντελεστής απορρόφησης σε σχέση με το μονοκρυσταλλικό, καθιστώντας έτσι αποτελεσματικότερη την φωτοβολταϊκή μετατροπή καθώς η απορρόφηση της ακτινοβολίας πραγματοποιείται σε βάθος της τάξης του 1μm.

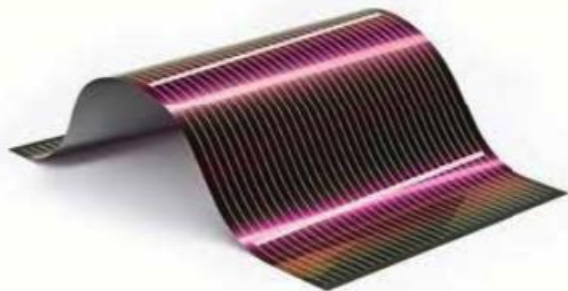
Μια λύση για την βελτίωση των ιδιοτήτων του a-Si αποτελεί η προσθήκη ατόμων υδρογόνου στο πλέγμα του υλικού, το οποία συνδέονται με τους ατελείς χημικούς δεσμούς του πυριτίου, μειώνοντας τις ενεργειακές στάθμες στο εσωτερικό του ενεργειακού διακένου. Σήμερα γίνονται προσπάθειες για τη βελτίωση τις απόδοσης, όπως επίσης υφίστανται υβριδικά στοιχεία που συνδυάζουν μονοκρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο φτάνοντας απόδοση της τάξης του 15%.



Σχήμα 2.9: ΦΒ στοιχείο άμορφου πυριτίου [3]

### 2.6.5 Φωτοβολταϊκά στοιχεία δισεληνογαλλιοϊνδιούχου χαλκού (CuInGaSe<sub>2</sub>, CIGS)

Ο δισεληνογαλλιοϊνδιούχος χαλκός παρουσιάζει εξαιρετική απορροφητικότητα στην προσπίπτουσα ακτινοβολία. Εκμεταλλευόμενοι το ενεργειακό διάκενο που ανέρχεται στα 1,1eV, καταφέρνουμε να πετύχουμε αποδόσεις που αγγίζουν το 19.2%, σε μορφή πλαισίου, ενώ σε εργαστηριακό επίπεδο μπορεί να φτάσει και το 21.7%. Το πάχος του κυμένεται από 1 – 2 μm.

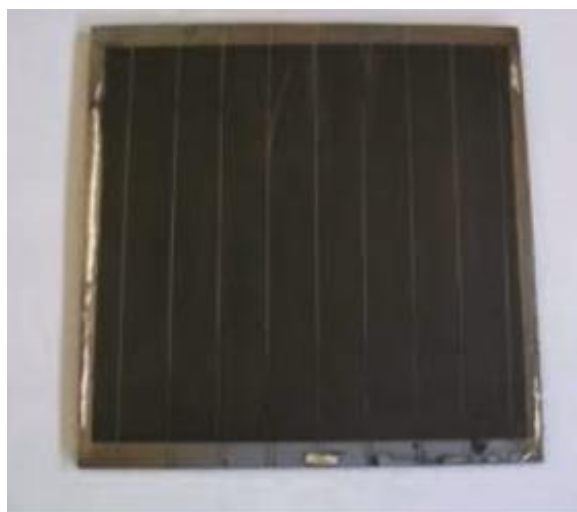


Σχήμα 2.10 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο δισεληνογαλλιοϊνδιούχου χαλκού[3]

### 2.6.6 Φωτοβολταϊκά στοιχεία τελλουριούχου καδμίου (CdTe)

Το τελλουριούχο κάδμιο διαθέτει ενεργειακό διάκενο ίσο με 1,5eV, γεγονός που του προσφέρει πλεονεκτήματα, όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 18.6%, ενώ στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 21%. Μειονεκτήματα στην χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο καθώς και η έλλειψη του τελλουρίου.

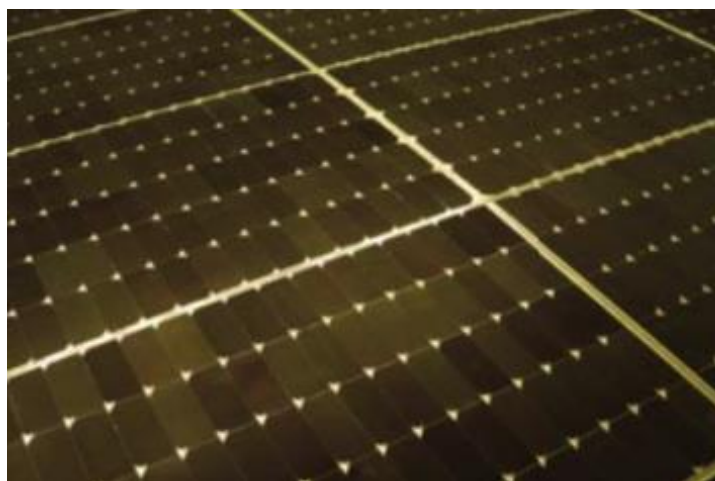




Σχήμα 2.11: Φωτοβολταϊκό στοιχείο τελλουριούχου καδμίου [3]

### 2.6.7 Φωτοβολταϊκά στοιχεία αρσενικούχου γαλλίου (GaAs)

Το ενεργειακό διάκενο του αρσενικούχου γαλλίου είναι 1.42 eV, ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του σε μορφή φωτοβολταϊκού στοιχείου φτάνει το 28.8%, ενώ σε μορφή πλαισίου 25.1%. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που επιβάλλει την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (Solar concentrators). Επίσης, έχουν υψηλή αντοχή σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και σε συνδυασμό με την πολύ υψηλή απόδοση τους ενδείκνυνται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υψηλό κόστος.

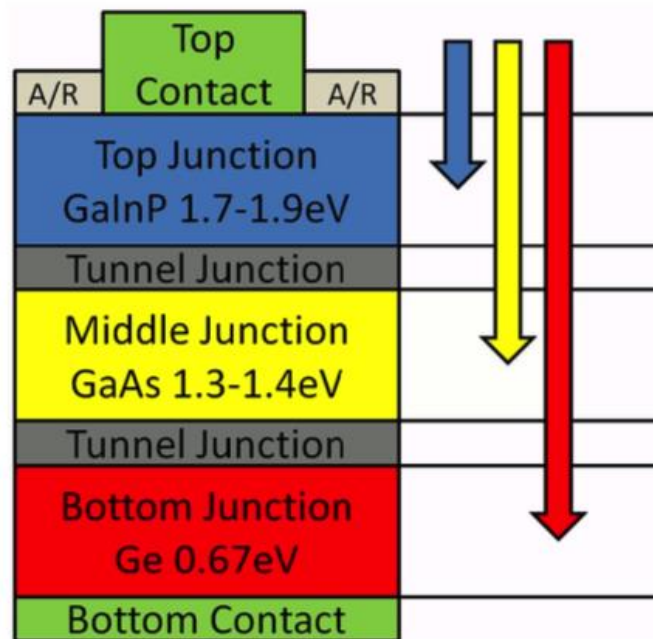


Σχήμα 2.12: Φωτοβολταϊκό στοιχείο αρσενικούχου γαλλίου [3]

## 2.7 Άλλες τεχνολογίες ΦΒ στοιχείων

### 2.7.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυεπίπεδης επαφής

Με σκοπό την απορρόφηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, δημιουργήθηκαν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυεπίπεδης επαφής αποτελούμενα από πολλαπλές επαφές p-n, τοποθετημένες σε μορφή στοίβας με φθίνουσα ταξινόμηση ενεργειακού διακένου. Στην όψη που προσπίπτει η ακτινοβολία τοποθετείται ο ημιαγωγός με το μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο, απορροφώντας με αυτόν τον τρόπο πρώτα τα υψηλής ενέργειας φωτόνια. Συνεχίζοντας στα επόμενα στρώματα απορροφώνται φωτόνια μικρότερης ενέργειας, μέχρι να αξιοποιηθεί το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση τους να αγγίζει το 46%, γεγονός που αυξάνει το κόστος τους όπως είναι αναμενόμενο και συνεπώς βρίσκει χρήση κυρίως σε διαστημικές εφαρμογές.

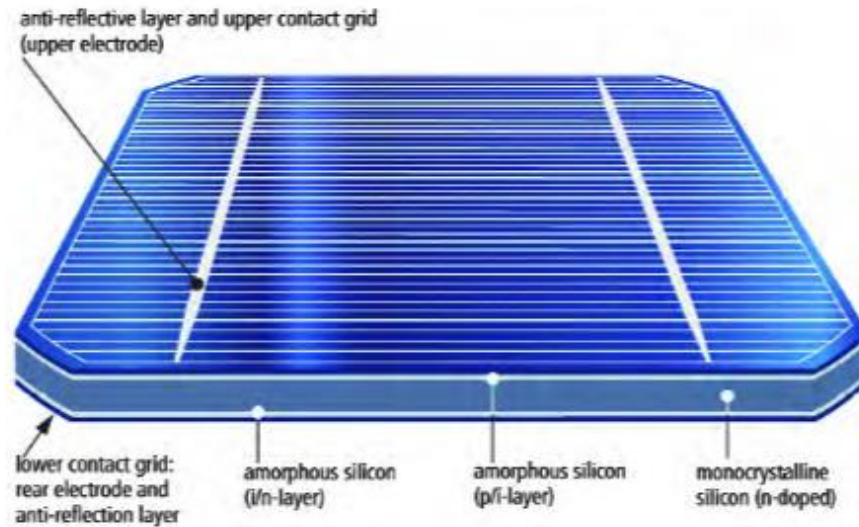


Σχήμα 2.13: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυεπίπεδης επαφής [4]

### 2.7.2 Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα πολυστρωματικά ΦΒ στοιχεία, όπως προκύπτει και από την ονοματολογία τους, συνίστανται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer – Ετεροενώσεις με ενδογενή λεπτά

στρώματα). Τα πιο διαδεδομένα πολυστρωματικά ΦΒ στοιχεία αποτελούνται από μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου, η οποία επικαλύπτεται εκατέρωθεν με δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες που αγγίζει το 17,2% και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Όπως είναι αναμενόμενο, το κόστος τους είναι μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών ΦΒ στοιχείων.



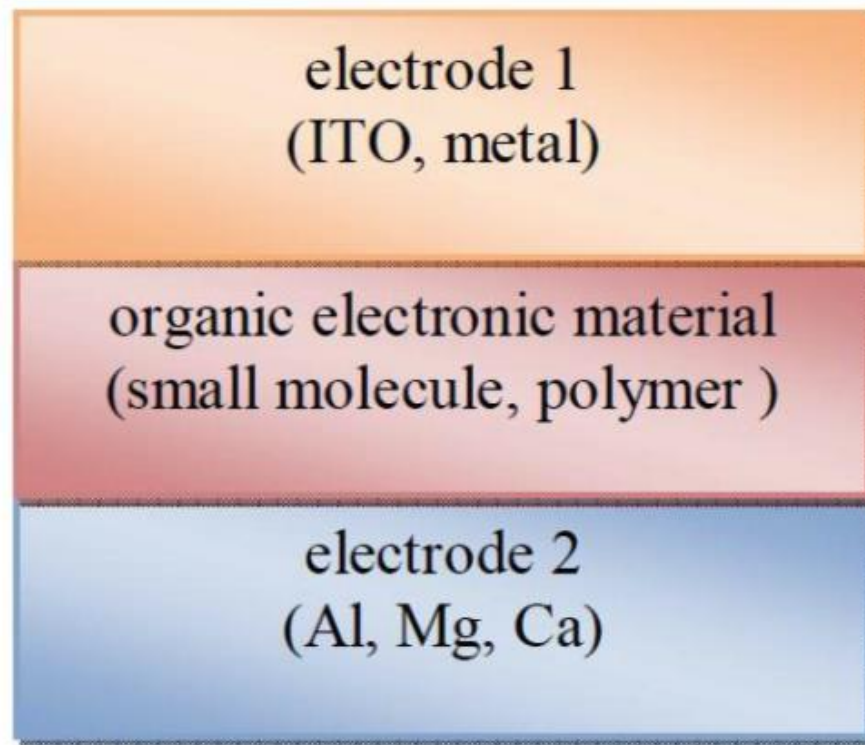
Σχήμα 2.14: Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο [4]

### 2.7.3 Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από λεπτά υμένα, τυπικά 100 nm, οργανικών ημιαγωγών και ενώσεις μικρών μορίων. Τα περισσότερα οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από πολυμερή. Είναι λιγότερο δαπανηρά στην κατασκευή τους, έχουν υψηλό συντελεστή οπτικής απορρόφησης και το ενεργειακό χάσμα μπορεί να προσαρμοστεί, αλλάζοντας το μήκος της αλυσίδας του πολυμερούς. Στο οργανικό στοιχείο, δεν δημιουργούνται αμέσως ηλεκτρόνια και οπές όταν απορροφάται το φωτόνιο. Αντίθετα, το προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί ένα εξιτόνιο, το οποίο είναι ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής, περιορισμένο σε ένα μόριο ή σε περιοχή μιας αλυσίδας πολυμερούς. Προκειμένου να απελευθερωθούν τα φορτία, πρέπει να ξεπεραστεί η ενέργεια δέσμησης του εξιτονίου.

Στην απλούστερη μορφή τους, τα στοιχεία κατασκευάζονται με τοποθέτηση ενός στρώματος οργανικών υλικών ανάμεσα σε δύο μεταλλικούς αγωγούς, τυπικά ένα στρώμα οξειδίου ινδίου και κασσιτέρου (ITO) και ένα στρώμα μετάλλου, όπως το αλουμίνιο, το μαγνήσιο ή το ασβέστιο.

Οι αποδόσεις που έχουν επιτευχθεί μέχρι σήμερα, χρησιμοποιώντας αγώγιμα πολυμερή, είναι χαμηλές σε σύγκριση με τα ανόργανα υλικά, με την υψηλότερη αναφερόμενη απόδοση να έχει τιμή 10%. Ωστόσο, αυτά τα στοιχεία θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα για ορισμένες εφαρμογές, όπου η μηχανική ευελιξία είναι σημαντική.



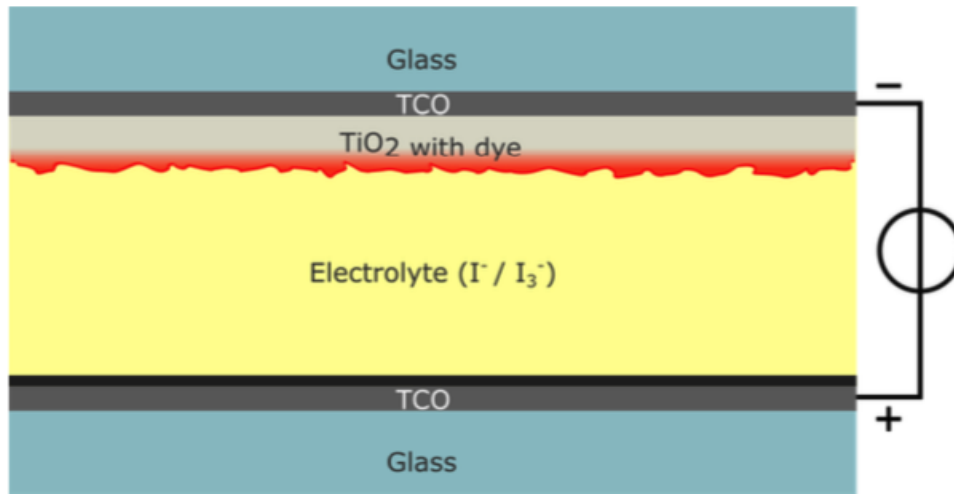
Σχήμα 2.15: Οργανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο [4]

#### 2.7.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία βαφής (Dye – sensitized)

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο βαφής ανήκει στα στοιχεία λεπτού υμενίου. Αποτελείται από μια πορώδη στρώση από νανοσωματίδια διοξειδίου του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ), επικαλυμμένη με βαφή, η οποία απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Το διοξείδιο του τιτανίου βυθίζεται κάτω από ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη, πάνω από το οποίο βρίσκεται ένας καταλύτης πλατίνας. Το διοξείδιο του τιτανίου αποτελεί την άνοδο της διάταξης, ενώ η πλατίνα την κάθοδο.

Η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται, διαμέσου ενός ηλεκτροδίου διαφανούς αγώγιμου οξειδίου (TCO), στο στρώμα βαφής όπου διεγείρει τα ηλεκτρόνια. Στη συνέχεια, αυτά ρέουν στο διοξείδιο του τιτανίου, προς το άλλο διαφανές ηλεκτρόδιο, όπου συλλέγονται για τροφοδοσία ενός φορτίου. Αφού μετακινηθούν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, εισάγονται εκ νέου μέσα στον ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης στη συνέχεια μεταφέρει τα ηλεκτρόνια στα μόρια βαφής.

Η καλύτερη απόδοση φωτοβολταϊκής μετατροπής που επιτυγχάνεται για αυτόν τον τύπο στοιχείου κυμαίνεται από 11 – 12% για εργαστηριακά στοιχεία και περίπου 8.5% για πλαίσια.



Σχήμα 2.16: Φωτοβολταϊκό στοιχείο βαφής [4]

### 2.7.5 Φωτοβολταϊκά στοιχεία συγκέντρωσης (CPV)

Σε αντίθεση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συγκέντρωσης χρησιμοποιούν φακούς και καμπύλους καθρέφτες για να εστιάσουν την ηλιακή ακτινοβολία σε μικρά, αλλά εξαιρετικά αποδοτικά, φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών επαφών (Multijunction). Επιπλέον, χρησιμοποιούν συχνά συστήματα παρακολούθησης του Ήλιου και ενίοτε, ένα σύστημα ψύξης για να αυξηθεί περαιτέρω η αποτελεσματικότητά τους. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που αποτελούνται από GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs διαθέτουν την υψηλότερη απόδοση, φτάνοντας έως το 46%. Σε μορφή πλαισίων η απόδοση φτάνει το 38.9%.



Σχήμα 2.17: Φωτοβολταϊκό στοιχείο συγκέντρωσης [4]

### 2.7.6 Φωτοβολταϊκά στοιχεία περοβσκίτη

Αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περιλαμβάνουν ένα σύμπλεγμα σε κρυσταλλική δομή περοβσκίτη. Το συνηθέστερο περοβσκιτικό υλικό είναι το τριαλογονίδιο μολύβδου μεθυλαμμωνίου ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ , όπου X το άτομο αλογόνου), με ενεργειακό χάσμα μεταξύ 1.5 και 2.3 eV ανάλογα με το είδος αλογόνου. Οι χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες και οι μέθοδοι κατασκευής είναι χαμηλού κόστους. Ο υψηλός συντελεστής απορρόφησης τους επιτρέπει την απορρόφηση όλου του ορατού φάσματος από υμένια 500 nm. Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών οδηγεί στη δημιουργία ευλύγιστων πλαισίων λεπτού υμενίου χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης. Οι αποδόσεις των στοιχείων αυξήθηκαν από 3.8% το 2009 σε 20.9% στα τέλη του 2017. Με τη δυνατότητα να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη απόδοση και το πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα περοβσκίτη έχουν καταστεί εμπορικά ελκυστικά. Το θεωρητικό όριο της απόδοσής τους υπολογίζεται στο 31%, για ενεργειακό χάσμα 1.55 eV και σε συνθήκες STC.

### 2.7.7 Φωτοβολταϊκά Κβαντισμένης Κουκίδας (Quantum Dot Photovoltaics)

Ακόμη μία κατασκευαστική μέθοδος είναι η δημιουργία κβαντικών κουκίδων (Quantum Dots). Οι κβαντικές κουκίδες είναι ένας ιδιαίτερος τύπος ημιαγωγίμων στοιχείων, που συνήθως αποτελούνται από νανοκρυστάλλους στοιχείων των II-VI, III-V ή IV-VI ομάδων του περιοδικού πίνακα. Αυτοί οι νανοκρυστάλλοι είναι τόσο μικροί σε μέγεθος, πλησιάζουν το μέγεθος της εξιτονικής ακτίνας Bohr του στοιχείου (2-10nm, δηλαδή 10-50 άτομα), που τα ενεργειακά επίπεδα των ηλεκτρονίων χάνουν την συνέχεια τους και γίνονται διακριτά. Έχουν μια μοναδική ικανότητα να εγκλείουν ηλεκτρόνια, αλλά η σημαντικότερη τους όμως δυνατότητα είναι ότι ρυθμίζοντας το μέγεθος της κουκίδας στην ουσία δημιουργείται ένα τεχνητό μόριο με συγκεκριμένο ενεργειακό διάκενο. Όσο μικρότερο το μέγεθος της ατομικής ακτίνας, όσο μικρότερη δηλαδή η κβαντική κουκίδα, τόσο μεγαλύτερη τιμή έχει το ενεργειακό της διάκενο. Ένα ακόμη σημαντικότερο χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι κβαντικές κουκίδες μπορεί να εμφανίσουν το φαινόμενο της πολλαπλής παραγωγής εξιτονίων (Multiple Exciton Generation, MEG), δηλαδή της παραγωγής πολλαπλών ηλεκτρονίων από την πρόσπτωση ενός μόνο φωτονίου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού. Οι κβαντικές κουκίδες είναι πολύ σημαντική τεχνολογία, έχουν πολλές διαφορετικές εφαρμογές (βιολογία, κβαντικοί υπολογιστές, φωτοκατάλυση κ.α.) και λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας κατασκευής τους αναμένεται να χρησιμοποιηθούν εκτενώς στο μέλλον.

## 2.8 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Το ΦΒ πλαίσιο αποτελείται από ΦΒ στοιχεία, τα όποια συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους και πιο συγκεκριμένα σε σειρά, δηλαδή η άνω όψη ενός στοιχείου συνδέεται με την πίσω όψη του στοιχείου που ακολουθεί. Για την προστασία των ηλεκτρικών συνδέσεων από ηλεκτροχημική προσβολή, διάβρωση και υγρασία, η στοιχειοσειρά των ΦΒ στοιχείων εγκιβωτίζεται σε διάφανη ρητίνη διασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο και τη μηχανική σταθερότητα της δομής. Εξωτερικά της ρητίνης τοποθετείται ενισχυμένο γυαλί αυξάνοντας την αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις. Το πλαίσιο περιβάλλεται από ανοδιωμένο αλουμίνιο ανθεκτικό στη διάβρωση. Το θετικό και αρνητικό άκρο της στοιχειοσειράς καταλήγουν στους ακροδέκτες εσωτερικά του κιβωτίου ηλεκτρικών σύνδεσεων. Η μέγιστη τιμή που ρεύματος εξόδου ενός πλαισίου εξαρτάται ανάλογα από την επιφάνεια του και την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, με μία τυπική τιμή από 4 – 7A.

Το ΦΒ πλαίσιο αποτελεί το συστατικό κύτταρο κάθε ΦΒ εγκατάστασης, που ανεξάρτητα του μέγεθους της συντελεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενη την ηλιακή ακτινοβολία. Η διάρκεια ζωής ενός πλαισίου κυμαίνεται από 30 έως 50 έτη και η απόσβεση του κόστους έρχεται τα πρώτα 5 έως 10 έτη.

## 2.9 Χαρακτηριστικά μεγέθη φωτοβολταϊκών πλαισίων

### 2.9.1 Υλικό ΦΒ στοιχείων

Διευκρινίζεται η κρυσταλλική δομή του υλικού κατασκευής, όπως για παράδειγμα μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (mono), πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (poly), λεπτού υμενίου (thin film) ή άμορφο πυρίτιο ( $\alpha$ -Si). Στην περίπτωση στοιχείων λεπτού υμενίου πρέπει να δίνεται έμφαση στο υλικό κατασκευής με σκοπό τη σωστή διαχείριση – ανακύκλωση μετά το τέλος ζωής του υλικού.

### 2.9.2 Ισχύς STC

Η ονομαστική ισχύς ενός πλαισίου ( $W_p$ ) αντιπροσωπεύει την ισχύ που παράγει το πλαίσιο σε συνθήκες STC (Standard Test Conditions), δηλαδή 1000 W/m<sup>2</sup> πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, AM 1,5 και θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων ίση με 25 °C.

### 2.9.3 Οριακές τιμές ρεύματος και τάσης

Αναφέρεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$  που παρέχονται από το πλαίσιο σε συνθήκες STC.

#### 2.9.4 Θερμοκρασιακή εξάρτηση συντελεστών

Εκφράζει την ποσοστιαία μεταβολή της μέγιστης παρεχόμενης ισχύος ( $W_p$ ), της τάσης ανοικτοκύκλωσης ( $V_{oc}$ ) και του ρεύματος βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ) με την αύξηση της θερμοκρασίας (%/°C).

#### 2.9.5 Χαρακτηριστικά παρεχόμενης ισχύος

Αναφέρεται η μέγιστη διακύμανση της παρεχόμενης (%), η ισχύς ανα μοναδιαίο εμβαδόν πλαισίου ( $W/m^2$ ), το ρεύμα και η τάση που αντιστοιχούν στην μέγιστη ηλεκτρική ισχύ και ο συντελεστής απόδοσης του πλαισίου (%).

#### 2.9.6 Λοιπά χαρακτηριστικά

Διαστάσεις (μήκος, ύψος, πλάτος) , βάρος, εγγύηση υλικού, εγγύηση παρεχόμενης ισχύος σε συνάρτηση με το χρόνο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ, ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ

### 3.1 Το φως

**Φως** ονομάζεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία ανιχνεύεται από το ανθρώπινο μάτι και είναι το αίτιο της όρασης. Όμως η αντίληψη αυτή του "ορατού" φωτός αποτελεί τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και καλύπτει ένα εύρος μηκών κύματος που μετατρέπονται από το μάτι στα χρώματα του ορατού φάσματος.

Ανάλογα με τις συνθήκες το φως εκδηλώνει ιδιότητες είτε κύματος είτε δέσμης σωματιδίων, όπως έδειξε το ονομαζόμενο "πείραμα των δύο σχισμών". Αυτό συνεπάγεται τη δυαδική φύση του φωτός, το οποίο συνιστά κύμα ύλης. Το στοιχειώδες σωματίδιο φωτός ονομάζονται φωτόνιο, η ενέργεια του οποίου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E = h \times f$$

όπου

$h$  η σταθερά του Planck ( $6,63 \times 10^{-34} J \times s = 4,14 \times 10^{-15} eV \times s$ )

$f$  η συχνότητα

Το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) και η συχνότητα ( $f$ ) συνδέονται με την παρακάτω σχέση:



$$c = \lambda \times f$$

όπου

$\lambda$  το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

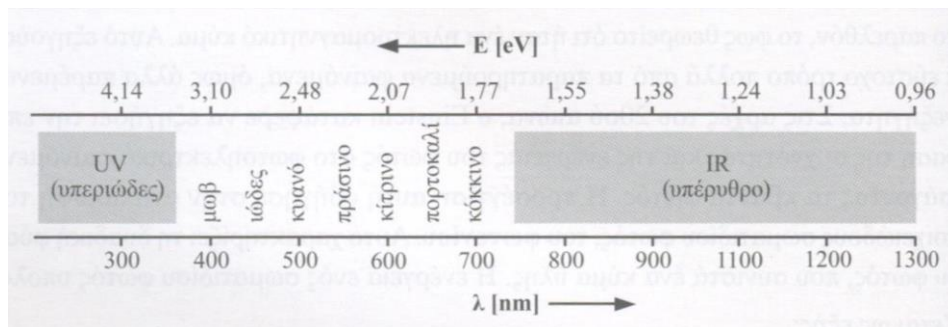
$f$  η συχνότητα

$c$  η ταχύτητα του φωτός

Στη μελέτη των ΦΒ στοιχείων χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, που ονομάζεται **πυκνότητα ισχύος** και μετριέται σε  $W/m^2$ .

### 3.2 Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία καταλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα ενεργειών φωτονίων, ένα μέρος του οποίου αποτελεί το ορατό φάσμα. Η ενέργεια ενός φωτονίου στο ορατό φάσμα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το χρώμα της ακτινοβολίας, σχέση η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα που παρουσιάζει το εύρος συχνοτήτων που αφορούν τα ηλιακά στοιχεία. Όπως είναι εμφανές, η ενέργεια είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος. Το ορατό φάσμα περιλαμβάνει την περιοχή με μήκος κύματος από 400nm έως 700nm, που απεικονίζεται ως μώβ και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα. Αριστερά αυτής της περιοχής βρίσκεται το φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), ενώ δεξιά της υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR). Η ακτινοβολία που δέχεται ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο προέρχεται από το σύνολο των φωτονίων του ηλιακού φάσματος. Με τον όρο φασματική ακτινοβολία περιγράφεται η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας για ένα δεδομένο εύρος ενέργειας.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ενέργειας σε σχέση με το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας [1]

### 3.3 Μέλαν σώμα

Όλα τα σώματα ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται εκπέμπουν “φως”, η ισχύς και η φασματική κατανομή το οποίου εξαρτώνται από το υλικό

και τις επιφανειακές ιδιότητές του. Με τον όρο μέλαν σώμα στη φυσική, περιγράφουμε ένα ιδανικό σώμα το οποίο απορροφά όλο το φως που προσπίπτει πάνω του, δηλαδή ούτε ανακλά ούτε διαχέει το προσπίπτον φως. Επιπρόσθετα, υφίσταται εξάρτηση της ακτινοβολίας από το μήκος κύματος και πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μείωση της τιμής του μήκους κύματος με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η φασματική πυκνότητα ισχύος του μέλανος σώματος για σταθερή θερμοκρασία δίνεται από το νόμο του Planck:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\rho hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

όπου

$I(\lambda, T)$  η πυκνότητα ισχύος σε  $W/m^2$

$T$  η θερμοκρασία του μέλανος σώματος σε  $K$

$h$  η σταθερά του Planck ( $6,626 \times 10^{-34} J \cdot s$ )

$c$  η ταχύτητα του φωτός ( $3 \times 10^8 m/s$ )

$\lambda$  το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (m)

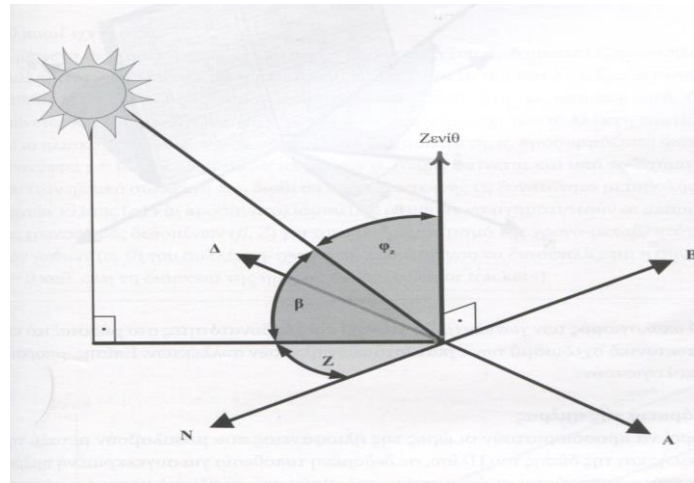
$k$  η σταθερά Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23} J/K$ )

### 3.4 Κίνηση της Γης

Η κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο περιγράφεται από πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα, δεδομένου ότι ο ήλιος είναι σταθερός ως προς την περιστρεφόμενη Γη. Η ελλειπτική τροχιά κίνησης της γης σχηματίζει ένα επίπεδο, το οποίο καλείται ελλειπτικό επίπεδο. Για να ολοκληρωθεί μια πλήρης περιστροφή γύρω από τον ήλιο απαιτούνται 365 ημέρες, που αντιστοιχεί στη διάρκεια ενός έτους, ενώ για μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονα της 24 ώρες (μία ημέρα). Ο πολικός άξονας της Γης σχηματίζει με το ελλειπτικό επίπεδο γωνία  $23,54^\circ$ , η οποία παραμένει σταθερή όλο το έτος. Η απόσταση της από τον ήλιο κυμαίνεται από τη μικρότερη που ονομάζεται περιήλιο έως τη μεγαλύτερη που ονομάζεται αφήλιο. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων της ηλιακής ενέργειας που δέχεται ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, υποθέτουμε ότι η Γη είναι σταθερή και ο ήλιος κινείται γύρω της πάνω στο ελλειπτικό επίπεδο.

### 3.4.1 Η σχετική θέση του ήλιου και ηλιακού συλλέκτη

Η άμεση ακτινοβολία του ήλιου συνδέεται με την επιφάνεια της γης με τις παρακάτω γωνίες: το ηλιακό ύψος ( $\beta$ ), το ηλιακό αζιμούθιο ( $Z$ ) και την ηλιακή ζενιθιακή γωνία ( $\phi_z$ ), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.2:

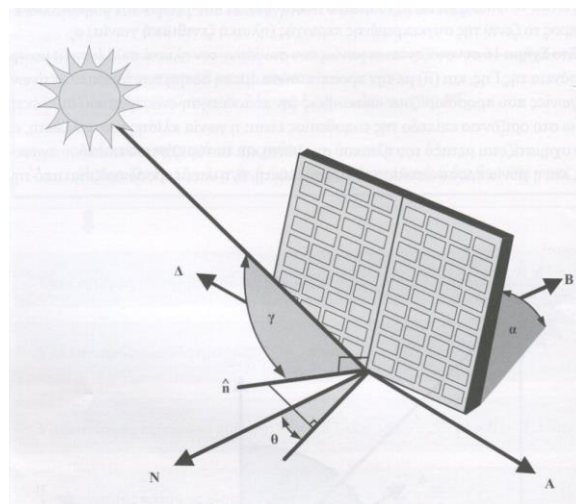


Σχήμα 3.2: Σχετική θέση Ήλιου – Γης [1]

Για την τοποθέτηση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ οι γωνίες που απαιτούν προσδιορισμό είναι:

- α) Η γωνία κλίσης ( $\alpha$ ) του συλλέκτη με το οριζόντιο επίπεδο αναφοράς.
- β) Η γωνία προσανατολισμού ( $\theta$ ) του συλλέκτη.

Η γωνία που σχηματίζει η άμεση ηλιακή δέσμη με την νοητή κάθετο στο συλλέκτη, ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας ( $\gamma$ ). Οι παραπάνω γωνίες απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 3.3:



Σχήμα 3.3: Σχετική θέση Ήλιου – ΦΒ πλαισίου [1]

### 3.4.2 Παράλληλη εγκατάσταση σταθερών ΦΒ συλλεκτών

Στο παρακάτω σχήμα παρίσταται η τοποθέτηση δύο παράλληλων σταθερών ΦΒ συλλεκτών προσανατολισμένων προς τον ήλιο και η συνιστώσα της άμεσης δέσμης από τον ήλιο ( $G_{\text{BEAM}}$ ). Όπως γίνεται κατανοητό, η εμπρόσθια σειρά δεν πρέπει να εμποδίζει την πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην επόμενη σειρά. Για να διασφαλιστεί αυτό, επιλέγουμε την ημέρα του έτος την οποία ο ήλιος έχει το χαμηλότερο ύψος ( $21^{\text{η}}$  Δεκεμβρίου) και προσδιορίζουμε το χρονικό εύρος εντός της ημέρας για το οποίο δεν πρέπει να υπάρχει επισκίαση. Στη συνέχεια υπολογίζουμε την απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των πλαισίων, με τη βοήθεια της γωνίας κλίσης τους ( $\alpha$ ).

### 3.4.3 Ηλιακοί ιχνηλάτες

Με σκοπό τη μέγιστη συλλογή ηλιακής ενέργειας το φωτοβολταϊκό πάνελ πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο ως προς τον ήλιο, δηλαδή η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία να είναι κάθετη στην επιφάνεια του πάνελ. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των ηλιακών ιχνηλατών (solar collector trackers), οι οποίοι λαμβάνοντας ως δεδομένα τα στοιχεία  $\beta$  και  $Z$ , προσδιορίζουν τις βέλτιστες τιμές της γωνίας κλίσης  $\alpha$  και του προσανατολισμού  $\theta$ . Οι απαιτούμενες σύνθηκες είναι  $\theta=Z$  και  $\gamma=0$  για όλη τη διάρκεια της ημέρας.

## 3.5 Δομή του ήλιου

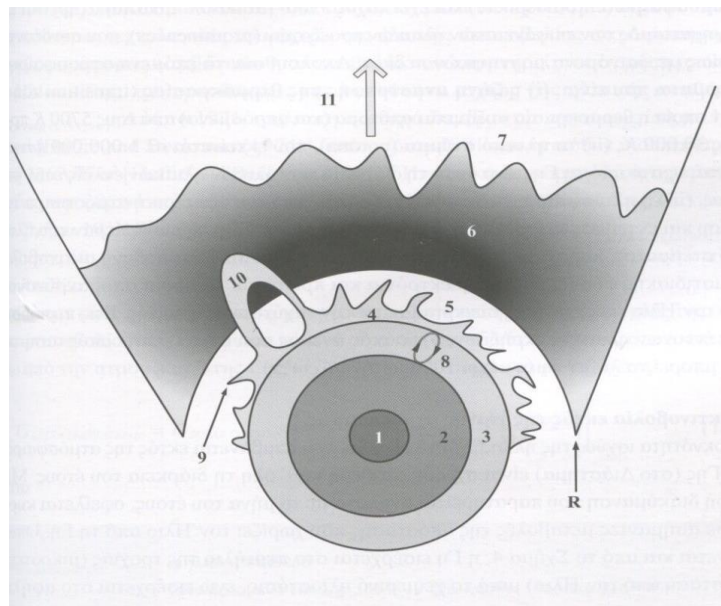
Η θερμότητα και το φως που δέχεται η επιφάνεια της γης προέρχεται από τον ήλιο. Ενδεικτικά μεγέθη είναι η μάζα του, η οποία είναι 300.000 φορές μεγαλύτερη από εκείνη της γης, η ακτίνα του που είναι 100 φορές μεγαλύτερη από της γης (διάμετρος  $1,36 \times 10^6 \text{ km}$ ) και η θερμοκρασία η οποία στον πυρήνα του ηλίου αγγίζει τους  $8 - 40 \times 10^6 \text{ K}$ . Για μια πλήρη περιστροφή του γύρω από τον άξονα χρειάζεται περίπου τέσσερις εβδομάδες.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα διάφορα στρώματα της δομής του ήλιου. Στο εσωτερικό του βρίσκεται ο πυρήνας, ο οποίος καταλαμβάνει το 23% της συνολικής διαμέτρου του και σε αυτόν δημιουργείται το 99% της ενέργειας που εκλύεται. Εκεί λαμβάνει χώρα αλυσιδωτή αντίδραση σύντηξης πρωτονίων, που έχει σα συνέπεια την παραγωγή ατόμων ηλίου ( $\text{He}$ ) και τη δημιουργία τεράστιων ποσών ενέργειας με τη μορφή ακτίνων  $\gamma$ ,  $X$  και νετρίνων.

Το αμέσως επόμενο τμήμα (23%-70% της ακτίνας) είναι γνωστό ως ζώνη ακτινοβολίας, επειδή η ενέργεια από τον πυρήνα μεταφέρεται προς την επιφάνεια διαμέσου ακτινοβολίας. Ακολουθεί η ζώνη συναγωγής (70%-99% της ακτίνας) μέσω της οποίας η ενέργεια μεταφέρεται με μεταγωγικές διεργασίες προς την επιφάνεια του. Η περιοχή από το 23% έως το 99% συνιστά το

εσωτερικό του ήλιου και στην επιφάνεια της η θερμοκρασία είναι περίπου 5700 Κ.

Η προέλευση της ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στην γη προέρχεται από την επιφάνεια του ήλιου, η οποία ονομάζεται φωτόσφαιρα. Στο συνολικό πάχος της το οποίο είναι περίπου 500km, συντελούνται τα φαινόμενα των ηλιακών κηλίδων, των κόκκων και των ηλιακών εκλάμψεων. Τη φωτόσφαιρα ακολουθεί η χρωμόσφαιρα η οποία έχει πάχος 3500-9000km και αποτελεί την κατώτερη ατμόσφαιρα του ήλιου. Κατόπιν, υπάρχουν τα ακόλουθα στρώματα: η ζώνη αναστροφής της θερμοκρασίας, το ηλιακό στέμμα και η ηλιόσφαιρα. Τέλος, στην περιοχή που βρίσκεται μετά το ηλιακό στέμμα παρατηρείται ο ηλιακός άνεμος, ο οποίος αποτελεί ακτινοβολία σωματιδιακής φύσης πρωτονίων και ηλεκτρονίων τα οποία απομακρύνονται απ' τον ήλιο με την ταχύτητα του φωτός.



Σχήμα 3.4: Δομή του Ήλιου [1]

όπου

1. Ο πυρήνας
2. Η ζώνη ακτινοβολίας
3. Η ζώνη συναγωγής
4. Η φωτόσφαιρα
5. Η χρωμόσφαιρα
6. Το ηλιακό στέμμα
7. Η ηλιόσφαιρα
8. Οι κύκλοι συναγωγείς
9. Οι κηλίδες, κόκκοι και εκλάμψεις

10. Οι ηλιακές προεξοχές

11. Ο ηλιακός άνεμος

### 3.5.1 Εκπεμπόμενη πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος που εκπέμπεται από τον ήλιο στο διάστημα και φτάνει εκτός της ατμόσφαιρας έχει σταθερή τιμή κατά τη διάρκεια του έτους, εκτός από μικρές διαφοροποιήσεις που οφείλονται στο περιήλιο και το αφήλιο της τροχιάς της γης. Στις περισσότερες μελέτες που υπεισέρχεται ηλιακή ακτινοβολία, χρησιμοποιείται η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής σταθεράς  $G_{\text{SOLAR CONSTANT}}$  που προκύπτει από τη μέση απόσταση ήλιου-γης και αντιστοιχεί σε τιμή  $1367 \text{ W/m}^2$ . Ο υπολογισμός της πυκνότητας ισχύος για κάθε μέρα του έτους δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$G_{\text{EXTRA TERRESTIAL}} = G_{\text{SOLAR CONSTANT}} \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360^\circ \cdot DoY}{365}\right) \right]$$

όπου

$G_{\text{SOLAR CONSTANT}}$  η ηλιακή σταθερά

$G_{\text{EXTRA TERRESTIAL}}$  η πυκνότητα ισχύος έξω από την ατμόσφαιρα της γης για συγκεκριμένη ημέρα του έτους

$DoY$  η ημέρα του έτους (1,2,...,365)

Η ηλιακή ακτινοβολία που τελικά φτάνει στην ατμόσφαιρα της γης ανήκει κατά 4% στο υπεριώδες φάσμα ( $\lambda < 0,4 \mu\text{m}$ ), 47% στο ορατό φάσμα και 46% στο υπέρυθρο φάσμα ( $\lambda > 0,75 \mu\text{m}$ ).

### 3.5.2 Η ισχύς “ενός Ήλιου”

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές της περιμέτρου της γης (40.000 km) και την ηλιακή σταθερά ( $1367 \text{ W/m}^2$ ), προκύπτει ότι ο πλανήτης μας δέχεται συνολική ισχύ  $174.000 \text{ TW}$ . Από αυτό το ποσό αν αφαιρεθεί η εξασθένηση που προκαλείται λόγω της ατμόσφαιρας, λαμβάνεται η ισχύς της ακτινοβολίας στο επίπεδο της θάλασσας που ισούται με  $1 \text{ kW/m}^2$ , μέγεθος που είναι γνωστό ως ισχύς ενός Ήλιου.

### 3.6 Η αέριος μάζα (A.M)

Η αέριος μάζα εκφράζει την επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, η ηλιακή ακτινοβολία υφίσταται το φαινόμενο της απορρόφησης, της σκέδασης και της διάχυσης από την ανομοιογενή ατμόσφαιρα. Η αέριος μάζα είναι η αναλογία της διαδρομής της ακτίνας του φωτός μέσα στην ατμόσφαιρα προς το συνολικό πάχος της ατμόσφαιρας. Η τιμή της προσδιορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

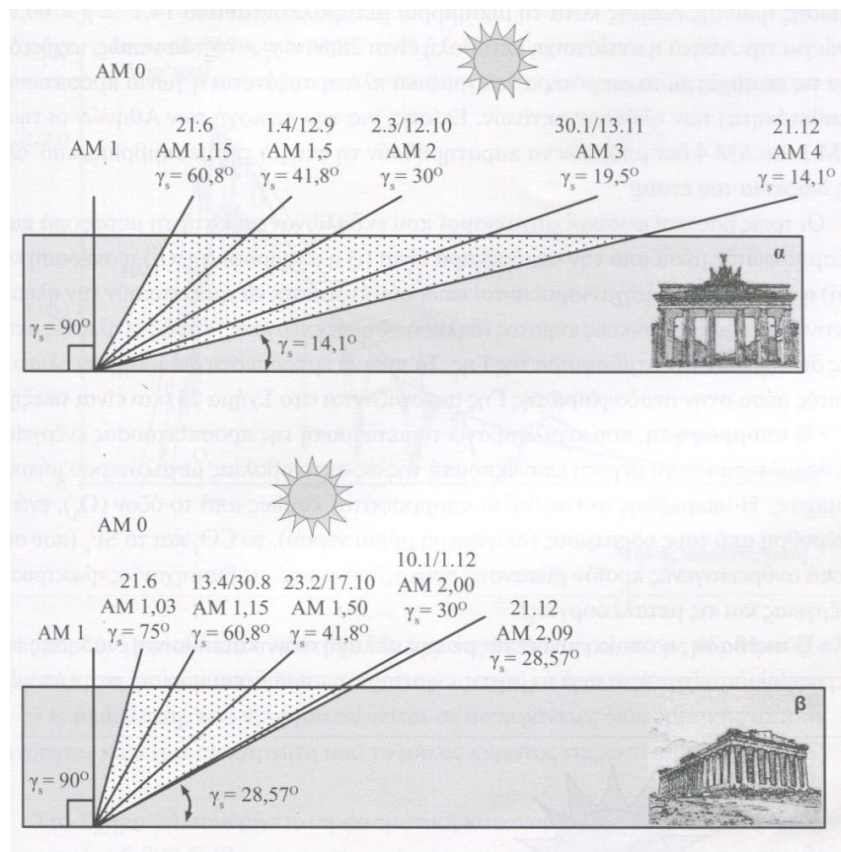
$$AM = \frac{1}{\cos(90^\circ - \gamma_s)}$$

όπου

$\gamma_s$  η γωνία πρόσπτωσης μεταξύ δέσμης και οριζόντιου επιπέδου

Κατά τις δοκιμές των ηλιακών συλλεκτών οι πρότυπες τιμές κατά STC (Standard Test Conditions) που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- 1) AM: 1,5
- 2) Ισχύς  $1\text{kW}/\text{m}^2$
- 3) Θερμοκρασία  $25\text{ }^\circ\text{C}$

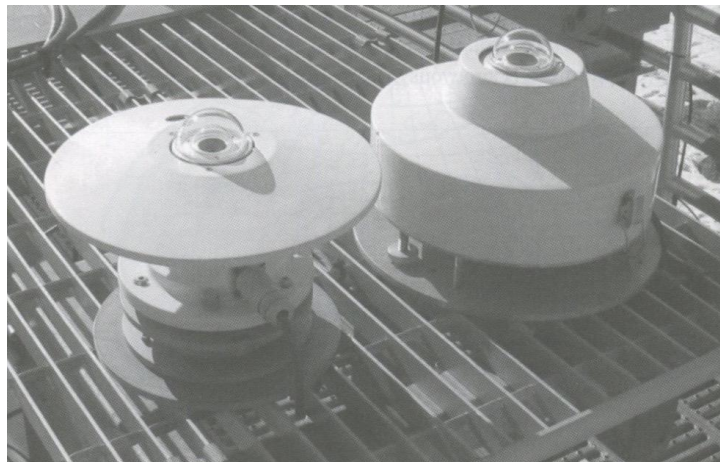


Σχήμα 3.5: Απεικόνιση Αερίου μάζας σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας [1]

## 3.7 Όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας

### 3.7.1 Πυρανόμετρο

Το πυρανόμετρο υπολογίζει την ηλιακή ακτινοβολία δέχοντας την άμεση και τη συνιστώσα διάχυσης της ακτινοβολίας. Διαθέτει αισθητήρες τύπου thermopile που καταγράφουν την ροή θερμότητας. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία αρχικά μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρικό σήμα. Οι αισθητήρες ροής θερμότητας μπορούν να ανιχνεύσουν φάσμα από 350nm έως 2.800nm.



Σχήμα 3.6: Πυρανόμετρο [1]

### 3.7.2 Φωτοδίοδος

Η φωτοδίοδος δέχεται κι αυτή την άμεση και τη συνιστώσα διάχυσης της ακτινοβολίας, με χρόνο απόκρισης της τάξης των μs. Οι συγκεκριμένες διατάξεις έχουν βαθμονομηθεί για συνθήκες STC και καταγράφουν φάσμα από 300nm έως 1.100nm.

### 3.7.3 Ακτινόμετρο

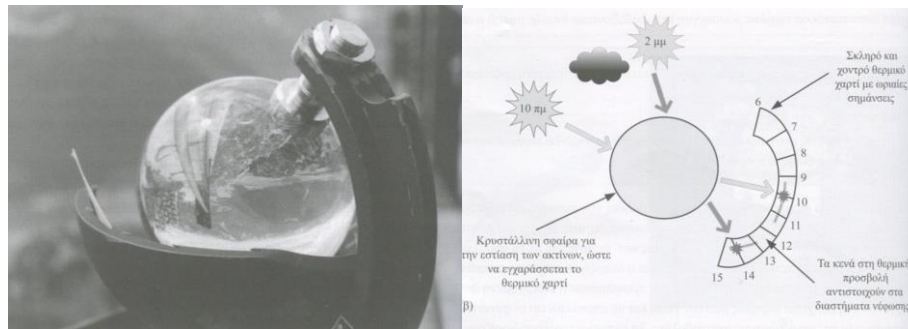
Το ακτινόμετρο αποτελεί μετεωρολογικό όργανο και καταγράφει τη θερμική ισχύ μόνο της άμεσης ηλιακής δέσμης, υπολογίζοντας τον αριθμό των φωτονίων



της δέσμης για δεδομένη χρονική διάρκεια. Ο αισθητήρας του μπορεί να είναι φυσική διάταξη ή αισθητήρας ροής θερμότητας.

### 3.7.4 Καταγραφικό Campbell - Stokes

Αποτελείται από μία διάφανη κρυστάλλινη σφαίρα με διάμετρο περίπου 10cm, μέσω της οποίας εστιάζονται οι ακτίνες του ήλιου σε ένα θερμικό χαρτόνι που βρίσκεται πίσω από την σφαίρα. Το θερμικό χαρτόνι διαθέτει ωριαίες διαβαθμίσεις με δεκαδικές υποδιαίρέσεις στην κάθε ώρα. Καθώς αλλάζει η θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, το θερμικό χαρτί καίγεται δημιουργώντας οπή, η οποία προσδιορίζει τις ώρες ηλιοφάνειας.



Σχήμα 3.7 : Καταγραφικό Campbell – Stokes [1]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΛΙΚΟ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

### 4.1 : Φίλτρο EVA

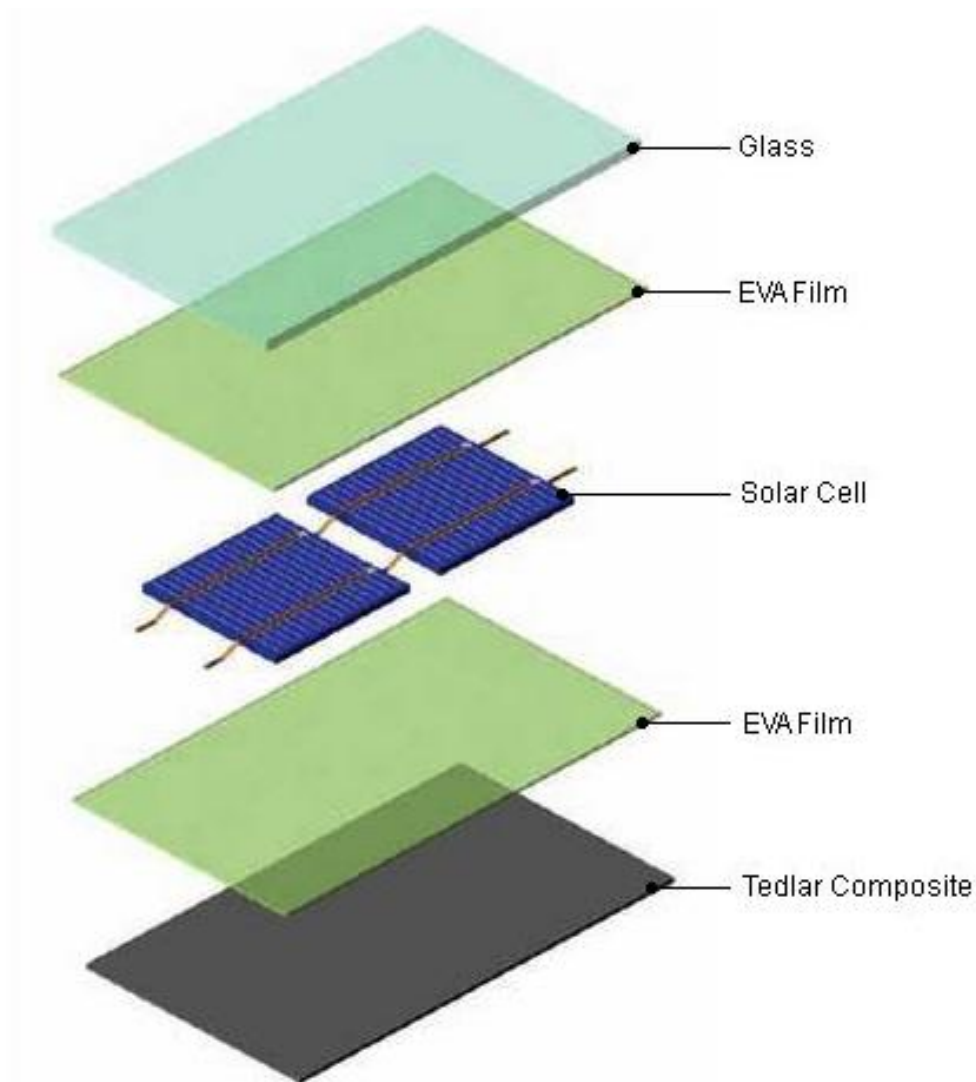
Λαμβάνοντας υπόψη την οικονομική βιωσιμότητα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, η αναμενόμενη διάρκεια λειτουργίας της ανέρχεται στα 25-30 έτη. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολυάριθμες αναφορές οι οποίες καταδεικνύουν την ανάγκη αλλά ταυτόχρονα και τη δυσκολία της αναγνώρισης και μελέτης της μείωσης της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι άμεσα συνδεδεμένη με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές και κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η θερμοκρασία, η υγρασία, η βροχόπτωση και τα χαρακτηριστικά του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας συμπεριλαμβανομένης και της έντασης της UV (UltraViolet) ακτινοβολίας. Η μείωση της απόδοσης τα πρώτα 10-12 χρόνια πρέπει να είναι λιγότερη από 10% της ονομαστικής τιμής, ενώ για την περίοδο 20-25 χρόνια πρέπει να είναι 20% το μέγιστο.

Οι μη ελεγχόμενες συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εγκατάστασης των ΦΒ συστημάτων, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία και αποδοτικότητα της ενεργειακής μετατροπής. Έχοντας αυτό ως δεδομένο, είναι απαραίτητο να μελετηθούν οι παράμετροι, η σχέση τους με τους συλλέκτες και πώς αυτοί επηρεάζουν την συμπεριφορά τους σε εξωτερικές συνθήκες. Ανάμεσα στα στοιχεία που απαρτίζουν το φωτοβολταϊκό πάνελ ανήκει και το προστατευτικό υμένιο που καλύπτει εκατέρωθεν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του και ονομάζεται EVA (Ethylene Vinyl Acetate) . Το EVA αποτελεί ένα συμπολυμερές αιθυλενίου και οξικού βινυλίου και έχει πλεονεκτήματα όπως υψηλή διαπερατότητα, αντίσταση στην UV ακτινοβολία, καλή προσκόλληση στο γυαλί και αντίστοιχη αντίσταση στον καιρό. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την μορφή με την οποία βρίσκεται στο εμπόριο:



Σχήμα 4.1: Άποψη φίλτρου EVA σε ακατέργαστη μορφή [5]

Μια τυπική διάταξη των στρωμάτων από τα οποία αποτελείται ένα φωτοβολταϊκό πάνελ φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχήμα 4.2: Τυπική δομή ΦΒ πάνελ [5]

Η ενθυλάκωση είναι ο φυσικός μηχανισμός προστασίας των φωτοβολταϊκών κελιών ενάντια στις περιβαλλοντικές συνθήκες αλλά και στις μηχανικές καταπονήσεις όπως η στρέψη αλλά και αυτές που οφείλονται στον καιρό όπως για παράδειγμα το χαλάζι. Για περισσότερο από τρεις δεκαετίες, το υλικό που χρησιμοποιείται για την ενθυλάκωση είναι το EVA και σχεδόν το 80% των φωτοβολταϊκών πάνελ το χρησιμοποιούν.

#### 4.2 Ιδιότητες φίλτρου EVA

Οι πιο σημαντικές ιδιότητες είναι χημικές, μηχανικές, οπτικές και ηλεκτρικές. Επιγραμματικά είναι οι κάτωθι:

- Παρέχει δομική στήριξη και διατήρηση σταθερής θέσης του ΦΒ στοιχείου μέσα στο πάνελ κατά τις διαδικασίες της παραγωγής, της αποθήκευσης, της τοποθέτησης και της λειτουργίας.
- Επιτυγχάνει και διατηρεί οπτική σύζευξη μεταξύ του γυαλιού και του ΦΒ στοιχείου, διατηρώντας παράλληλα τη διαπερατότητα της ηλιάκης ακτινοβολίας σε ποσοστό τουλάχιστον 90% για 20-30 χρόνια λειτουργίας.
- Παρέχει φυσική απομόνωση των ΦΒ στοιχείων και προστατεύει το συνολικό κύκλωμα στο περιβάλλον λειτουργίας του.
- Παρέχει ηλεκτρική μόνωση μεταξύ των εξαρτημάτων, όπου αυτό καθίσταται απαραίτητο.

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά ενός φίλτρου EVA:

Glass transition temperature	< -40 °C
Total hemispherical emissivity	> 91% of the incident light
Hydrolysis	No hydrolysis at 80 °C and 100% RH
Water Absorption	< 0.5 wt% to 100% RH
Resistance to thermal absorption	Stable above 80 °C
Liquidity mechanics	No fluidity at 50 °C
Shear modulus	< 20.7 MPa (3000 psi) at 25 °C
Manufacturing Temperature	≤ 171 °C
Pressure lamination manufacturing	≤ 1 atm
Inertia chemical	No reaction at 90 °C
Degradation by UV absorption	No wavelength > 350 nm
Clouding	None at 80 °C and 100% RH
Odor, toxicity	None
Gel content (after curing)	> 70% (higher is better)

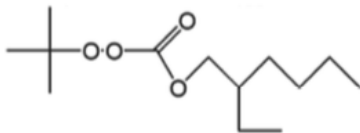
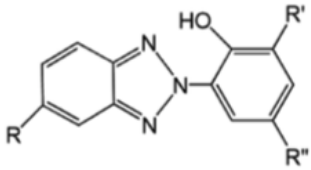
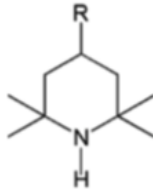
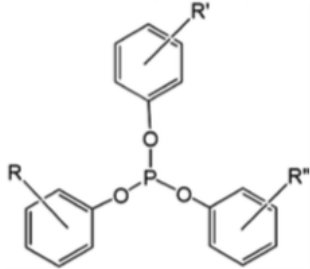
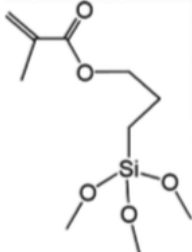
Σχήμα 4.3: Απαιτούμενα χαρακτηριστικά φίλτρου EVA [7]

Το EVA συμπεριφέρεται σαν ελαστομερές και θερμοελαστικό ανάλογα με την ποσότητα οξικού βινυλίου που περιέχει. Για χρήση σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές περιέχει από 28 -33 wt% οξικό βινύλιο και άλλα πρόσθετα που βοηθούν στην καθυστέρηση της γήρανσης του υλικού. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται η συνήθης σύσταση του EVA για περιεκτικότητα 67% αιθυλενίου και 33% οξικού βινυλίου:

Component	% (w/w)
EVA copolymer	97,943
UV absorber	0294
UV stabilizer	0098
Anti-oxidant	0196
Curing agent	1469

Σχήμα 4.4: Συνήθης σύσταση φίλτρου EVA [7]

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα πρόσθετα που συμπληρώνουν τη σύνθεση του EVA με την αναλυτική τους δομή, την περιεκτικότητά τους σε % w/w και τις ιδιότητές τους:

Components	Structures of Components	% (w/w) for EVA (96–98%)	Property
Peroxide		1 to 2	Curing Agent Used for cross-linking at elevated temperatures during lamination
Benzotriazole		0.2 to 0.35	UV Absorber
Hinder Amine Light Stabilizer (HALS)		0.1 to 0.2	UV stabilizer (primary antioxidant) Decomposes Peroxide Radicals
Phenolic Phosphonite		0 to 0.2	Anti-oxidant (secondary antioxidant) Peroxide Decomposer/ Radical Scavenger
Trialkoxy Silane		0.2 to 1	Used to promote adhesion between EVA and inorganic surfaces

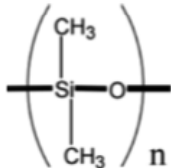
#### Σχήμα 4.5 : Συστατικά φίλτρου EVA [7]

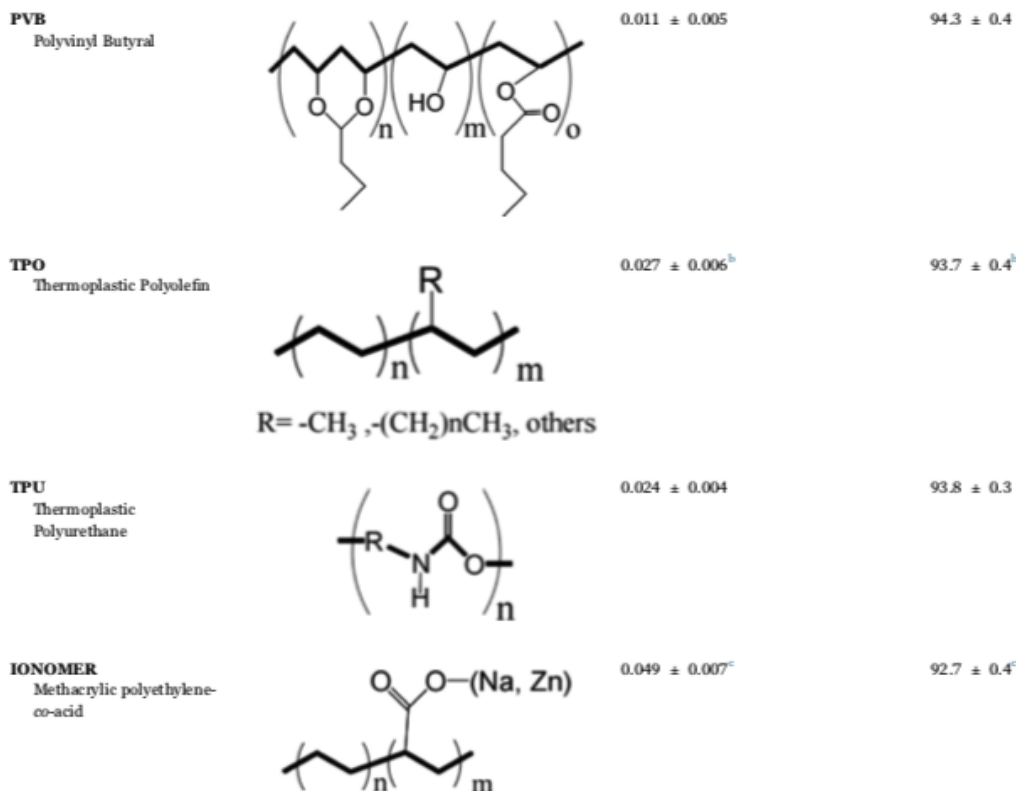
Το EVA παρέχεται σε χαμηλό κόστος, με χαμηλό συντελεστή απορρόφησης της υγρασίας και έχει πολλά πλεονεκτήματα για τη χρήση του σαν υλικό ενθυλάκωσης φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθώς έχει ιδιότητες όπως μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση, μεγάλη αντίσταση όγκου ( $0,2-1,4 \times 10^{16} \Omega/\text{cm}$ ), μεγάλη σκληρότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες, αντίσταση στην υπεριώδη ακτινοβολία, χαμηλή απορρόφηση υγρασίας, υψηλή οπτική διαπερατότητα (>91%), μεγάλη δυνατότητα συγκόλλησης με το γυαλί, υψηλή διαφάνεια με ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του γυαλιού σε μήκη κύματος από 400nm έως 1100nm.

Για την ενθυλάκωση των ΦΒ στοιχείων έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς και άλλα υλικά όπως:

- Polyethylene-co-acid (Ionomer)
- Polyvinyl butyral (PVB)
- Thermoplastic polyurethane (TPU)
- Thermoplastic polyolefin (TPO)
- Polydimethylsiloxane (PDMS)
- Other polysiloxanes (silicone)

Οι ιδιότητές τους απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:

Encapsulant	Structures of PV encapsulant	AM 1.5 Solar Photon and x-Si QE Weighted Absorptivity (1/mm)	Transmission to Cells through 3.18 mm glass and 0.45 mm Encapsulant (%)
<b>PDMS</b> Polydimethyl Siloxane		$0.004 \pm 0.003^*$	$94.7 \pm 0.3^*$



Σχήμα 4.6: Χαρακτηριστικά διάφορων υλικών επικάλυψης ΦΒ στοιχείων [7]

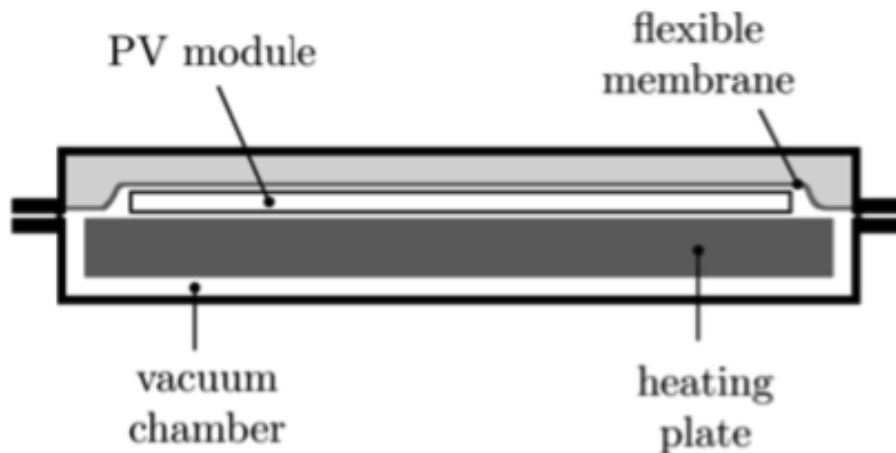
Την δεκαετία του 1960 και 1970, όταν ξεκίνησαν να αναπτύσσονται τα πρώτα φωτοβολταϊκά πάνελ, το υλικό επικάλυψης ήταν το PDMS, λόγω της σταθερότητας του ενάντια στην υπεριώδη ακτινοβολία. Με την πάροδο του χρόνου το EVA κατέληξε να είναι κυρίαρχο υλικό επικάλυψης εξαιτίας του καλύτερου συνδυασμού ιδιοτήτων που διέθεται μέσα στα οποία είναι και το χαμηλό το κόστος σε σχέση του με τα υπόλοιπα. Ωστόσο, το κυριότερο μειονέκτημα είναι η ευπάθεια του στην υπεριώδη ακτινοβολία.

### 4.3 Διαδικασία παραγωγής ΦΒ πάνελ

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία της κατασκευής είναι η διασύνδεση μεταξύ των ΦΒ στοιχείων, με σκοπό τη δημιουργία μιας συστοιχίας κελιών ηλεκτρικά συνδεδεμένων. Πιο συγκεκριμένα, κάθε έμπροσθεν τμήμα του στοιχείου ενώνεται με τις όπισθεν επαφές του επόμενου. Η επιφάνεια που δέχεται πρώτη την ηλιακή ακτινοβολία είναι το κατεργασμένο γυαλί με μικρή περιεκτικότητα σε σίδηρο και πάχος από 3,2mm έως 4mm, που αποτελεί το πρώτο στρώμα της διάταξης. Το γυαλί παρέχει υψηλή οπτική διαπερατότητα, ικανοποιητική μηχανική αντοχή σε καταπονήσεις και ηλεκτρική μόνωση. Το μειονέκτημα του είναι ότι επιτρέπει τη διέλευση της υπεριώδους ακτινοβολίας, η οποία είναι ανεπιθύμητη καθώς προκαλεί γήρανση στο υλικό ενθυλάκωσης που βρίσκεται

εσωτερικά του. Ένας μεγάλος αριθμός κατασκευαστών πραγματοποιεί ειδική κατεργασία της επιφάνειας του γυαλιού, προκειμένου να βελτιωθούν οι οπτικές του ιδιότητες. Το τελευταίο στρώμα της όπισθεν όψης αποτελείται από πολυεπίπεδο πολυμερές υλικό και έχει την ιδιότητα να προστατεύει τα κελιά από επιβλαβείς περιβαλλοντικές επιδράσεις και να παρέχει ηλεκτρική μόνωση και δομική στήριξη. Η διαπερατότητα της υγρασίας είναι ένα θέμα που σχετίζεται με την υψηλή ευαισθησία στη διάβρωση και τη σταθερότητα του υλικού ενθυλάκωσης για διάφορες θερμοκρασίες.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής τα στρώματα του γυαλιού, του υλικού ενθυλάκωσης, της συστοιχίας των ΦΒ στοιχείων, του υλικού ενθυλάκωσης και της πίσω όψης θερμαίνονται σε θερμοκρασία 150°C υπό συνθήκες κενού. Με αυτό τον τρόπο τελικά ενώνονται μεταξύ τους καθώς το EVA με τη διαδικασία της θέρμανσης μετατρέπεται σε ελαστομερές και με τη βοήθεια του κενού αποτρέπεται η δημιουργία φυσαλίδων αέρα. Ανάλογα με το είδος του EVA απαιτούνται 7 έως 15 λεπτά στους 150°C για την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Στη συνέχεια η διάταξη επανέρχεται σε θερμοκρασία δωματίου αυξάνοντας την μηχανική αντοχή της. Η διάταξη που χρησιμοποιείται για την εν λόγω διαδικασία απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.7: Δομή θαλάμου κατασκευής ΦΒ πάνελ [6]



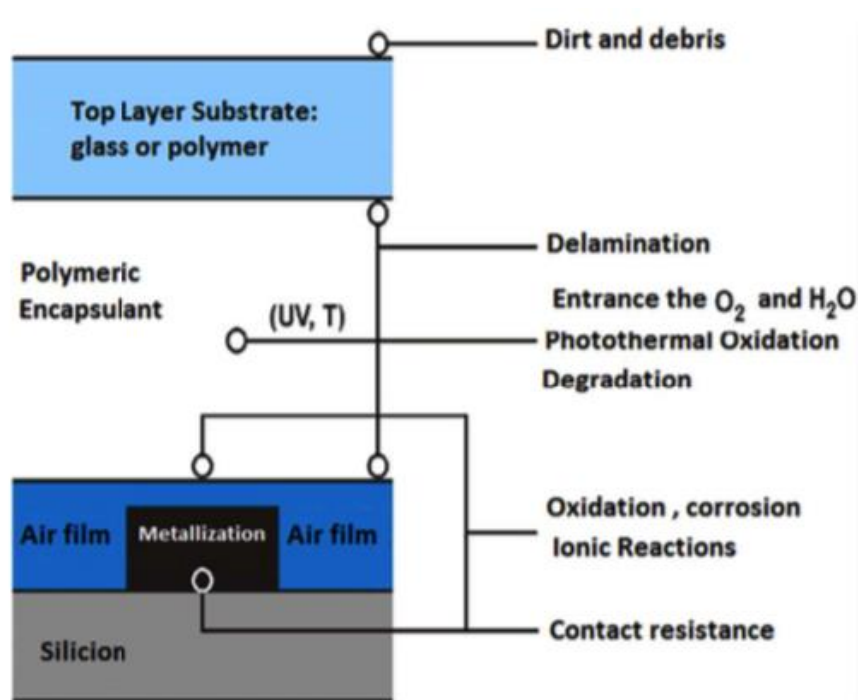
#### 4.4 Μηχανισμοί και συνέπειες γήρανσης του EVA

Η αξιοπιστία και η αντοχή των ΦΒ πάνελ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό επικάλυψης των ΦΒ στοιχείων, δηλαδή το EVA. Η γήρανση των πάνελ προκαλείται από παράγοντες όπως οι συνθήκες του καιρού, η συσσώρευση ρύπων και σκόνης στην επιφάνεια του γυαλιού, οι φωτοθερμικοί μηχανισμοί, η οξείδωση και γήρανση του EVA, η αλληλεπίδραση ιόντων και η αντίδραση του πολυμερούς που προκαλούν αποκόλληση. Πολλά από αυτά τα προβλήματα μπορούν να προκύψουν λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ιόντων που δημιουργήθηκαν από την παγίδευση ατμών και αερίων αλλά και της μη σωστής χρήσης των υλικών κατά τη διαδικασία της παραγωγής του πάνελ. Οι μηχανισμοί που συνδέονται με την αστοχία του EVA είναι οι παρακάτω τρεις:

- Η διάβρωση
- Ο αποχρωματισμός
- Η αποκόλληση

Κατά την παραγωγή του EVA κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη είναι η περιεκτικότητα γέλης στο σκληρυμένο EVA, η δυνατότητα προσκόλληση στο γυαλί και η συστολή του. Κάθε τύπος EVA μπορεί να χαρακτηριστεί, ανάλογα με τον τύπο της σκλήρυνσης που χρησιμοποιείται, σε τρία είδη : τυπική σκλήρυνση (standard cure), γρήγορη σκλήρυνση (fast cure) και πολύ γρήγορη σκλήρυνση (ultra fast cure). Για λόγους μείωσης του χρόνου παραγωγής η περισσότερο χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι της πολύ γρήγορης σκλήρυνσης (UFC), που μπορεί να ελαττώσει κατά 40% τη διαδικασία της στρωματοποίησης. Η διαδικασία της σκλήρυνσης (cure) αλλάζει τις φυσικές ιδιότητες μέσω της χημικής αντίδρασης του πολυμερισμού με την παρουσία θερμότητας ή και καταλύτη.

Ο βαθμός των σταυροδεσμών (cross-linking) εκφράζεται με την ποσοστιαία παρουσία της γέλης (gel content). Το επιθυμητό περιεχόμενο ποσοστό γέλης είναι τουλάχιστον 70%, ώστε να μπορεί να παρέχει την δομική ακεραιότητα που απαιτείται. Πρακτικά, στα παραγόμενα πάνελ το ποσοστό κυμαίνεται από 65% έως 90%. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα κύρια φαινόμενα γήρανσης και οι αιτίες που τα προκαλούν:



Σχήμα 4.8: Απεικόνιση φαινομένων γήρανσης στη δομή του ΦΒ πάνελ [7]

#### 4.4.1: Περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες

Οι περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες στις οποίες εκτίθενται οι ηλιακοί συλλέκτες επηρεάζουν την γήρανση. Η απόδοσή τους γενικά εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία (ένταση, φάσμα, υπεριώδη ακτινοβολία), την θερμοκρασία, την υγρασία, τις μηχανικές καταπονήσεις και τις ηλεκτρικές συνθήκες λειτουργίας. Υπόψη πρέπει να ληφθούν και άλλοι κλιματολογικοί παράγοντες όπως το χιόνι, το χαλάζι, ο άνεμος, η σκόνη, το αλάτι και οι ρύποι (NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Cl<sub>2</sub>), οι οποίοι είναι δυνητικά διαβρωτικοί.

Η θερμοκρασία είναι εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας στη διαδικασία της γήρανσης, καθώς είναι υπεύθυνη για τις περισσότερες χημικές αντιδράσεις. Η υγρασία μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση των πολυμερών, αφού με τη διαδικασία της υδρόλυσης γίνεται η χημική διάσπαση με τη βοήθεια του μορίου του νερού. Τα πολυμερή υλικά αντιδρούν με το περιβάλλον απορροφώντας υδατμούς και αέρια. Οι υδατμοί προκαλούν πολύ εύκολα διάβρωση στα μεταλλικά μέρη. Οι αυξανόμενες θερμοκρασίες μπορούν να αλλάξουν δραστικά τις μηχανικές, ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες των πολυμερών. Μεγάλες αυξήσεις στη θερμοκρασία σε σύντομο χρονικό διάστημα προκαλούν θερμο – μηχανικές καταπονήσεις και εισάγουν ατέλειες που αλλάζουν σημαντικά τις ιδιότητες των πολυμερών.

#### 4.4.2: Φωτογήρανση

Η φωτογήρανση είναι η γήρανση ενός πολυμερούς με την επίδραση του φωτός, το οποίο αλλάζει την πρωταρχική δομή προκαλώντας σπάσιμο χημικών δεσμών και άλλες χημικές μεταβολές. Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι η βασική πηγή της γήρανσης των πολυμερών, αφού το φάσμα της ακτινοβολίας από 200nm έως 400nm έχει αρκετή ενέργεια για ένα σπάσει χημικούς δεσμούς στην κύρια αλυσίδα του πολυμερούς και να ξεκινήσει ανεπιθύμητες αντιδράσεις. Το φάσμα των ακτινοβολιών που δίνει έναυσμα στις αντιδράσεις χωρίζεται ως εξής: UVA (315-400nm), UVB (280-315nm), UVC (100-280nm). Το UVB είναι το πιο επιθετικό για την πρόκληση αλλοίωσης των πολυμερών.

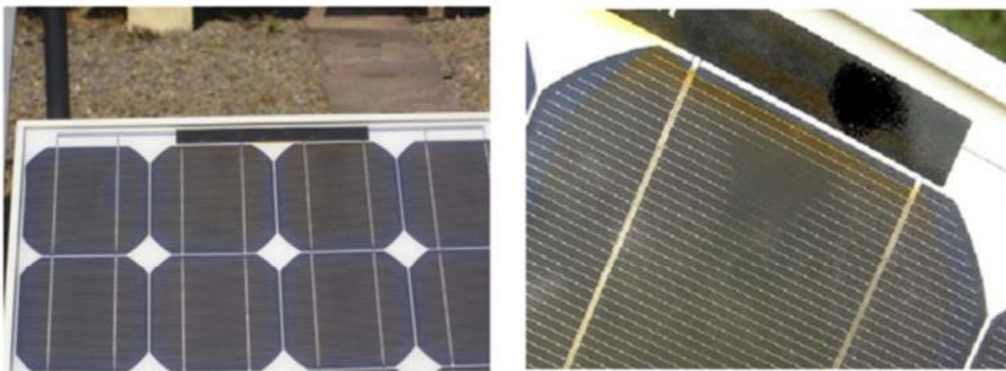
Η φωτογήρανση με την παρουσία οξυγόνου είναι γνωστή ως φωτο-οξειδωση, η οποία μετά την απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας δημιουργεί ελεύθερες ρίζες που οδηγεί σε μια διαδικασία αυτο-οξειδωσης. Η ζημιά που προκαλείται στο EVA στη διάρκεια ζωής του θα αποτελεί συνδυασμό θερμοκρασίας άνω των 50°C, απορρόφησης υγρασίας, οξυγόνου και περισσότερο από όλα υπεριώδους ακτινοβολίας. Σημαντική επιπτώση της UV ακτινοβολίας είναι ο αποχρωματισμός του EVA, που οδηγεί στο κιτρίνισμα του και μείωση της απόδοσής του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάβρωσης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 4.9: Χαρακτηριστική εικόνα διάβρωσης [7]

#### 4.4.3: Αποχρωματισμός

Ο αποχρωματισμός αποτελεί ένα βασικό μηχανισμό γήρανσης, ο οποίος διακρίνεται με την αλλαγή της απόχρωσης σε κίτρινο ή καφέ επηρεάζοντας σημαντικά την απόδοση και την αξιοπιστία του EVA. Δεν υπάρχει συγκεκριμένη σχέση μεταξύ του επιπέδου αποχρωματισμού και της ηλεκτρικής απόδοσης του πλαισίου. Ωστόσο, ο αποχρωματισμός οδηγεί στην μείωση της διαπερατότητας και την μείωση του φωτορρεύματος, αφού μειώνει το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά απορροφάται από το ΦΒ στοιχείο. Οι κύριες αιτίες του φαινομένου είναι η υπεριώδης ακτινοβολία και η διείσδυση νερού και συνδυασμό με θερμοκρασίες άνω των 50°C. Στην παρακάτω εικόνα αποδίδεται το φαινόμενο του αποχρωματισμού.



Σχήμα 4.10: Αποχρωματισμός ΦΒ πάνελ [7]

#### 4.4.4: Αποκόλληση

Η γήρανση του EVA λόγω των συνθηκών καιρού μπορεί να προκαλέσει απώλεια της συγκόλλησης ή όπως αλλιώς ονομάζεται αποκόλληση που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης. Το φαινόμενο αυτό εντοπίζεται κυρίως στις ακμές και τις γωνίες του πλαισίου, προκαλώντας προβλήματα όπως αύξηση της αντανάκλασης, μεγαλύτερη διείσδυση νερού, μείωση της απόδοσης και ηλεκτρικού κινδύνου για το πλαίσιο και την εγκατάσταση γενικότερα. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται το φαινόμενο της αποκόλλησης.

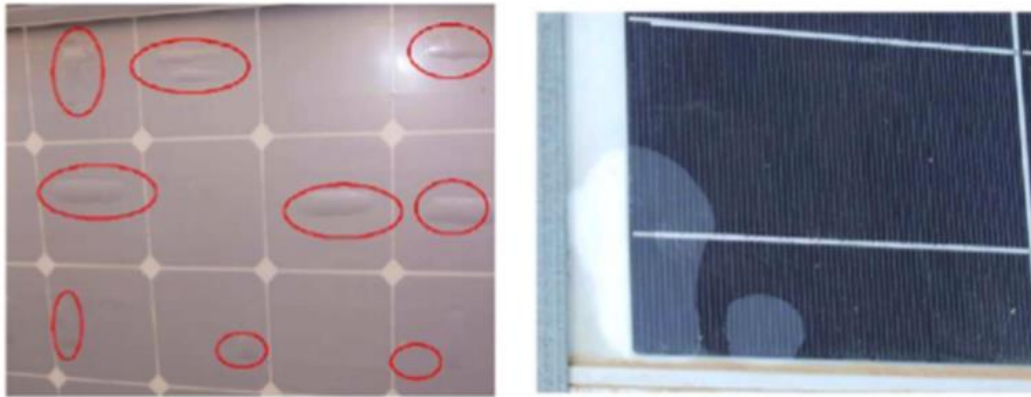


Σχήμα 4.11 : Αποκόλληση τμήματος υλικού επικάλυψης [7]

Η αποκόλληση μπορεί να προκληθεί από το συνδυασμό υγρασίας και θερμότητας, προκαλώντας χημική και φυσική γήρανση λόγω της υγρασίας και της αλατότητας. Η διείσδυση της υγρασίας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης σειράς  $R_s$  και συνεπώς τη μείωση της αποδιδόμενης ισχύος. Η ανίχνευση του αποχρωματισμού πραγματοποιείται με οπτική επιθεώρηση.

#### 4.4.5 : Σχηματισμός φυσαλίδων

Ο σχηματισμός φυσαλίδων αποτελεί μια διαδικασία παρόμοια με αυτή της αποκόλλησης, αλλά σε αυτή την περίπτωση περιλαμβάνει απώλεια της συγκόλλησης του EVA σε μικρές περιοχές. Η εμφάνιση των φυσαλίδων είναι αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων που απελευθερώνουν αέρια και συνήθως εμφανίζεται στην πίσω όψη του πλαισίου, αλλά μπορεί να εμφανιστεί και στην εμπροσθεν όψη μεταξύ του γυαλιού και του ΦΒ στοιχείου. Οι φυσαλίδες συχνά εμφανίζονται στο κέντρο των κελιών, λόγω της διαφοράς στη συγκόλληση εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών στο κελί. Επίσης, αναστέλλουν τη διάχυση της θερμότητας στα κελιά αυξάνοντας κατά πολύ την θερμοκρασία, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τη διάρκεια ζωής και την απόδοση του ΦΒ στοιχείου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 4.12: Δημιουργία φυσαλίδων εσωτερικά του ΦΒ πάνελ [7]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

### 5.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγόμενη ισχύ. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι αναμενόμενη με την έκθεση των συλλεκτών στην ηλιακή ακτινοβολία. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί η βαθμονόμηση της παραγόμενης ισχύος ως προς την μέγιστη παρεχόμενη ισχύ. Έστω ένα πλαίσιο που έχει δοκιμαστεί σε πρότυπες συνθήκες (Standard Test Conditions) και πιστοποιείται ότι αποδίδει μέγιστη ισχύ 100W. Αυτό σημαίνει ότι για συνθήκες STC, δηλαδή θερμοκρασία πλαισίου ίση με 25°C, το πλαίσιο θα αποδώσει 100W, ενώ για συνθήκες PTC (PV USA Test Conditions) που λαμβάνεται υπόψη θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 20°C, το πλαίσιο προφανώς δεν θα αποδώσει 100W. Η βαθμονόμηση κατά PTC έχει σαν αποτέλεσμα την παροχή μικρότερης μέγιστης ισχύος σε ποσοστά της τάξης του 85%-92% της ονομαστικής μέγιστης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα για τα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά στοιχεία η μείωση κυμαίνεται από 10%-13%, ενώ για τα στοιχεία άμορφου πυριτίου το ποσοστό είναι 8%. Συνυπολογίζοντας τα δεδομένα της ηλιοφάνειας που επικρατούν στη χώρα μας τα στοιχεία θα παρουσιάζουν μειωμένη ισχύ κατά 12%, που σημαίνει ότι για την περίπτωση ενός πλαισίου μέγιστης ισχύος 100W<sub>p</sub> η αποδιδόμενη σχέση θα είναι 88W.

Όπως είναι προφανές, η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου διαφοροποιείται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η απορρόφηση των

φωτονίων που έχουν ενέργεια είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού που αποτελείται το ΦΒ στοιχείο, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασιακή διάφορα  $\Delta T$  εξαρτάται από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και από το υλικό κατασκευής του πάνελ. Η σχέση μέσω της οποίας υπολογίζουμε την θερμοκρασιακή διαφορά είναι η παρακάτω:

$$\Delta T = k \cdot H$$

και για τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία:

$$\Delta T = 0,34 \cdot H - 4$$

όπου

$\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ περιβάλλοντος και ΦΒ στοιχείου

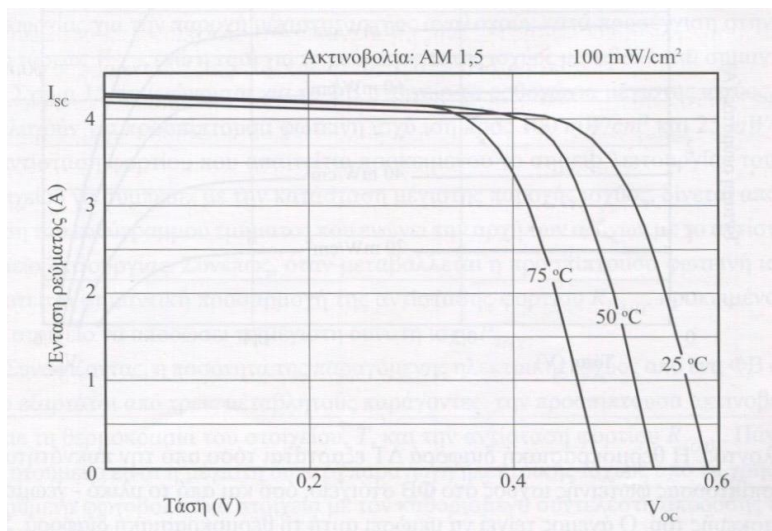
$H$  η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας σε  $\text{mW}/\text{cm}^2$

$k$  σταθερός όρος μεταξύ  $0,2-0,4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mW}\cdot\text{cm}^2$

$4$  σταθερός όρος σε  $^\circ\text{C}$

Εάν υποθέσουμε τη χρήση ενός μονοκρυσταλλικού στοιχείου με θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25^\circ\text{C}$  και πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας  $90 \text{ mW}/\text{cm}^2$ , θα λάβουμε τη μέγιστη θερμοκρασία του στοιχείου στους  $55,6^\circ\text{C}$ . Η θερμοκρασία αυτή συνήθως μειώνεται από τον άνεμο αλλά και σχεδιαστικές παραμέτρους εγκατάστασης όπως είναι η ψύξη των στοιχείων με τη ροή ψυκτικού μέσου, σύστημα το οποίο ταυτόχρονα μπορεί να συμμετέχει και σε σύστημα συμπαραγωγής θερμού ύδατος.

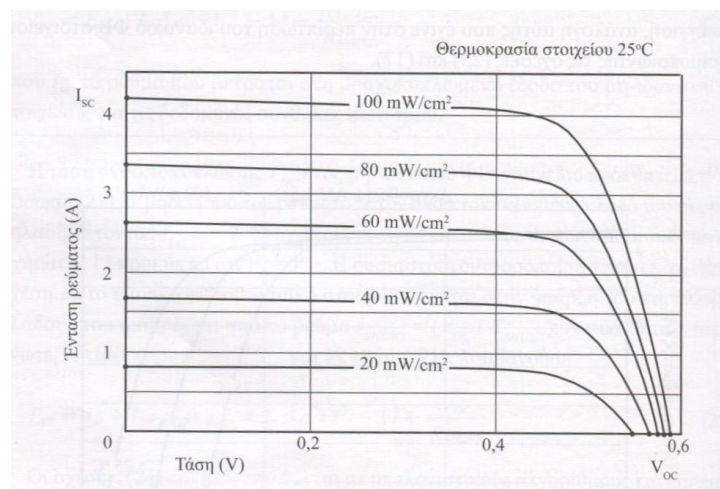
Η θερμοκρασιακή εξάρτηση της απόδοσης του ΦΒ στοιχείου πυριτίου παρατηρείται και στη χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης ( $I-V$ ), όπως στο παρακάτω σχήμα. Όπως προκύπτει, για αύξηση της θερμοκρασίας του στοιχείου από τους  $50^\circ\text{C}$  στους  $75^\circ\text{C}$ , η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$  μειώνεται από τα  $5,8\text{V}$  στα  $4,7\text{V}$ . Για τις συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας των στοιχείων, συνεπάγεται μείωση της  $V_{oc}$  κατά  $0,25\%$  έως  $0,45\%$  για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα, για το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  προκύπτει αύξηση κατά  $0,01\%$  έως  $0,12\%$  για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Από αυτά τα δύο στοιχεία προκύπτει μείωση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος  $P_{max}$  κατά  $0,3\%$  έως  $0,5\%$  ανα βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας για σταθερή τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας. Ανάμεσα στα στοιχεία που αναγράφονται σε κάθε ΦΒ πάνελ είναι και η θερμοκρασία λειτουργίας κατά την οποία αποδίδεται η μέγιστη ισχύς.



Σχήμα 5.1: Εξάρτηση χαρακτηριστικής I-V από τη θερμοκρασία

## 5.2 Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας

Μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος - τάσης παρατηρείται η επιρροή που ασκεί η πυκνότητα της ηλιακής φωτοβολίας. Με τη χρήση ενός στοιχείου πυριτίου σε θερμοκρασία 25°C αυξάνουμε την πυκνότητα ισχύος από  $H=20\text{mW/cm}^2$  έως  $H=100\text{mW/cm}^2$ . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ) πραγματοποιεί σχεδόν γραμμική μεταβολή, αφού αυξάνεται κατά πέντε φορές περίπου. Η τάση ανοικτοκύκλωσης δεν σημειώνει σημαντική αύξηση, καθώς από 5,45V φτάνει στην τιμή 5,85V. Για τη λήψη της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος από ένα φορτίο  $R_{load}$ , απαιτείται προσαρμογή της αντίστασης του φορτίου με εκείνη που προκύπτει από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει την αρχή των αξόνων με το μέγιστο σημείο λειτουργίας.



Σχήμα 5.2: Εξάρτηση χαρακτηριστικής I-V από την πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας

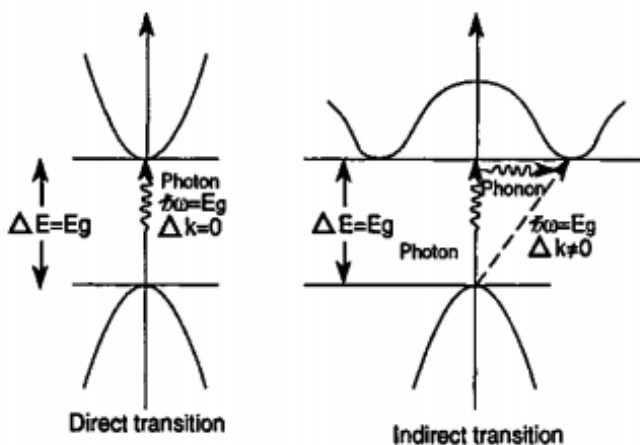


### 5.3 Ρύπανση των πλαισίων

Λόγω της έκθεσης των πλαισίων στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, παρατηρούνται επικαθίσεις σωματιδιακών ρύπων, όπως η σκόνη, με αποτέλεσμα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας να μην καταφέρνει να φτάσει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η επίδραση της ρύπανσης γίνεται περισσότερο αντιληπτή με την παρουσία στρώματος ρύπων, που δημιουργείται με τη βοήθεια της υγρασίας που παρουσιάζεται τις νυχτερινές ώρες. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί ανάκλαση ή και απορρόφηση της ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα η παρεχόμενη ισχύς από το πλαίσιο να μειώνεται κατά 5% - 15%. Σε πλεονεκτική θέση βρίσκονται οι εγκαταστάσεις που λόγω γεωγραφικής θέσης, έχουν τοποθετημένα πάνελ σε γωνία κλίσης  $40^\circ$ , με αποτέλεσμα οι βροχοπτώσεις να απομακρύνουν μεγάλο μέρος των επικαθήμενων ρύπων. Συμπερασματικά, ο περιοδικός καθαρισμός των άνω επιφανειών των πλαισίων κρίνεται επιτακτικός με γνώμονα τη διατήρηση της παραγωγής της ονομαστικής ισχύος.

### 5.4 Ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού

Τα κριτήρια τα οποία καθιστούν αποτελεσματική την απορρόφηση πρωτονίων από ένα ημιαγωγό είναι η τιμή και ο τύπος το ενεργειακού διακένου. Το ενεργειακό διάκενο του φωτός κυμαίνεται από 0,6eV για το υπέρυθρο φάσμα μέχρι 3,5eV για το υπεριώδες φάσμα, καθιστώντας μια ιδανική τιμή ενεργειακού διακένου για τον ημιαγωγό το 1,45eV. Το άμεσο ενεργειακό διάκενο συμβάλλει στην αποτελεσματική απορρόφηση φωτονίων, καθώς αυξάνεται η πιθανότητα μετακίνησης ηλεκτρικών φορέων διαμέσου του. Στο παρακάτω σχήμα παριστάνεται η διαφορά του άμεσου από το έμμεσο διάκενο.



Σχήμα 5.3: Άμεσο και έμμεσο ενεργειακό διάκενο

Στο έμμεσο ενεργειακό διάκενο η κορυφή της ζώνης σθένους και ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία στον χώρο, ενώ στο άμεσο βρίσκονται στο ίδιο σημείο στον χώρο.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ημιαγωγού που πληρεί τις δύο παραπάνω προϋποθέσεις είναι το GaAs, αλλά λόγω κόστους δεν είναι δυνατή η μαζική παραγωγή του για χρήση σε φωτοβολταϊκή μετατροπή. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι ο χρόνος ζωής οπών – ηλεκτρονίων, ο οποίος πρέπει να έχει τέτοια τιμή ώστε η συλλογή των ηλεκτρικών φορέων από τα ηλεκτρόδια να προηγείται της επανασύνδεσης των ηλεκτρικών φορέων. Το χαρακτηριστικό αυτό το διαθέτουν οι ημιαγωγοί με έμμεσο ενεργειακό διάκενο, όπως το πυρίτιο (Si), γεγονός που το καθιστά ιδανικό για φωτοβολταϊκή μετατροπή.

## 5.5 Ανακλαστικότητα

Η φυσική ανακλαστικότητα του πυριτίου για το ορατό φάσμα ακτινοβολίας είναι 40%. Η εναπόθεση ειδικού στρώματος στην επιφάνεια του έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ανακλαστικότητας στο 5%. Το στρώμα αυτό που αποτελείται συνήθως από  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  και  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , έχει δείκτη διάθλασης περίπου 2 και πάχος κάπου 80nm έως 100nm.

## 5.6 Επανασύνδεση στην πίσω όψη

Η μείωση των απωλειών λόγω επανασύνδεσης ηλεκτρικών φορέων στην πίσω όψη ενός ΦΒ στοιχείου πυριτίου γίνεται με την τοποθέτηση κατάλληλου ηλεκτροστατικού πεδίου στην πίσω επιφάνεια της διάταξης, το γνωστό και ως Back Surface Field (BSF). Αυτό πρακτικά γίνεται με τη δημιουργία ενός έντονα νοθευμένου λεπτού στρώματος πάχους 0,5 $\mu\text{m}$  ( $p^+=10^{19}/\text{cm}^3$ ), ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην επιφάνεια. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα οι οπές που μεταφέρονται στην πίσω όψη να μη μπορούν να επανασυνδεθούν.

## 5.7 Οι αντιστάσεις $R_s$ και $R_{sh}$

Η αύξηση της τιμής της αντίστασης σειράς  $R_s$  ή η μείωση της παράλληλης αντίστασης  $R_{sh}$  συντελεί στη σημαντική μείωση του συντελεστή πλήρωσης (FF) του ΦΒ στοιχείου που οδηγεί με τη σειρά της στη μεταβολή του σημείου λειτουργίας που παρέχει τη μέγιστη ισχύ  $P_{\text{max}}$ . Αν υπάρξει σημαντική αύξηση της  $R_s$  θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του  $I_{sc}$ , ενώ σημαντική μείωση της  $R_{sh}$  θα

οδηγήσει στη μείωση της  $V_{oc}$ . Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι οι αντιστάσεις πρέπει να διατηρούνται στις επιθυμητές τιμές.

### **5.8 Γωνία τοποθέτησης των ΦΒ πλαισίων**

Η γωνία τοποθέτησης των ΦΒ πλαισίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύ, δεδομένου ότι η ηλιακή γωνία μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτό σημαίνει ότι ένα πλαίσιο με σταθερή γωνία θα παρέχει διαφορετική ισχύ ανάλογα με την εποχή του έτους. Για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης χρησιμοποιούνται οι ηλιακοί ηχνιλάτες (trackers), οι οποίοι ανιχνεύουν τη διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας παρέχοντας στο σύστημα τα αντίστοιχα δεδομένα. Η αύξηση της παρεχόμενης ισχύος κυμαίνεται στο 10% για το χειμώνα και μέχρι 40% το καλοκαίρι.

### **5.9 Σκίαση**

Η σκίαση είναι ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στην απόδοση των ΦΒ στοιχείων. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται είτε από φυσικά εμπόδια που βρίσκονται στη διεύθυνση πλαισίου – ήλιου, όπως βλάστηση, κτίρια κτλ, είτε σε περιπτώσεις περιορισμένης έκτασης εγκατάστασης όπου προκαλείται σκίαση μιας σειράς στην επόμενη. Το τυπικό ΦΒ πλαίσιο αποτελείται από ίδια ΦΒ στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Το σκιασμένο στοιχείο συμπεριφέρεται σαν μία απλή δίοδο p-n, η οποία δέχεται από τα υπόλοιπα στοιχεία υψηλή ανάστροφη τάση. Η τάση αυτή μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του σκιασμένου στοιχείου, αλλά ακόμα και ολόκληρου του πλαισίου. Στην πράξη το σκιασμένο στοιχείο λειτουργεί σαν μια μεγάλη αντίσταση, η οποία δέχεται την ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα στοιχεία. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως Hot Spot. Για την αποφυγή μιας τέτοιας κατάστασης, χρησιμοποιούνται δίοδοι παράκαμψης, οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυττάρων που είναι συνδεδεμένες σε σειρά και αναλαμβάνουν να δημιουργήσουν εναλλακτικές διαδρομές για το ρεύμα ακόμα και όταν υπάρχουν κατεστραμμένα ΦΒ στοιχεία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 6.1 Ιστορικό

Η τυποποίηση προβλέπει οικονομία υλικών και εργασίας, χωρίς να παραβλέπει την ασφάλεια και συνεπώς συνιστά τη βασική αρχή που διέπει τις φυσικές, βιολογικές και κοινωνικές επιστήμες. Το παλαιότερο ευρωπαϊκό πρότυπο με τίτλο «τεχνική προδιαγραφή κατασκευής Εμπολίων πόλων», χρονολογείται από τον 4<sup>ο</sup> π.Χ αιώνα και ανακαλύφθηκε το 1893. Ήταν γραμμένο σε μια στήλη της Ελευσίνας και έθετε τεχνικές και χημικές προδιαγραφές.

Η σύγχρονη τυποποίηση ξεκίνησε στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες από οργανώσεις μηχανικών. Σύντομα, ο θεσμός διαδόθηκε σε όλες τις σημαντικές χώρες του κόσμου, απαριθμώντας σήμερα πάνω από 150 εθνικούς οργανισμούς τυποποίησης σε ισάριθμα κράτη. Τα τελευταία χρόνια η ανάρτηση της τυποποίησης είναι ραγδαία τόσο σε διεθνές όσο και ευρωπαϊκό επίπεδο. Με σκοπό την επίτευξη το σκοπό της τυποποίησης, έχουν καθοριστεί οι παρακάτω στόχοι:

- ολική οικονομία σε ανθρώπινη προσπάθεια, υλικά και ενέργεια
- τρόπος έκφρασης και επικοινωνίας
- ασφάλεια, υγεία και προστασία της ανθρώπινης ζωής
- προστασία καταναλωτή και συνήθη ενδιαφέροντα των ανθρώπων
- απάλειψη τεχνικών εμποδίων στο εμπόριο

Οι διαδικασίες της Τυποποίησης πρέπει να διέπονται από τις παρακάτω δέκα Αρχές:

1. Η Τυποποίηση πρέπει να αποβλέπει στον ορθολογισμό.
2. Η Τυποποίηση, δραστηριότητα που αφορά όλη την κοινωνία, πρέπει να γίνεται με τη συμμετοχή και τη συναίνεση όλων των ενδιαφερομένων.
3. Στην Τυποποίηση τα ενδιαφερόμενα μέρη είναι ισότιμα
4. Η Τυποποίηση πρέπει να εξυπηρετεί υπάρχουσες ανάγκες.
5. Οι διαδικασίες της Τυποποίησης πρέπει να είναι φανερές
6. Τα αποτελέσματα της Τυποποίησης πρέπει να αντανακλούν τις υπάρχουσες συνθήκες.
7. Η Τυποποίηση σε κάθε θέμα πρέπει να είναι ολοκληρωμένη
8. Η Τυποποίηση πρέπει να μένει σύγχρονη.
9. Η Τυποποίηση δεν πρέπει να αντιβαίνει στην πρόοδο
10. Η Τυποποίηση πρέπει να είναι αποδεκτή από αυτούς που αφορά.

## 6.2 Συστήματα τυποποίησης

Τα τελευταία χρόνια τείνει αυξανόμενος ο αριθμός των χωρών που αναγνωρίζει την σπουδαιότητα της συμμετοχής στις διαδικασίες της Διεθνούς Τυποποίησης. Αυτή η αύξηση μπορεί να αποδοθεί στα παρακάτω αποτελέσματα :

- **Διεθνής ανταλλαγή αγαθών και υπηρεσιών.** Η Διεθνής Τυποποίηση έχει μεγάλη επιρροή στην ευημερία των εθνών, αφού προωθεί την ανταλλαγή αγαθών, υπηρεσιών, πληροφόρησης και χρημάτων. Η αποδοτική κατανομή των πόρων μεταξύ των εθνών εξαρτάται κατά πολύ από αυτή την ανταλλαγή, τώρα που η αγορά διευρύνεται σε περιφερειακό και διεθνές επίπεδο.
- **Παγκόσμια Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών.** Η τάση παγκοσμιοποίησης συνδέεται με την αυξανόμενη σημασία των βιομηχανιών πληροφόρησης και τηλεπικοινωνιών.
- **Συνδυασμός Τεχνολογιών.** Η αυξανόμενη εισαγωγή της Τεχνολογίας των Υπολογιστών σε πολλές παραγωγικές και διοικητικές διαδικασίες, δείχνει την ανάγκη για αναγνωρίσιμες, ξεκάθαρα ορισθείσες, κοινές αναφορές.
- **Αναπτυσσόμενες χώρες.** Η υιοθέτηση των Διεθνών Προτύπων σαν βάση για Εθνικά Πρότυπα, ορίζει τις βάσεις για την ανάπτυξη πολιτικής που αποβλέπει στην επίτευξη μιας συνεχούς ανοδικής οικονομικής κατάστασης.

Οι Διεθνείς Οργανισμοί Τυποποίησης είναι οι παρακάτω :

- 1) Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης **ISO** (International Organization for Standardization)
- 2) Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή **IEC** (International Electrotechnical Commission)
- 3) Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών **ITU** (International Telecommunication Union)

Ο ISO καλύπτει όλους τους τομείς Τυποποίησης εκτός από της Ηλεκτρολογίας και Ηλεκτρονικής Μηχανικής, οι οποίοι αποτελούν αντικείμενο της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής IEC, καθώς και τον τομέα των Τηλεπικοινωνιών με τον οποίο ασχολείται η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU .

**Διεθνές Πρότυπο** ονομάζεται το Πρότυπο που έχει υιοθετηθεί από έναν Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης. Διεθνή Πρότυπα είναι τα παρακάτω:

- **Διεθνή Πρότυπα ISO**
- **Διεθνή Πρότυπα IEC**
- **Συστάσεις ITU (ITU-T, ITU-R).**

Τα Πρότυπα ISO και IEC εκπονούνται σύμφωνα με τις ακόλουθες Αρχές :

**α)** Προετοιμάζεται λαμβάνοντας υπόψη τις απόψεις όλων των ενδιαφερομένων μερών, όπως παραγωγοί αγαθών ή υπηρεσιών, χρήστες, καταναλωτές ή εργαστήρια δοκιμών. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, καθιερώθηκε η Αρχή της Συναίνεσης (Consensus Principle).

**β)** Τα Διεθνή Πρότυπα υποχρεούνται να προσφέρουν λύσεις σε προβλήματα που παρουσιάζονται σε όλο τον κόσμο και να ικανοποιούν τις ανάγκες των παραγωγών και των καταναλωτών. Αυτή θα μπορούσε να ονομασθεί Αρχή της Παγκοσμιότητας (Global Principle).

**γ)** Τα Διεθνή Πρότυπα έχουν τον χαρακτήρα Συστάσεων (Recommendations), δηλαδή η **πιστή εφαρμογή** των προδιαγραφών τους **είναι προαιρετική**. Αυτή η Αρχή της Εκούσιας Εφαρμογής (Voluntary Principle), δεν αποκλείει την δυνατότητα των Εθνικών Φορέων Τυποποίησης να υιοθετούν τα Διεθνή Πρότυπα και να τα καθιστούν Υποχρεωτικά.

### 6.2.1 Ευρωπαϊκό σύστημα τυποποίησης

Οι δραστηριότητες της Ευρωπαϊκής Τυποποίησης αντικαθιστούν πολλές αντίστοιχες δραστηριότητες σε Εθνικό επίπεδο. Οι εργασίες σε Ευρωπαϊκό επίπεδο διεξάγονται από εκπροσώπους των συμμετεχόντων Εθνικών Φορέων Τυποποίησης. **Οι Φορείς της Ευρωπαϊκής Τυποποίησης είναι οι ακόλουθοι:**

- Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης **CEN** (European Committee for Standardization)
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης **CENELEC** (European Committee for Electrotechnical Standardization)
- Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο για τα Τηλεπικοινωνιακά Πρότυπα **ETSI** (European Telecommunications Standardization Institute).

Τα Πρότυπα που υιοθετούν αυτοί οι Οργανισμοί Τυποποίησης ονομάζονται **Ευρωπαϊκά Πρότυπα** και είναι τα παρακάτω:

- Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN, δηλαδή Πρότυπα της **CEN / CENELEC**
- Ευρωπαϊκά Τηλεπικοινωνιακά Πρότυπα ETS, δηλαδή Πρότυπα του **ETSI**

Τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα πρέπει να υιοθετούνται υποχρεωτικά σαν Εθνικά Πρότυπα, ανεξάρτητα από τον τρόπο που ψήφισε το Εθνικό μέλος και ταυτόχρονα να καταργούνται τα αντιτιθέμενα Εθνικά Πρότυπα.

### **6.2.2 Εθνικό Σύστημα Τυποποίησης**

Οι Οργανισμοί Τυποποίησης αποτελούν τα κύρια όργανα εφαρμογής της Τυποποίησης στις χώρες της Ευρώπης. Οι περισσότεροι ιδρύθηκαν στις αρχές του 20ου αιώνα, κυρίως μεταξύ των δύο παγκοσμίων πολέμων.

Οι Οργανισμοί αυτοί εμφανίζουν μεγάλες ομοιότητες ως προς την νομική μορφή τους αλλά και τον τρόπο λειτουργίας τους. Συνήθως πρόκειται για ενώσεις που προέρχονται από επαγγελματικές οργανώσεις και εκπονούν τα Πρότυπα βάσει μιας διαδικασίας που εγγυάται τη δυνατότητα συμμετοχής όλων των ενδιαφερομένων οικονομικών εταίρων.

Αντίθετα με το σύστημα των ΗΠΑ και του Καναδά, όπου εκατοντάδες Οργανισμοί δημοσιεύουν Πρότυπα σε αντίστοιχους τομείς, οι χώρες της Ευρώπης ευνοούν συγκεντρωτικές δομές με εξαίρεση τον τομέα της Ηλεκτροτεχνικής.

### **6.3 Οργανισμοί Τυποποίησης**

Οι οργανισμοί τυποποίησης χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Διεθνείς οργανισμοί τυποποίησης
- Ευρωπαϊκοί οργανισμοί τυποποίησης
- Εθνικοί οργανισμοί τυποποίησης

Διεθνείς οργανισμοί τυποποίησης:

- Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης ISO (International Organization for Standardization)
- Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή IEC (International Electrotechnical Commission)
- Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU (International Telecommunication Union)

Ευρωπαϊκοί οργανισμοί τυποποίησης:

- Κοινός Ευρωπαϊκός Οργανισμός Τυποποίησης CEN/CENELEC (Joint European Standards Institution CEN/CENELEC)
- Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο για τα Τηλεπικοινωνιακά Πρότυπα ETSI (European

#### Εθνικοί Οργανισμοί Τυποποίησης

- Ελληνικός Οργανισμός τυποποίησης –ΕΛΟΤ
- Γερμανικός Οργανισμός Τυποποίησης – DIN (German Institute for Standardization)
- Βρετανικός Οργανισμός Τυποποίησης (British Standards Institution)
- Γαλλικός Οργανισμός Τυποποίησης ANFOR (Association Francaise de Normalization)
- Αμερικάνικος Οργανισμός Τυποποίησης ANSI (American National Standards Institute)

#### 6.3.1 Διεθνείς Οργανισμοί Τυποποίησης

##### **Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης ISO (International Organization for Standardization)**

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης ISO αποτελεί ένα δίκτυο Εθνικών Φορέων Τυποποίησης που αριθμεί 147 μέλη, με την Κεντρική του Γραμματεία να εδρεύει στη Γενεύη. Στόχος του είναι να προωθήσει την ανάπτυξη της Τυποποίησης και των σχετικών δραστηριοτήτων στον κόσμο, έτσι ώστε να διευκολύνεται η διεθνής ανταλλαγή αγαθών και υπηρεσιών και η ανάπτυξη συνεργασίας σε δραστηριότητες πνευματικού, επιστημονικού, τεχνολογικού και οικονομικού ενδιαφέροντος.

Ο ISO ενώνει τα συμφέροντα των παραγωγών, των χρηστών (συμπεριλαμβανομένων των καταναλωτών ), των κυβερνήσεων και της Επιστημονικής Κοινότητας κατά την προετοιμασία των Διεθνών Προτύπων. Οι δραστηριότητες του Οργανισμού πραγματοποιούνται σε περιφερειακό επίπεδο από τις Τεχνικές Επιτροπές και τις Υποεπιτροπές, οι οποίες οργανώνονται και υποστηρίζονται από Τεχνικές Γραμματείες που ανατίθενται στις χώρες μέλη. Τα αποτελέσματα του Τεχνικού Έργου του ISO εκδίδονται υπό την μορφή των Διεθνών Προτύπων ( International Standards ISO ).

Η συντομογραφία του Οργανισμού (International Organization for Standardization) θα ήταν διαφορετική σε κάθε γλώσσα (IOS στα Αγγλικά , OIN στα Γαλλικά), αλλά αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το ακρωνύμιο "ISO" που προέρχεται από την Ελληνική λέξη "ίσος" .

##### **Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή IEC (International Electrotechnical Commission)**



Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή IEC ιδρύθηκε το 1906 και έχει σαν αντικείμενο τα θέματα που σχετίζονται με την Διεθνή Τυποποίηση στα πεδία της Ηλεκτρολογίας και Ηλεκτρονικής Μηχανικής. Τα μέλη της IEC είναι Εθνικές Επιτροπές, οι οποίες απαιτείται να είναι πλήρως αντιπροσωπευτικές όλων των ηλεκτροτεχνικών συμφερόντων της χώρας όπου προέρχονται, όπως για παράδειγμα των βιοτεχνών, των χρηστών, των κυβερνητικών αρχών, των εκπαιδευτικών, των επαγγελματικών φορέων και των φορέων καταναλωτών. Οι Εθνικές Επιτροπές εξασφαλίζουν πολύ μεγάλη υποστήριξη από την βιομηχανία και κατά το πλείστον αναγνωρίζονται από τις κυβερνήσεις τους.

### **Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU (International Telecommunication Union)**

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU ιδρύθηκε το 1865 σαν ένας οργανισμός στο πλαίσιο του οποίου οι κρατικές αρχές και ο διεθνής και ιδιωτικός τομέας θα μπορούσαν να συνεργαστούν προκειμένου να συντονίσουν τη λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και υπηρεσιών ώστε να προαχθεί η ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα των επικοινωνιών.

### **6.3.2 Ευρωπαϊκοί Οργανισμοί Τυποποίησης**

#### **Κοινός Ευρωπαϊκός Οργανισμός Τυποποίησης CEN / CENELEC (Joint European Standards Institution CEN / CENELEC)**

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης CEN και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης CENELEC είναι μη κερδοσκοπικοί Οργανισμοί, που έχουν συσταθεί σύμφωνα με το Βελγικό Δίκαιο. Η CEN ιδρύθηκε το 1961 και αποτελείται από τους Εθνικούς Οργανισμούς Τυποποίησης των παρακάτω χωρών: Αυστρία, Βέλγιο, Γαλλία, Γερμανία, Δανία, Ελβετία, Ελλάδα, Ενωμένο Βασίλειο, Ιρλανδία, Ισλανδία, Ισπανία, Ιταλία, Κάτω Χώρες, Λουξεμβούργο, Μάλτα, Νορβηγία, Ουγγαρία, Πορτογαλία, Σλοβακία, Σουηδία, Τσεχία και Φιλανδία. Η CENELEC ιδρύθηκε το 1959 και αποτελείται από τις αντίστοιχες Εθνικές Επιτροπές Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης. Οι δύο αυτοί Οργανισμοί συστεγάζονται, έχοντας έδρα τις Βρυξέλλες και αποτελούν πλέον τον Κοινό Ευρωπαϊκό Οργανισμό Τυποποίησης CEN/CENELEC (Joint European Standard Institution CEN/CENELEC). Κύριος στόχος της CEN/CENELEC είναι η δημιουργία ενός ενιαίου συστήματος Τυποποίησης που θα ανταποκρίνεται στις σύγχρονες ανάγκες των κρατών –μελών της Ε.Ε. Αντικείμενο των δραστηριοτήτων της CEN/CENELEC είναι η εκπόνηση των Ευρωπαϊκών

Προτύπων EN τα οποία θα προωθήσουν την ανταγωνιστικότητα της Ευρωπαϊκής βιομηχανίας στην παγκόσμια αγορά και θα συμβάλλουν στη δημιουργία της εσωτερικής Ευρωπαϊκής Αγοράς.

### **Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο για τα Τηλεπικοινωνιακά Πρότυπα ETSI (European Telecommunications Standardization Institute).**

Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο για τα Τηλεπικοινωνιακά Πρότυπα ETSI εδρεύει στη Γαλλία και αριθμεί τα 786 μέλη από 56 χώρες εντός και εκτός της Ευρώπης. Εκπροσωπεί κρατικές αρχές, χειριστές δικτύων, βιομηχανίες, παροχείς υπηρεσιών, ερευνητικούς φορείς και χρήστες. Διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, σε ότι αφορά στη συμμετοχή της Ευρώπης, στην ανάπτυξη, παγκοσμίως, της Τυποποίησης σε θέματα Τηλεπικοινωνιών, Ραδιοφωνίας και Τεχνολογίας της Πληροφόρησης.

### **6.3.3 Εθνικοί Οργανισμοί Τυποποίησης**

#### **Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης - ΕΛΟΤ**

Ο Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης ΕΛΟΤ Α.Ε ιδρύθηκε με το Νόμο 372/76 και ήταν Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου μέχρι τον Ιούνιο του 1997, οπότε και μετατράπηκε σε Ανώνυμη Εταιρεία με τον Νόμο 155/97.. Σκοπός του Οργανισμού είναι η προαγωγή και η εφαρμογή της Τυποποίησης στην Ελλάδα καθώς και συναφών δραστηριοτήτων με κάθε πρόσφορο τρόπο και μέθοδο.

Οι κύριες δραστηριότητες του Οργανισμού είναι:

- η εκπόνηση και η διάδοση των Προτύπων,
- η απονομή Σημάτων Συμμόρφωσης (ποιότητας),
- η χορήγηση Πιστοποιητικών Συμμόρφωσης (ποιότητας),
- η πιστοποίηση συστημάτων ποιότητας επιχειρήσεων και
- η διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών.

### **Γερμανικός Οργανισμός Τυποποίησης – DIN (German Institute for Standardization)**

Ο Γερμανικός Οργανισμός Τυποποίησης DIN ιδρύθηκε το 1917, είναι ένας εγκεκριμένος Οργανισμός που εδρεύει στο Βερολίνο και αναγνωρίζεται σαν ο Γερμανικός « Εθνικός Φορέας Τυποποίησης ». Δεν αποτελεί Κρατικό Φορέα, αλλά ένα αυτοκυβερνώμενο ίδρυμα του εμπορίου και της βιομηχανίας και αποτελεί τον μοναδικό αρμόδιο φορέα στην Γερμανία, που ασχολείται αποκλειστικά με την εκπόνηση και την διάδοση των Προτύπων, σύμφωνα με το καταστατικό και τις αρχές του καθώς και με την συμφωνία που σύναψε με το κράτος της Ομοσπονδιακής Γερμανίας το 1975. Ο σκοπός του DIN, σύμφωνα με το καταστατικό του , είναι η σύνταξη, έκδοση και η προώθηση της εφαρμογής των Προτύπων για τον ορθολογισμό, την διασφάλιση ποιότητας, την ασφάλεια και την επικοινωνία, μέσω των κοινών προσπάθειών όλων των ενδιαφερομένων ομάδων, για το δημόσιο κοινό όφελος.

### **Βρετανικός Οργανισμός Τυποποίησης BSI (British Standards Institution)**

Ο Βρετανικός Οργανισμός Τυποποίησης BSI ιδρύθηκε το 1901 και αποτελεί τον πρώτο Εθνικό Οργανισμό Τυποποίησης σε παγκόσμιο επίπεδο. Ο Οργανισμός BSI εκπροσωπεί τις απόψεις της Βρετανικής βιομηχανίας. Το Ηλεκτροτεχνικό Συμβούλιο του BSI αποτελεί την Βρετανική Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή.

### **Γαλλικός Οργανισμός Τυποποίησης AFNOR (Association Francaise de Normalization)**

Ο Γαλλικός Οργανισμός Τυποποίησης AFNOR ιδρύθηκε το 1926, αναγνωρίζεται σαν ένας μη κερδοσκοπικός Οργανισμός από τις Αρχές, λειτουργεί υπό την εποπτεία του Γαλλικού Υπουργείου Βιομηχανίας και αποτελεί έναν Οργανισμό δημιουργίας και έγκρισης Προτύπων έχοντας το μονοπώλιο της υιοθέτησης των Εθνικών Προτύπων.

### **Αμερικάνικος Οργανισμός Τυποποίησης ANSI (American National Standards Institute)**

Ο Αμερικάνικος Οργανισμός Τυποποίησης ANSI ιδρύθηκε το 1918 από πέντε τεχνικές εταιρείες και τρεις κρατικές διευθύνσεις, και παραμένει ένας ιδιωτικός μη κερδοσκοπικός οργανισμός υποστηριζόμενος από πολλές δημόσιες και ιδιωτικές επιχειρήσεις. Κύριος στόχος του, μέσα από τα 79 χρόνια ιστορίας του, είναι η βελτίωση της ανταγωνιστικότητας των Αμερικανικών επιχειρήσεων σε παγκόσμιο επίπεδο και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και της ποιότητας ζωής. Ο ANSI εκπροσωπεί τα συμφέροντα των 1.400 περίπου εταιρειών,

οργανισμών, κρατικών φορέων, ιδρυμάτων στην Αμερική και παγκοσμίως, που είναι μέλη του.

#### **6.4 Το πρότυπο IEC 60891**

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) έχει δημοσιεύσει τεράστιο αριθμό προτύπων που αφορούν φωτοβολταϊκές εφαρμογές τόσο εσωτερικού όσο και εξωτερικού χώρου. Αυτά τα πρότυπα περιγράφουν διαδικασίες και προαπαιτούμενα για τον χαρακτηρισμό ΦΒ κελιών και συσκευών μέτρησης.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πρότυπο IEC 60904-1, σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιείται η απόδοση της χαρακτηριστικής I-V ενός ΦΒ στοιχείου. Το πρότυπο που θα μας απασχολήσει στο πειραματικό μέρος της εργασίας είναι το IEC 60891, το οποίο δημοσιεύθηκε το 2009 και περιγράφει διαδικασίες διόρθωσης της θερμοκρασίας και ακτινοβολίας σε χαρακτηριστικές I-V που έχουν προκύψει από μετρήσεις. Το τελευταίο προκύπτει με τον υπολογισμό σχετικών συντελεστών για τις συγκεκριμένες διορθώσεις. Η πρώτη έκδοση του προτύπου είχε δημοσιευθεί το 1987 και αποτελούσε την πρώτη αλγεβρική διαδικασία διόρθωσης παραμέτρων που είχε αποτυπωθεί σε πρότυπο IEC και ήταν κυρίως εμπειρική. Η έκδοση αυτή αποτελεί την πρώτη διαδικασία του προτύπου IEC 60891. Η δεύτερη διαδικασία βασίζεται σε ημιεμπειρική μέθοδο βασισμένη στο απλοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του ΦΒ στοιχείου. Η τρίτη διαδικασία βασίζεται για τη λήψη των αποτελεσμάτων στη γραμμική παρεμβολή δύο ή περισσότερων χαρακτηριστικών I-V.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

### **7.1 Διαδικασία μετρήσεων χαρακτηριστικών ΦΒ κελιών**

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασιακής καταπόνησης στην απόδοση των ΦΒ στοιχείων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

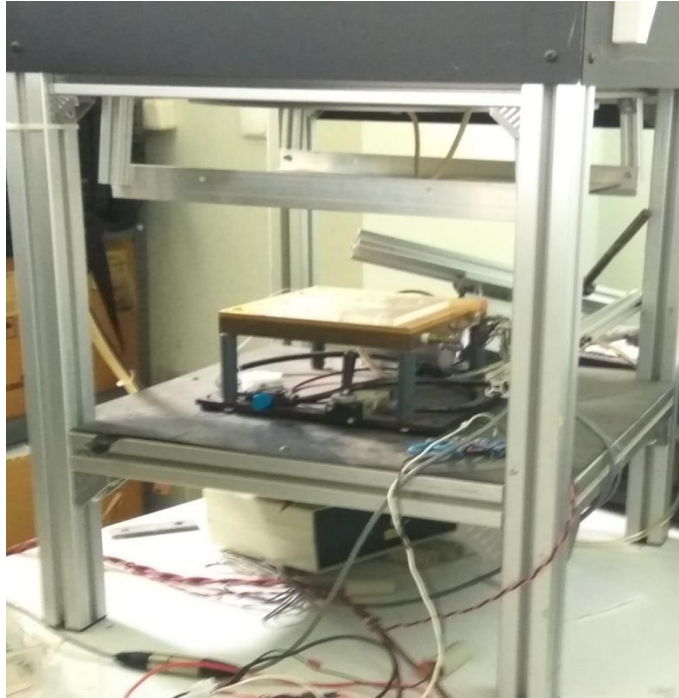
Vikocell Mono Series Cell 125x125mm	
Model	125-M
Material	Monocrystalline silicon
Format	125*125 mm +/- 0.5 mm
Cell Efficiency	17.6%
Maximum Power	2.7 w
Busbar	2BB
Thickness	200 $\mu\text{m}$ +/-30 $\mu\text{m}$
Front (-)	1.5 mm silver bus bars, blue silicon nitride anti-reflecting coating
Back (+)	2.3 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

Η διαδικασία λήψης μετρήσεων αφορά 3 κατηγορίες θερμοκρασιακών καταπονήσεων:

- Καμία θερμοκρασιακή καταπόνηση
- Θέρμανση στους 300°C
- Θέρμανση στους 450°C

Ακολουθως, αφού τα στοιχεία επανήλθαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ειδική συσκευή, η οποία παρέχει στο στοιχείο δέσμη φωτός που προσομοιάζει σε ένταση αυτή την πυκνότητα ισχύος του

Ήλιου. Η συσκευή έχει τη δυνατότητα παραγωγής ζευγών μετρήσεων ρεύματος (I) και τάσεως (V), που θα συντελέσουν στη χάραξη της χαρακτηριστικής I-V κάθε στοιχείου. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η εν λόγω συσκευή.



Σχήμα 7.1 : Συσκευή τεχνητού φωτισμού ΦΒ κελιού



Σχήμα 7.2: Συσκευή παραγωγής μετρήσεων ρεύματος - τάσης

## 7.2 Αναγωγή μετρήσεων σε συνθήκες STC

Ο χαρακτηρισμός της ισχύος γίνεται πάντα σε συνθήκες STC, όπως αντίστοιχα παρέχονται και από τον κατασκευαστή. Οι συνθήκες STC (Standard Test Conditions), όπως έχει προαναφερθεί είναι οι ακόλουθες:

- Πυκνότητα ισχύος  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$
- Θερμοκρασία  $25^\circ\text{C}$
- Αέριος μάζα  $AM=1,5$

Δεδομένου ότι οι συνθήκες που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις είναι διαφορετικές από τις STC, απαιτείται η αναγωγή τους σε STC. Αυτό γίνεται για να υπάρχει κοινή αναφορά στις συνθήκες και να είναι δυνατή η σύγκρισή τους.

Για την μετατροπή αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που παρέχεται στο πρότυπο IEC 60891 της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC). Σύμφωνα με την προσθήκη υπ' αριθμό 1 του προτύπου, η διόρθωση των τιμών γίνεται σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \times \left( \frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + a \times (T_2 - T_1)$$

$$V_2 = V_1 - R_s \times (I_2 - I_1) - k \times I_2 \times (T_2 - T_1) + b \times (T_2 - T_1)$$

όπου

$I_1, V_1$  οι μετρηθείσες τιμές σε συνθήκες περιβάλλοντος

$I_2, V_2$  οι μετρηθείσες τιμές ανηγμένες σε συνθήκες STC

$G_1$  η τιμή της ακτινοβολίας σε συνθήκες περιβάλλοντος

$G_2$  η τιμή της ακτινοβολίας σε συνθήκες STC

$T_1$  η θερμοκρασία πραγματοποίησης της μέτρησης

$T_2$  ανηγμένη θερμοκρασία σε συνθήκες STC

$I_{sc}$  το ρεύμα βραχυκύκλωσης

$a$  θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος

$b$  θερμοκρασιακός συντελεστής τάσεως

$R_s$  η αντίσταση σειράς

### 7.3 Υπολογισμός της τιμής της εσωτερικής αντίστασης $R_s$

Ο μοναδικός άγνωστος για τη χρήση του προτύπου IEC 60891 είναι η τιμή της εσωτερικής αντίστασης  $R_s$ . Ο υπολογισμός της πραγματοποιείται με τη βοήθεια της εργασίας “PEAK-POWER AND INTERNAL SERIES RESISTANCE MEASUREMENT UNDER NATURAL AMBIENT CONDITIONS” (ANDREAS WAGNER). Για τη χρήση της μεθόδου απαιτούνται οι παρακάτω 2 προϋποθέσεις:

- Για συγκεκριμένη θερμοκρασία και ακτινοβολία πραγματοποίησης των μετρήσεων, η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας πρέπει να παραμένει σταθερή.
- Η θερμοκρασία των κελιών απαιτείται να διατηρείται σταθερή, με μέγιστη αποδεκτή απόκλιση  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

Για την υλοποίηση του υπολογισμού απαιτούνται 2 ζεύγη μετρήσεων, όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο:

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

όπου

$$V_1 = V(I_{sc1}, DI, R_{pv1}, V_{T1}, I_{01}, I_{ph1})$$

$$V_2 = V(I_{sc2}, DI, R_{pv2}, V_{T2}, I_{02}, I_{ph2})$$

και η τιμή της τάσης δίνεται από τον τύπο:

$$V = V_T \times \ln\left(\frac{I_{ph} - I - I_0}{I_0}\right) - I \times R_{ph}$$

και είναι:

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

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



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

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

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

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

$$DI = 0,5 \cdot I_{sc2}$$

όπου  $I_{sc2}$  το ρεύμα βραχυκύκλωσης με τη μικρότερη τιμή από το ζεύγος μετρήσεων.

## 7.4 Ανάλυση μετρήσεων

### 7.4.1 Μετρήσεις κελιού χωρίς θερμοκρασιακή καταπόνηση

Για το κελί που δεν έχει υποστεί θερμοκρασιακή καταπόνηση, οι τιμές της  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  και  $P_{max}$  είναι οι εξής :

- 1<sup>η</sup> ομάδα μετρήσεων

$$I_{mp}=4,273A$$

$$V_{mp}=0,509V$$

$$P_{max}=2,175W$$

Τα αποτελέσματα της πρώτης ομάδας μετρήσεων απεικονίζονται παρακάτω:

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
916,1589337	0,59765625	0,045130021	35,88867188	0,026972239
916,1589337	0,597446987	0,086499206	35,88867188	0,05167869
916,6396047	0,597167969	0,129372726	35,88867188	0,077257248
917,1202757	0,596958705	0,169989745	35,88867188	0,101476858
916,1589337	0,596609933	0,213615431	35,88867188	0,127445088
916,6396047	0,596261161	0,254984617	35,88867188	0,152037424
915,6782627	0,596051897	0,297858136	35,88867188	0,177538907
916,1589337	0,595772879	0,338475155	35,64453125	0,201654318
915,1975917	0,595354353	0,381348675	35,88867188	0,227037593
914,7169207	0,59500558	0,424222194	35,88867188	0,252414573
913,7555787	0,594656808	0,467095714	35,88867188	0,277761646
913,7555787	0,59437779	0,509969234	35,88867188	0,303114386
914,2362497	0,594168527	0,552090586	35,88867188	0,32803485
913,7555787	0,59375	0,594964106	35,88867188	0,353259938
913,7555787	0,593401228	0,638589793	35,88867188	0,378939967
912,7942366	0,59312221	0,681463312	35,88867188	0,404191026
913,2749076	0,592843192	0,722080331	35,88867188	0,428080408
914,2362497	0,59249442	0,76495385	35,88867188	0,453230888
914,2362497	0,592145647	0,805570869	35,88867188	0,477015284
915,6782627	0,591796875	0,849196556	35,88867188	0,502551868
915,6782627	0,591448103	0,889813574	35,64453125	0,52627855
915,6782627	0,591169085	0,931934927	35,88867188	0,550931118
915,1975917	0,590750558	0,971799778	35,88867188	0,574091261
915,6782627	0,590332031	1,014673298	35,88867188	0,598994149
915,1975917	0,589983259	1,05453815	35,88867188	0,622159854
915,6782627	0,589634487	1,096659502	35,88867188	0,646628263
915,1975917	0,58921596	1,136524354	35,88867188	0,669658288
914,7169207	0,588797433	1,178645707	35,88867188	0,693983566
916,1589337	0,588378906	1,219262725	35,88867188	0,717388469
915,6782627	0,588030134	1,261384078	35,88867188	0,741731848
917,1202757	0,587820871	1,301248929	35,64453125	0,764901278
916,1589337	0,587332589	1,343370282	35,88867188	0,789005146
915,6782627	0,586914062	1,383235134	35,88867188	0,811840152
915,6782627	0,58656529	1,425356486	35,88867188	0,836064641
915,6782627	0,586216518	1,464469171	35,88867188	0,858496018
916,6396047	0,585867746	1,505838356	35,88867188	0,882222123
916,1589337	0,585379464	1,545703208	35,88867188	0,904822916
915,1975917	0,584821429	1,587072394	35,88867188	0,928153945

914,2362497	0,584472656	1,626185078	35,88867188	0,950460712
914,7169207	0,584054129	1,667554264	35,88867188	0,973941954
911,8328946	0,583496094	1,705914781	35,64453125	0,995394611
911,8328946	0,583077567	1,747283967	35,88867188	1,018802084
911,8328946	0,58265904	1,786396652	35,88867188	1,040860158
911,8328946	0,582240513	1,82701367	35,88867188	1,063761377
912,7942366	0,581891741	1,866126355	35,88867188	1,085883514
911,8328946	0,581263951	1,90749554	35,64453125	1,108758394
911,8328946	0,58077567	1,945856058	35,88867188	1,130105855
913,2749076	0,580357143	1,987225244	35,88867188	1,153300365
913,7555787	0,579868862	2,025585761	35,64453125	1,174574109
913,7555787	0,57938058	2,06620278	35,88867188	1,197117766
913,7555787	0,578892299	2,104563297	35,88867188	1,218315486
914,2362497	0,578334263	2,145180316	35,88867188	1,240631278
914,2362497	0,577915737	2,182788667	35,88867188	1,26146792
914,7169207	0,577427455	2,223405685	35,88867188	1,283855487
913,2749076	0,57686942	2,261014036	35,88867188	1,304309855
913,2749076	0,576311384	2,301631054	35,88867188	1,326456178
912,7942366	0,575823103	2,339239405	35,88867188	1,346988092
912,7942366	0,575195313	2,379104256	35,88867188	1,368449616
912,7942366	0,574776786	2,416712607	35,88867188	1,389070304
912,7942366	0,574148996	2,456577459	35,88867188	1,41044148
915,1975917	0,573730469	2,494185809	35,88867188	1,430990393
915,1975917	0,573102679	2,533298494	35,88867188	1,451840152
915,1975917	0,572544643	2,570154677	35,88867188	1,471528292
914,2362497	0,571847098	2,609267362	35,88867188	1,492101969
914,2362497	0,571289063	2,646123545	35,88867188	1,51170144
914,7169207	0,570591518	2,684484063	35,88867188	1,531743836
914,2362497	0,569963728	2,72058808	35,88867188	1,550636523
912,3135656	0,569196429	2,758948597	35,88867188	1,570383688
911,3522236	0,568498884	2,795052614	35,88867188	1,588984291
911,8328946	0,567801339	2,833413131	35,88867188	1,608815771
909,9102106	0,566964286	2,869517148	35,88867188	1,62691374
910,3908816	0,566266741	2,907877665	35,88867188	1,646634409
909,9102106	0,565569196	2,944733849	35,88867188	1,665450757
909,9102106	0,564732143	2,983094366	35,88867188	1,684649274
911,8328946	0,564174107	3,01995055	35,88867188	1,703777905
912,3135656	0,563337054	3,058311068	35,88867188	1,722859946
912,7942366	0,562709263	3,094415084	35,88867188	1,741256033
913,2749076	0,56187221	3,132023435	35,88867188	1,759796928
913,2749076	0,561035156	3,168127451	35,88867188	1,77743088
912,3135656	0,560198103	3,204983635	35,88867188	1,795425751

913,2749076	0,559430804	3,240335484	35,64453125	1,812743484
912,7942366	0,558523996	3,277191668	35,88867188	1,830390184
912,3135656	0,557617188	3,311039183	35,88867188	1,846292357
913,2749076	0,556780134	3,3471432	35,88867188	1,863622839
912,7942366	0,555803571	3,380990715	35,88867188	1,879166715
913,2749076	0,554827009	3,415590398	35,88867188	1,895061804
912,3135656	0,553641183	3,448685746	35,88867188	1,909334457
912,3135656	0,552525112	3,483285429	35,88867188	1,92460267
912,3135656	0,551618304	3,516380777	35,88867188	1,939699999
912,3135656	0,550502232	3,551732627	35,64453125	1,955236739
912,3135656	0,549386161	3,584827975	35,88867188	1,969454878
911,8328946	0,54813058	3,618675491	35,88867188	1,983506697
912,3135656	0,547014509	3,65402734	35,88867188	1,998805971
911,8328946	0,545758929	3,687874856	35,88867188	2,01269063
911,8328946	0,544503348	3,722474538	35,88867188	2,02689985
911,3522236	0,54296875	3,756322054	35,88867188	2,03956549
911,8328946	0,541503906	3,789417402	35,88867188	2,051984326
912,3135656	0,54031808	3,824017085	35,88867188	2,066185571
912,7942366	0,538713728	3,857864601	35,88867188	2,07828462
913,2749076	0,537388393	3,890959949	35,88867188	2,090956714
912,3135656	0,535295759	3,924055297	35,88867188	2,100530159
912,3135656	0,533551897	3,955646312	35,88867188	2,110542595
911,3522236	0,531529018	3,98874166	35,88867188	2,120131937
911,3522236	0,529575893	4,021084842	35,88867188	2,129469595
910,8715526	0,527413504	4,054932357	35,88867188	2,138626085
910,3908816	0,524972098	4,085771205	35,88867188	2,144915882
911,8328946	0,522879464	4,11961872	35,88867188	2,15406403
912,3135656	0,520368304	4,149705401	35,88867188	2,15937516
912,7942366	0,517926897	4,182800749	35,88867188	2,166385014
911,3522236	0,514718192	4,211383096	35,88867188	2,167675493
912,7942366	0,512137277	4,243726277	35,88867188	2,173370419
912,7942366	0,50906808	4,273060791	35,88867188	2,175278854
912,7942366	0,50516183	4,302395304	35,88867188	2,173405887
912,3135656	0,501674107	4,331729818	35,64453125	2,173116689
911,8328946	0,496163504	4,35880783	35,88867188	2,162681368
912,7942366	0,491908482	4,387390176	35,88867188	2,158194442
912,7942366	0,485560826	4,412211688	35,88867188	2,142397151
911,8328946	0,478794643	4,434024531	35,88867188	2,122987192
910,8715526	0,471470424	4,455837374	35,88867188	2,100795537
911,3522236	0,464076451	4,47464155	35,88867188	2,076575769
909,4295396	0,455357143	4,48968489	35,88867188	2,044410084
909,4295396	0,446986607	4,503976063	35,88867188	2,013216979

909,9102106	0,439313616	4,522028071	35,88867188	1,986588504
909,4295396	0,429199219	4,530301909	35,88867188	1,94440204
909,9102106	0,419642857	4,541584414	35,88867188	1,905843459
908,9488686	0,409249442	4,54760175	35,88867188	1,861103478
908,9488686	0,398716518	4,555875587	35,88867188	1,81650285
909,9102106	0,389857701	4,567910259	35,88867188	1,780834991
909,4295396	0,377929688	4,570918927	35,88867188	1,727485962
909,9102106	0,368024554	4,57768843	35,88867188	1,684701741
909,9102106	0,35672433	4,582201432	35,88867188	1,634582737
910,3908816	0,346819196	4,588970935	35,88867188	1,591543212
909,4295396	0,333565848	4,588218768	35,88867188	1,530473085
909,9102106	0,322195871	4,590475269	35,88867188	1,479032176
909,4295396	0,30922154	4,588970935	35,88867188	1,41900866
909,9102106	0,298270089	4,59273177	35,88867188	1,369874515
909,4295396	0,285226004	4,59273177	35,88867188	1,309966532
908,9488686	0,272460938	4,591227436	35,88867188	1,250930132
909,9102106	0,261369978	4,596492606	35,88867188	1,20138517
909,9102106	0,249093192	4,596492606	35,88867188	1,144955015
911,8328946	0,239955357	4,607775111	35,88867188	1,105660322
910,8715526	0,225864955	4,602509942	35,88867188	1,039545702
911,3522236	0,213030134	4,603262109	35,88867188	0,980633544
911,3522236	0,200613839	4,602509942	35,88867188	0,92332719
911,8328946	0,188267299	4,60551861	35,88867188	0,86706855
912,3135656	0,176199777	4,607775111	35,88867188	0,811888946
912,3135656	0,162388393	4,606270777	35,88867188	0,748004908
911,3522236	0,148367746	4,602509942	35,88867188	0,682864024
910,8715526	0,134626116	4,601757775	35,88867188	0,619516776
911,3522236	0,122837612	4,604014276	35,88867188	0,565546117
908,4681976	0,105189732	4,591227436	35,88867188	0,482949984
908,9488686	0,092843192	4,590475269	35,88867188	0,426194377
908,9488686	0,080078125	4,590475269	35,88867188	0,367596652
908,4681976	0,067871094	4,590475269	35,88867188	0,311560577
908,9488686	0,055873326	4,591979603	35,88867188	0,256569173
907,9875266	0,04234096	4,587466601	35,88867188	0,194237739
907,5068556	0,029087612	4,585962267	35,88867188	0,133394689
908,9488686	0,019112723	4,591979603	35,88867188	0,087765235
908,9488686	0,007045201	4,594236104	35,88867188	0,032367316

- 2<sup>η</sup> ομάδα μετρήσεων

$I_{mp}=4,759A$

$V_{mp}=0,505V$

$P_{max}=2,404W$

Τα αποτελέσματα της δεύτερης ομάδας μετρήσεων απεικονίζονται παρακάτω:

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
1006,525082	0,600376674	0,003008668	35,88867188	0,001806334
1005,56374	0,600097656	0,037608351	35,88867188	0,022568683
1005,56374	0,599888393	0,070703699	35,64453125	0,042414328
1005,083069	0,599679129	0,104551215	35,64453125	0,062697181
1006,044411	0,599539621	0,137646563	35,64453125	0,082524568
1006,044411	0,599330357	0,171494079	35,64453125	0,102781607
1005,56374	0,599121094	0,20383726	35,88867188	0,122123202
1006,525082	0,598842076	0,238436943	35,64453125	0,142786074
1006,525082	0,598632813	0,270780124	35,88867188	0,162097867
1008,928437	0,598493304	0,305379807	35,64453125	0,182767769
1007,967095	0,598144531	0,339979489	35,64453125	0,203356872
1008,447766	0,597935268	0,373827005	35,88867188	0,22352435
1008,447766	0,597726004	0,408426687	35,64453125	0,244127252
1008,928437	0,597516741	0,44302637	35,64453125	0,264715673
1008,928437	0,597377232	0,477626052	35,88867188	0,285322929
1008,447766	0,597167969	0,512225735	35,88867188	0,305884801
1007,486424	0,596888951	0,54607325	35,64453125	0,325945089
1007,005753	0,596679687	0,578416432	35,64453125	0,345129336
1007,005753	0,596470424	0,612263947	35,64453125	0,365197336
1003,641056	0,596121652	0,643854962	35,64453125	0,383815883
1004,121727	0,595842634	0,677702477	35,88867188	0,403804029
1004,602398	0,595563616	0,710045659	35,88867188	0,42287736
1004,602398	0,595284598	0,743141007	35,64453125	0,442380396
1005,56374	0,595075335	0,775484189	35,64453125	0,461471513
1004,602398	0,594796317	0,808579537	35,64453125	0,480940131
1005,083069	0,594517299	0,840170552	35,88867188	0,499495927
1006,525082	0,594308036	0,8732659	35,88867188	0,518988942
1007,005753	0,594168527	0,90335258	35,88867188	0,536743672
1006,044411	0,593959263	0,934191428	35,88867188	0,554871652
1007,005753	0,59375	0,963525941	35,88867188	0,572093528
1007,486424	0,593610491	0,993612622	35,64453125	0,589818876

1007,967095	0,593401228	1,022194968	35,88867188	0,606571749
1008,928437	0,593261719	1,052281649	35,64453125	0,62427842
1007,486424	0,592982701	1,080111828	35,88867188	0,640487629
1007,486424	0,592703683	1,110198509	35,64453125	0,658018745
1007,005753	0,592424665	1,138028688	35,88867188	0,674196264
1006,525082	0,592215402	1,168115368	35,64453125	0,691775912
1006,044411	0,591936384	1,196697715	35,64453125	0,708368918
1005,083069	0,591657366	1,227536562	35,64453125	0,726281049
1006,525082	0,591448103	1,256871076	35,88867188	0,743374013
1006,525082	0,591169085	1,28846209	35,88867188	0,761698955
1006,525082	0,590959821	1,318548771	35,88867188	0,779209346
1005,083069	0,590611049	1,350891952	35,88867188	0,797851713
1005,083069	0,590332031	1,382482967	35,88867188	0,816123978
1005,083069	0,590053013	1,415578315	35,88867188	0,835266251
1005,56374	0,58984375	1,448673664	35,64453125	0,854491106
1005,083069	0,589564732	1,482521179	35,64453125	0,874042202
1004,121727	0,589285714	1,514864361	35,88867188	0,892687927
1005,56374	0,589006696	1,548711876	35,64453125	0,912201666
1004,602398	0,588727679	1,581055058	35,88867188	0,930810874
1005,083069	0,588448661	1,614150406	35,64453125	0,949844645
1003,641056	0,588030134	1,645741421	35,64453125	0,967745548
1003,641056	0,587681362	1,677332435	35,64453125	0,985737009
1004,121727	0,587402344	1,708923449	35,88867188	1,00382564
1005,083069	0,587123326	1,741266631	35,88867188	1,022338256
1006,044411	0,586914063	1,772105478	35,88867188	1,040073626
1006,044411	0,586635045	1,804444866	35,88867188	1,05855282
1006,044411	0,586356027	1,835287507	35,64453125	1,076131891
1005,56374	0,586146763	1,864622021	35,88867188	1,092942162
1007,486424	0,5859375	1,8924522	35,88867188	1,108858711
1006,525082	0,585588728	1,922538881	35,88867188	1,125817097
1006,525082	0,58530971	1,943599557	35,64453125	1,137607693
1006,525082	0,585030692	1,969173235	35,64453125	1,15202678
1006,525082	0,584751674	1,99324258	35,88867188	1,165551935
1007,967095	0,584542411	2,022577093	35,88867188	1,18228209
1006,525082	0,584123884	2,052663774	35,64453125	1,199009936
1005,56374	0,583775112	2,083502621	35,64453125	1,216296975
1004,602398	0,583426339	2,1113328	35,64453125	1,231807167
1005,56374	0,583147321	2,145180316	35,64453125	1,250956155
1003,641056	0,58265904	2,1820365	35,88867188	1,271383292
1003,641056	0,582170759	2,221149184	35,88867188	1,293088106
1004,602398	0,581752232	2,255748867	35,88867188	1,312286938
1005,083069	0,581333705	2,29260505	35,88867188	1,332768589

1005,083069	0,580984933	2,328709067	35,64453125	1,352944881
1003,641056	0,580426897	2,368573918	35,88867188	1,37478401
1002,679714	0,579868862	2,415208273	35,88867188	1,400504072
1004,121727	0,579450335	2,456577459	35,88867188	1,423464631
1004,121727	0,579031808	2,497194477	35,88867188	1,445955033
1004,602398	0,578543527	2,540067997	35,88867188	1,469539897
1004,121727	0,577985491	2,580685015	35,64453125	1,491598496
1005,56374	0,57749721	2,622054201	35,88867188	1,514228985
1005,56374	0,576939174	2,661919053	35,64453125	1,53576538
1007,005753	0,576450893	2,699527403	35,88867188	1,556144982
1006,044411	0,575892857	2,737135754	35,64453125	1,57629693
1006,525082	0,575265067	2,776248438	35,64453125	1,597078744
1006,044411	0,574707031	2,81611329	35,64453125	1,618440109
1006,044411	0,574079241	2,85898681	35,88867188	1,641284978
1007,005753	0,573451451	2,907125498	35,64453125	1,667095335
1006,044411	0,572684152	2,957520688	35,88867188	1,693725227
1007,967095	0,572126116	3,006411544	35,64453125	1,72004656
1007,005753	0,571289063	3,053798066	35,64453125	1,744601434
1007,486424	0,570591518	3,10043242	35,88867188	1,769080441
1006,525082	0,569754464	3,149323276	35,88867188	1,794340996
1006,525082	0,568917411	3,198966299	35,88867188	1,819947624
1007,005753	0,568150112	3,244848486	35,64453125	1,84356103
1007,486424	0,567313058	3,28922634	35,64453125	1,866021054
1007,005753	0,56640625	3,335108528	35,88867188	1,889026315
1006,044411	0,565290179	3,38475155	35,64453125	1,913366808
1006,044411	0,564313616	3,43514674	35,88867188	1,938500079
1004,121727	0,56312779	3,481781095	35,88867188	1,960687694
1004,602398	0,5625	3,512619942	35,64453125	1,975848718
1003,641056	0,561732701	3,54345879	35,88867188	1,990476677
1003,160385	0,560895647	3,576554138	35,88867188	2,006073649
1004,121727	0,559988839	3,617923324	35,88867188	2,025996683
1003,641056	0,559151786	3,652523006	35,88867188	2,042314761
1004,121727	0,558384487	3,68937919	35,88867188	2,060092105
1004,602398	0,557477679	3,72473104	35,64453125	2,076454413
1004,602398	0,556082589	3,775878396	35,88867188	2,099700235
1004,602398	0,554757254	3,828530087	35,88867188	2,12390484
1006,525082	0,553501674	3,880429611	35,64453125	2,147824286
1006,525082	0,552315848	3,926311799	35,88867188	2,168564231
1007,005753	0,550223214	3,986485159	35,64453125	2,193456678
1008,447766	0,548339844	4,045906353	35,88867188	2,218531658
1007,967095	0,545898437	4,109088382	35,88867188	2,243144927
1008,447766	0,543526786	4,173022578	35,88867188	2,268149549



1007,005753	0,540597098	4,238461108	35,88867188	2,291299776
1006,044411	0,537458147	4,302395304	35,88867188	2,312357409
1006,044411	0,534458705	4,367833834	35,88867188	2,334426816
1006,044411	0,531389509	4,421237692	35,88867188	2,349399326
1006,525082	0,528459821	4,47464155	35,64453125	2,364668274
1005,56374	0,524832589	4,523532405	35,64453125	2,374097225
1006,525082	0,521693638	4,573175428	35,88867188	2,385796528
1006,525082	0,518624442	4,610783779	35,88867188	2,391265164
1007,005753	0,516113281	4,644631294	35,64453125	2,397155897
1006,044411	0,513671875	4,671709307	35,88867188	2,399725679
1006,044411	0,511230469	4,695778651	35,64453125	2,400625121
1006,525082	0,509486607	4,719095828	35,88867188	2,404316122
1006,525082	0,506905692	4,738652171	35,88867188	2,402049758
1007,486424	0,50516183	4,759712847	35,64453125	2,404425254
1006,044411	0,50062779	4,782277857	35,64453125	2,394141196
1006,044411	0,496372768	4,807099369	35,88867188	2,386113219
1004,602398	0,491001674	4,834177381	35,88867188	2,373589187
1005,083069	0,485212054	4,86200756	35,64453125	2,359104673
1004,602398	0,478934152	4,892094241	35,64453125	2,342991006
1005,083069	0,470563616	4,914659251	35,88867188	2,312659829
1006,044411	0,462123326	4,945498099	35,64453125	2,28543003
1006,044411	0,458356585	4,956028437	35,64453125	2,271628269
1007,005753	0,451311384	4,975584779	35,64453125	2,245538053
1005,56374	0,441894531	4,984610783	35,64453125	2,202672246
1007,486424	0,434988839	5,001158458	35,88867188	2,175448113
1007,005753	0,426827567	5,012440963	35,88867188	2,139447981
1007,005753	0,417271205	5,021466967	35,88867188	2,095313574
1007,005753	0,410644531	5,026732136	35,64453125	2,064200062
1007,005753	0,394391741	5,037262474	35,88867188	1,986654717
1007,967095	0,385602679	5,048544979	35,64453125	1,946732467
1008,928437	0,373883929	5,053810148	35,88867188	1,889538393
1007,967095	0,361955915	5,053810148	35,88867188	1,829256477
1006,525082	0,348632813	5,050049313	35,64453125	1,760612895
1007,005753	0,338030134	5,051553647	35,64453125	1,707577356
1004,121727	0,322823661	5,041775476	35,64453125	1,627604416
1004,121727	0,312988281	5,04327981	35,88867188	1,57848748
1004,602398	0,303362165	5,047792812	35,64453125	1,531309357
1003,160385	0,290806362	5,044784144	35,88867188	1,467055322
1003,160385	0,278390067	5,046288478	35,64453125	1,404836587
1002,679714	0,264578683	5,044031977	35,88867188	1,334543338
1003,160385	0,252859933	5,047792812	35,64453125	1,276384552
1004,121727	0,242745536	5,055314482	35,64453125	1,227155022

1004,121727	0,229701451	5,057570983	35,64453125	1,161731393
1004,602398	0,217354911	5,059827484	35,64453125	1,099778351
1005,56374	0,206124442	5,064340486	35,88867188	1,043884357
1007,005753	0,196986607	5,073366491	35,64453125	0,999385252
1006,044411	0,183244978	5,069605656	35,88867188	0,928979775
1006,044411	0,170689174	5,069605656	35,88867188	0,865326802
1005,083069	0,155622221	5,065844821	35,88867188	0,788357966
1006,044411	0,143694196	5,068101322	35,64453125	0,728256747
1005,083069	0,128836496	5,063588319	35,64453125	0,652374974
1004,602398	0,114885603	5,060579651	35,64453125	0,581387743
1005,083069	0,102957589	5,063588319	35,88867188	0,521334847
1005,083069	0,09109933	5,065092653	35,88867188	0,461426549
1007,486424	0,083984375	5,07863166	35,88867188	0,426525706
1006,525082	0,07094029	5,073366491	35,64453125	0,359906091
1006,044411	0,05859375	5,073366491	35,64453125	0,297267568
1005,56374	0,046526228	5,072614324	35,88867188	0,236009609
1006,044411	0,035226004	5,075622992	35,88867188	0,178793918
1005,56374	0,023367746	5,074870825	35,64453125	0,11858829
1005,083069	0,01046317	5,073366491	35,88867188	0,053083494

Χρησιμοποιώντας τους τύπους υπολογισμού της  $R_s$  προκύπτει:

$$R_s = 0,0357 \Omega$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα προσαρμοσμένα δεδομένα σε STC συνθήκες:

V2 (STC)	I2(STC)	P(STC)
0,625391778	0,028009176	0,017516708
0,625644184	0,068114911	0,042615698
0,62544389	0,118387922	0,074045003
0,625310429	0,166406683	0,104055834
0,624321838	0,2175096	0,135795993
0,625140913	0,260722453	0,162988272
0,624928224	0,313374144	0,195836347
0,624714587	0,365273667	0,228191788
0,623239733	0,426729711	0,265954911
0,623821241	0,479308159	0,299002611
0,62337363	0,535962792	0,334105071
0,622995461	0,59262644	0,369203582
0,622864129	0,642142773	0,399967699

0,62241605	0,698810938	0,434951144
0,622693648	0,734927262	0,457634538
0,622411205	0,787578953	0,490197965
0,622276642	0,834850037	0,519507678
0,621037021	0,889946908	0,552689977
0,621650295	0,934775053	0,581103187
0,621379859	0,985059285	0,612095999
0,621175309	1,032337082	0,641262306
0,620810234	1,086601831	0,674573537
0,620289697	1,140229844	0,707272824
0,619936552	1,192129368	0,739044569
0,619251485	1,250521453	0,774387266
0,618234722	1,300115539	0,803776569
0,618611158	1,351311833	0,835936577
0,618258012	1,403211356	0,867546664
0,617984173	1,450475699	0,896371026
0,616811497	1,503200632	0,927191431
0,617508859	1,547267634	0,955451472
0,616181084	1,601614582	0,98688461
0,616564958	1,652808625	1,019063881
0,615895377	1,711850953	1,054321087
0,615772728	1,755977685	1,081283168
0,615266653	1,809505975	1,113328684
0,614839015	1,857644663	1,142152415
0,614662563	1,902408145	1,169339066
0,614234925	1,950546833	1,198093988
0,613894019	2,000072175	1,227832346
0,613232561	2,052961475	1,258942824
0,612587056	2,106487512	1,290406983
0,611994886	2,159390324	1,321535835
0,611501284	2,210537681	1,35174663
0,610839995	2,2642017	1,383064955
0,610194099	2,317739037	1,414270683
0,609945038	2,359466749	1,439145036
0,609299298	2,412999556	1,470238936
0,60804048	2,458826037	1,495065763
0,608168795	2,512285602	1,527893707
0,607601648	2,56042429	1,555718019
0,607271787	2,60605084	1,58258115
0,60678592	2,651056428	1,608623713
0,606455591	2,696696508	1,635426674
0,605735671	2,74645946	1,663628463

0,60510256	2,797606816	1,692839045
0,604312807	2,847372018	1,720703377
0,603760898	2,895388528	1,748122377
0,602819164	2,947534663	1,776830381
0,602115351	2,997929852	1,805099585
0,601559729	3,042935441	1,83050742
0,599843645	3,095032639	1,856535661
0,599369132	3,137659548	1,880616281
0,599067862	3,193619965	1,913195084
0,59884076	3,229113071	1,933724526
0,597913549	3,280378109	1,961382518
0,597217238	3,324638282	1,985531291
0,596068446	3,378279749	2,013685962
0,595149685	3,424161937	2,037888897
0,59455045	3,465930243	2,060670384
0,593631688	3,51181243	2,084723141
0,59241235	3,564697239	2,111770667
0,591036929	3,616963303	2,137758883
0,589911747	3,665101991	2,162086717
0,588159309	3,720666262	2,188344496
0,587115797	3,765660534	2,210878784
0,585986824	3,810790554	2,233073054
0,584498111	3,859817159	2,256055837
0,583534295	3,90016495	2,275880006
0,581905204	3,948437118	2,297616106
0,580564125	3,991310637	2,317211769
0,579169867	4,034802845	2,336836229
0,577550718	4,078428532	2,355499329
0,576003219	4,123558552	2,375183
0,574687476	4,161658908	2,391653253
0,573152527	4,204405738	2,409765773
0,571169212	4,248158114	2,426417124
0,569590324	4,286897498	2,441775335
0,567396954	4,329893197	2,456768212
0,565300971	4,370388037	2,470584602
0,562386929	4,419652193	2,485554623
0,559426026	4,462654662	2,496525163
0,556897226	4,504023847	2,508278388
0,552773342	4,543209774	2,511365249
0,551093717	4,57898491	2,523449814
0,547068261	4,619857567	2,527377447
0,543277248	4,655961584	2,529477998

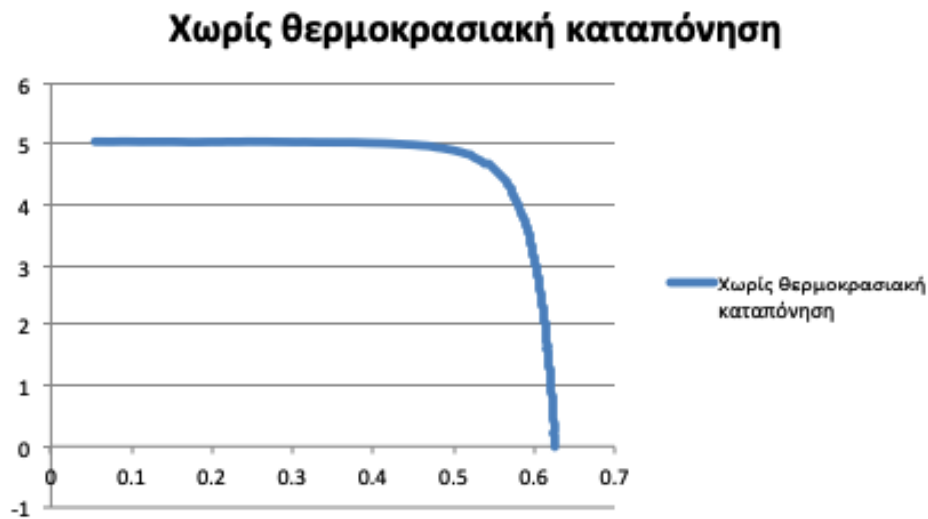
0,539329282	4,690692479	2,529827807
0,535200308	4,722904448	2,527699917
0,530680574	4,759273156	2,525653808
0,525136224	4,787855502	2,514276357
0,52079238	4,815552203	2,50790289
0,51447694	4,841125881	2,49064763
0,508905034	4,862625115	2,474614398
0,500906024	4,891038131	2,449950465
0,49353574	4,909842306	2,423182656
0,485454021	4,930288837	2,393428543
0,477604608	4,943689822	2,361129037
0,46938338	4,964136353	2,330083101
0,459838389	4,973162357	2,286850967
0,451163838	4,983418925	2,248338407
0,441631632	4,990054949	2,20376611
0,431177938	4,997576619	2,15484478
0,419562001	5,006257705	2,100435502
0,409555482	5,011249104	2,052384542
0,398538067	5,014257772	1,998372599
0,387173774	5,018770774	1,943136424
0,376437272	5,023283777	1,890951243
0,363727201	5,024171692	1,827427908
0,354582914	5,02439447	1,781564433
0,341803323	5,025275586	1,717655896
0,329790954	5,026158966	1,657581758
0,315711115	5,029715181	1,587936987
0,304356053	5,028822716	1,530552632
0,290134814	5,031654097	1,459858024
0,279340866	5,033011285	1,405925733
0,268339472	5,035875094	1,351324064
0,256046666	5,036019953	1,289456117
0,244344884	5,036627261	1,230674104
0,231994554	5,033618593	1,167772098
0,220501956	5,034228183	1,110057163
0,210153053	5,031557614	1,057397192
0,197667003	5,031557614	0,994572916
0,186170302	5,029167634	0,936281657
0,174187136	5,028284254	0,875862433
0,163882737	5,031163973	0,824520921
0,150168003	5,034566282	0,756030767
0,138379499	5,034566282	0,69668076
0,124815642	5,034840052	0,628426795

0,112763085	5,034023106	0,567651973
0,100596875	5,036484684	0,50665462
0,087800793	5,037524288	0,442298627
0,076475798	5,034840052	0,385043413
0,064463115	5,035732517	0,324619004
0,054568717	5,036631334	0,274842508

Η μέγιστη ισχύς προκύπτει για:

$I_{\max} = 0,539329282 \text{ A}$  ,  $V_{\max} = 4,690692479 \text{ V}$  και είναι  $P_{\max} = 2,529827807 \text{ W}$ .

Παρακάτω δίνεται η χαρακτηριστική I-V για τις παραπάνω τιμές:



#### 7.4.2 Μετρήσεις κελιού με θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 300°C

Για το κελί που έχει υποστεί θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 300°C, οι τιμές της  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  και  $P_{\max}$  είναι οι εξής :

- 1<sup>η</sup> ομάδα μετρήσεων

$$I_{mp} = 4,045 \text{ A}$$

$$V_{mp} = 0,52 \text{ V}$$

$$P_{\max} = 2,107 \text{ W}$$

Τα αποτελέσματα της πρώτης ομάδας μετρήσεων απεικονίζονται παρακάτω:

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
879,6279374	0,601492746	0,033847516	32,71484375	0,020359035
880,5892794	0,601213728	0,078977536	32,71484375	0,047482379
880,5892794	0,60093471	0,121851056	32,71484375	0,073224529
880,5892794	0,600655692	0,164724575	32,71484375	0,098942754
879,1472664	0,600237165	0,21135893	32,71484375	0,126865485
879,6279374	0,599888393	0,254984617	32,71484375	0,152962312
880,5892794	0,599609375	0,297858136	32,71484375	0,178598531
880,5892794	0,599260603	0,341483823	32,71484375	0,204637802
880,1086084	0,59891183	0,38510951	32,71484375	0,230646641
879,6279374	0,598563058	0,428735196	32,95898438	0,25662505
880,5892794	0,59828404	0,472360883	32,71484375	0,282605978
880,1086084	0,598005022	0,514482236	32,71484375	0,307662961
879,6279374	0,597726004	0,557355755	32,71484375	0,333146029
878,1859244	0,597377232	0,600229275	32,95898438	0,358563303
878,1859244	0,59702846	0,645359296	32,71484375	0,385297866
879,1472664	0,596749442	0,688232815	32,71484375	0,410702548
879,1472664	0,596470424	0,731106335	32,71484375	0,436083306
880,1086084	0,596191406	0,776236356	32,71484375	0,462785444
879,6279374	0,595772879	0,819109875	32,71484375	0,488003449
882,5119634	0,595493862	0,861983395	32,71484375	0,51330582
882,0312924	0,595075335	0,907113416	32,71484375	0,539800819
882,9926344	0,594726563	0,949986935	32,71484375	0,564982464
882,0312924	0,594308036	0,992860455	32,71484375	0,590064947
882,0312924	0,593889509	1,034981807	32,71484375	0,614664837
882,5119634	0,593470982	1,078607494	32,71484375	0,640122249
882,5119634	0,593052455	1,121481014	32,71484375	0,665097069
881,0699504	0,592633929	1,164354533	32,71484375	0,690036001
879,6279374	0,592145647	1,207228053	32,71484375	0,714854837
879,1472664	0,591727121	1,250101573	32,95898438	0,739719004
876,7439113	0,591238839	1,292222925	32,95898438	0,764012382
877,7052534	0,590820312	1,337352946	32,71484375	0,790135285
877,2245823	0,590401786	1,379474299	32,95898438	0,814444089
877,2245823	0,589983259	1,422347818	32,71484375	0,839161401
878,6665954	0,589564732	1,467477839	32,71484375	0,865173179
879,1472664	0,58921596	1,509599192	32,71484375	0,889479937
879,1472664	0,588867188	1,551720544	32,71484375	0,913757313
880,1086084	0,588448661	1,596850565	32,95898438	0,939664576
879,6279374	0,588030134	1,639724084	32,95898438	0,964207173
879,1472664	0,587611607	1,681845437	32,95898438	0,9882719
879,6279374	0,58719308	1,726223291	32,95898438	1,013626371
879,1472664	0,586774554	1,767592476	32,95898438	1,037178286

878,6665954	0,586216518	1,808961662	32,95898438	1,060443206
880,5892794	0,585728237	1,851083015	32,95898438	1,08423159
880,1086084	0,585170201	1,8924522	32,95898438	1,107406634
880,1086084	0,58468192	1,933821386	32,95898438	1,1306704
878,6665954	0,584054129	1,975190571	32,95898438	1,15361821
878,1859244	0,583426339	2,016559757	32,95898438	1,176514077
878,1859244	0,582868304	2,05868111	32,95898438	1,199939966
878,1859244	0,582380022	2,100050295	32,95898438	1,223027338
878,1859244	0,581821987	2,144428149	32,95898438	1,247675446
877,2245823	0,581194196	2,185797335	32,95898438	1,270372725
877,7052534	0,580566406	2,22716652	32,95898438	1,293018063
877,2245823	0,579868862	2,270792207	32,71484375	1,316761692
877,7052534	0,579310826	2,312161392	32,95898438	1,339460126
876,7439113	0,578613281	2,352778411	32,71484375	1,361348836
877,2245823	0,577915737	2,397156265	32,95898438	1,385354328
878,1859244	0,577357701	2,43852545	32,95898438	1,407901448
878,6665954	0,576729911	2,479142469	32,95898438	1,429795615
880,5892794	0,576241629	2,522768156	32,95898438	1,453724033
879,1472664	0,575544085	2,562633007	32,95898438	1,474908269
879,1472664	0,57484654	2,603250026	32,95898438	1,496469271
878,1859244	0,574148996	2,643867044	32,95898438	1,517973608
878,1859244	0,573381696	2,683731896	32,95898438	1,538802747
877,2245823	0,572614397	2,723596748	32,95898438	1,55957071
876,7439113	0,571847098	2,763461599	32,95898438	1,580277497
876,7439113	0,571079799	2,803326451	32,95898438	1,600923106
877,7052534	0,570242746	2,843943469	32,95898438	1,621738132
877,7052534	0,569475446	2,883808321	32,95898438	1,642258031
877,2245823	0,568498884	2,925177507	32,95898438	1,662960148
879,1472664	0,567801339	2,965794525	32,95898438	1,683982103
878,6665954	0,566894531	3,00490721	32,95898438	1,703465464
879,1472664	0,565917969	3,047028562	32,95898438	1,724368215
879,1472664	0,565011161	3,086893414	32,95898438	1,744129231
878,6665954	0,564034598	3,125253932	32,95898438	1,762751346
881,0699504	0,563197545	3,167375284	32,95898438	1,783857983
880,5892794	0,562081473	3,205735802	32,95898438	1,801884702
879,6279374	0,560965402	3,243344152	32,95898438	1,819403856
878,6665954	0,559640067	3,283209004	32,95898438	1,837415307
878,6665954	0,558523996	3,320817354	32,95898438	1,854756177
876,7439113	0,557128906	3,356921371	32,95898438	1,870237932
876,7439113	0,555873326	3,393777555	32,95898438	1,886510417
876,2632403	0,5546875	3,430633738	32,95898438	1,902929652
875,7825693	0,553292411	3,466737755	32,95898438	1,91811969



876,2632403	0,552106585	3,503593938	32,95898438	1,934357284
875,7825693	0,550641741	3,538945788	32,95898438	1,94869127
876,2632403	0,549246652	3,574297637	32,95898438	1,96317101
876,7439113	0,547851563	3,610401654	32,95898438	1,977964187
876,7439113	0,546177455	3,648010004	32,95898438	1,992460821
877,2245823	0,544712612	3,683361854	32,95898438	2,006373655
877,7052534	0,543108259	3,718713703	32,95898438	2,019664125
878,1859244	0,541434152	3,755569887	32,95898438	2,033393796
876,7439113	0,539271763	3,788665235	32,95898438	2,043120182
876,2632403	0,537248884	3,821760584	32,95898438	2,053236608
875,3018983	0,534946987	3,855608099	32,95898438	2,062545934
876,2632403	0,532854353	3,887951281	32,95898438	2,071711763
875,7825693	0,530622221	3,919542295	32,95898438	2,079796194
875,3018983	0,527762277	3,95113331	32,95898438	2,085259112
876,2632403	0,525599888	3,983476491	32,95898438	2,093714799
876,7439113	0,522739955	4,012811005	32,95898438	2,097656646
879,1472664	0,52078683	4,045906353	32,95898438	2,107054746
878,6665954	0,517229353	4,072984366	32,95898438	2,106667067
878,6665954	0,513671875	4,100062378	32,95898438	2,106086729
877,7052534	0,509905134	4,126388224	32,95898438	2,10406654
877,7052534	0,505650112	4,150457568	32,95898438	2,098679332
877,2245823	0,501743862	4,175279079	32,95898438	2,094920649
877,2245823	0,496791295	4,196339756	32,95898438	2,08470506
877,2245823	0,4921875	4,221913434	32,95898438	2,077973018
876,7439113	0,486537388	4,240717609	32,95898438	2,06326767
876,2632403	0,48109654	4,260273952	32,95898438	2,049603058
873,8598853	0,473074777	4,272308624	32,95898438	2,021121449
874,3405563	0,466796875	4,288856298	32,95898438	2,002024717
874,3405563	0,460728237	4,306908306	32,95898438	1,984314269
874,3405563	0,453055246	4,321199479	32,95898438	1,957742091
874,3405563	0,446079799	4,334738486	32,95898438	1,933639273
873,8598853	0,437151228	4,342260156	32,95898438	1,898224358
875,3018983	0,4296875	4,357303496	32,95898438	1,872278846
876,7439113	0,421595982	4,367833834	32,95898438	1,841461195
876,7439113	0,41280692	4,376107671	33,203125	1,806487528
874,8212273	0,402204241	4,377612005	32,95898438	1,760694114
875,3018983	0,392996652	4,384381508	32,95898438	1,723047253
875,7825693	0,383719308	4,391151011	33,203125	1,684969428
875,7825693	0,374023438	4,395664014	33,203125	1,644081364
876,7439113	0,365094866	4,403185684	33,203125	1,607580487
875,7825693	0,354073661	4,403937851	33,203125	1,559318396
876,2632403	0,344098772	4,407698686	32,95898438	1,516683707

876,2632403	0,332449777	4,407698686	33,203125	1,465338444
875,7825693	0,322126116	4,409955187	33,203125	1,420561736
874,8212273	0,311035156	4,40920302	33,203125	1,37141715
874,8212273	0,299874442	4,411459521	33,203125	1,322883962
873,8598853	0,28843471	4,409955187	33,203125	1,271984145
873,3792143	0,27797154	4,411459521	33,203125	1,226260197
873,8598853	0,268484933	4,418981191	33,203125	1,186429869
872,8985433	0,257045201	4,417476857	33,203125	1,135491226
873,3792143	0,246651786	4,419733358	33,203125	1,090135125
872,8985433	0,234723772	4,418229024	33,203125	1,037063383
873,3792143	0,225167411	4,423494193	33,203125	0,996026734
874,3405563	0,215890067	4,429511529	33,203125	0,956287541
874,3405563	0,205078125	4,430263696	33,44726563	0,908550172
875,7825693	0,195452009	4,435528865	33,203125	0,866933027
875,3018983	0,184500558	4,435528865	33,203125	0,818357551
875,7825693	0,174386161	4,438537533	33,203125	0,77401952
874,3405563	0,161969866	4,434776698	33,203125	0,718300188
875,3018983	0,15108817	4,435528865	33,203125	0,670155938
874,8212273	0,13936942	4,433272364	33,203125	0,617862597
875,3018983	0,128208705	4,435528865	33,203125	0,568673413
875,3018983	0,117396763	4,437033199	33,44726563	0,520893337
875,3018983	0,106166295	4,436281032	33,203125	0,470983519
876,2632403	0,096191406	4,443050535	33,44726563	0,427383279
875,7825693	0,084891183	4,441546201	33,203125	0,377048112
876,7439113	0,076520647	4,451324372	33,44726563	0,340618222
875,3018983	0,063406808	4,44681137	33,203125	0,281958115
875,3018983	0,052943638	4,449067871	33,203125	0,235549841
875,3018983	0,04234096	4,449820038	33,44726563	0,188409651
875,7825693	0,03125	4,452828706	33,203125	0,139150897
876,2632403	0,021275112	4,456589541	33,203125	0,09481444
875,7825693	0,009695871	4,455085207	33,44726563	0,043195929

- 2<sup>η</sup> ομάδα μετρήσεων

$I_{mp}=4,537A$

$V_{mp}=0,512V$

$P_{max}=2,326W$

Τα αποτελέσματα της δεύτερης ομάδας μετρήσεων απεικονίζονται παρακάτω:

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
973,3587832	0,603097098	0,017299841	31,98242188	0,010433484
973,8394542	0,602748326	0,061677695	31,98242188	0,037176127
972,8781121	0,602469308	0,103046881	31,98242188	0,062082583
973,8394542	0,60219029	0,145168233	31,98242188	0,0874189
973,3587832	0,601911272	0,189546087	31,98242188	0,114089926
972,8781121	0,601632254	0,232419606	31,98242188	0,139831132
975,2814672	0,601422991	0,275293126	31,98242188	0,165567615
974,8007962	0,601213728	0,317414479	31,98242188	0,190833942
974,8007962	0,601004464	0,360287998	31,98242188	0,216534695
973,8394542	0,600725446	0,402409351	31,98242188	0,241737537
973,8394542	0,600516183	0,444530704	31,98242188	0,266947881
974,8007962	0,60030692	0,486652056	31,98242188	0,292140597
974,8007962	0,600027902	0,528021242	31,98242188	0,316827478
974,8007962	0,599818638	0,570142594	32,2265625	0,341982155
972,8781121	0,599469866	0,614520448	31,98242188	0,368386491
972,3974411	0,599190848	0,655889634	31,98242188	0,393003066
971,4360991	0,59891183	0,698010986	32,2265625	0,418047037
971,9167701	0,598632813	0,74238884	32,2265625	0,444418319
970,4747571	0,59828404	0,783758026	31,98242188	0,468909918
970,4747571	0,598005022	0,825879378	32,2265625	0,493880016
970,4747571	0,59765625	0,870257232	32,2265625	0,520114674
970,9554281	0,597377232	0,911626418	31,98242188	0,544584866
972,3974411	0,597167969	0,95374777	32,2265625	0,569547619
971,9167701	0,596819196	0,995116956	32,2265625	0,593904902
971,9167701	0,596470424	1,036486141	32,2265625	0,618233328
971,4360991	0,596191406	1,078607494	32,2265625	0,643056519
972,3974411	0,595912388	1,11997668	32,2265625	0,667407978
972,3974411	0,595633371	1,161345865	32,2265625	0,691736352
972,8781121	0,595284598	1,202715051	32,2265625	0,715957746
973,8394542	0,59500558	1,244084237	32,2265625	0,740237063
973,3587832	0,594656808	1,28846209	32,2265625	0,766192754
973,8394542	0,59437779	1,330583443	31,98242188	0,790869246
972,8781121	0,593959263	1,371952628	32,2265625	0,814883973
972,8781121	0,593610491	1,416330482	32,2265625	0,840748633
970,4747571	0,59312221	1,456947501	32,2265625	0,864147921
969,5134151	0,592773438	1,498316686	31,98242188	0,888162333
969,0327441	0,592354911	1,541942373	32,2265625	0,913377137
969,0327441	0,591936384	1,583311559	32,2265625	0,937219719
969,9940861	0,591587612	1,624680744	32,2265625	0,961141001
969,5134151	0,591169085	1,668306431	32,2265625	0,986251186
969,5134151	0,590820313	1,709675616	32,2265625	1,010111082

969,5134151	0,59047154	1,751796969	32,2265625	1,034386254
970,4747571	0,590122768	1,793166155	32,2265625	1,058188174
970,9554281	0,589773996	1,835287507	32,2265625	1,082404846
971,4360991	0,589425223	1,876656693	32,2265625	1,10614879
972,3974411	0,589076451	1,918025879	32,2265625	1,129863877
971,4360991	0,58858817	1,958642897	32,2265625	1,152834038
971,9167701	0,588169643	2,000012083	32,2265625	1,176346392
971,4360991	0,587751116	2,040629101	32,2265625	1,199382032
971,4360991	0,587332589	2,085006955	32,2265625	1,224592534
970,4747571	0,586844308	2,125623974	32,2265625	1,24741033
969,9940861	0,586356027	2,166240992	32,2265625	1,270188461
969,9940861	0,5859375	2,209866679	32,2265625	1,294843757
969,9940861	0,585518973	2,250483698	32,2265625	1,317700904
971,4360991	0,585170201	2,291100716	32,2265625	1,340683866
970,4747571	0,584542411	2,333974236	32,2265625	1,364306926
970,9554281	0,583984375	2,373839087	32,2265625	1,386284936
969,9940861	0,583426339	2,413703939	32,2265625	1,408218453
970,4747571	0,582938058	2,455825292	32,2265625	1,431594026
969,9940861	0,582380022	2,495690143	32,2265625	1,453440081
970,4747571	0,581821987	2,535554995	32,2265625	1,475241644
970,4747571	0,581333705	2,574667679	32,2265625	1,496741102
970,4747571	0,580845424	2,613780364	32,2265625	1,518202364
970,9554281	0,580426897	2,652893049	32,2265625	1,539810481
969,0327441	0,579799107	2,691253566	32,2265625	1,560386415
969,0327441	0,579241071	2,730366251	32,2265625	1,581540272
968,0714021	0,578613281	2,768726768	32,2265625	1,60202208
968,0714021	0,578055246	2,807839453	32,47070313	1,623086324
968,0714021	0,577427455	2,849208638	32,2265625	1,645211294
967,5907311	0,576799665	2,887569156	32,47070313	1,665548922
968,5520731	0,576311384	2,926681841	32,47070313	1,686680062
969,0327441	0,575683594	2,967298859	32,2265625	1,708225271
968,5520731	0,575125558	3,00490721	32,47070313	1,728198936
967,1100601	0,574428013	3,04251556	32,47070313	1,747706169
968,0714021	0,573869978	3,083132579	32,47070313	1,769317224
968,0714021	0,573242187	3,12074093	32,47070313	1,788940357
968,5520731	0,572544643	3,15834928	32,47070313	1,808295961
969,0327441	0,571847098	3,197461965	32,47070313	1,828459346
968,5520731	0,571010045	3,234318148	32,47070313	1,84682815
969,9940861	0,570382254	3,271926499	32,47070313	1,866248813
969,5134151	0,569614955	3,308030515	32,47070313	1,884303654
969,0327441	0,568777902	3,344134532	32,47070313	1,902069822
967,5907311	0,567801339	3,380238548	32,47070313	1,919303975

968,0714021	0,56703404	3,416342565	32,47070313	1,937182527
966,6293891	0,566057478	3,452446581	32,47070313	1,954283204
966,6293891	0,565290179	3,487798431	32,47070313	1,971618198
967,5907311	0,564592634	3,523902448	32,47070313	1,989569365
966,6293891	0,563546317	3,560758631	32,47070313	2,006652412
967,1100601	0,562709263	3,595358314	32,47070313	2,023141428
966,6293891	0,561802455	3,629957996	32,47070313	2,039319315
967,1100601	0,560965402	3,66681418	32,47070313	2,05695589
968,0714021	0,560198103	3,700661695	32,47070313	2,07310366
968,0714021	0,55922154	3,733757044	32,47070313	2,087997365
968,5520731	0,558244978	3,769108893	32,47070313	2,10408611
969,0327441	0,55733817	3,802204242	32,47070313	2,119113553
969,9940861	0,556570871	3,836051757	32,47070313	2,135034666
968,5520731	0,555245536	3,869899273	32,47070313	2,148744295
968,5520731	0,553989955	3,902242454	32,47070313	2,161803123
967,5907311	0,552664621	3,934585636	32,47070313	2,174506277
968,0714021	0,551478795	3,967680984	32,47070313	2,188091927
967,5907311	0,55015346	4,000776333	32,47070313	2,201040941
967,1100601	0,548549107	4,033871681	32,47070313	2,212776709
967,5907311	0,547223772	4,067719197	32,47070313	2,225952644
967,5907311	0,54561942	4,100814545	32,47070313	2,237484052
969,9940861	0,544642857	4,135414228	32,47070313	2,25232382
968,5520731	0,542898996	4,165500908	32,47070313	2,261446259
968,5520731	0,541155134	4,198596257	32,71484375	2,27209192
968,0714021	0,539620536	4,22793077	32,71484375	2,281478267
968,5520731	0,538016183	4,256513116	32,71484375	2,29007294
969,0327441	0,53641183	4,288104131	32,71484375	2,300189786
968,5520731	0,534458705	4,314429976	32,71484375	2,305884659
967,5907311	0,532645089	4,341507989	32,71484375	2,31248291
967,1100601	0,530133929	4,372346836	32,71484375	2,317929405
967,1100601	0,52797154	4,400177016	32,71484375	2,323168236
963,7453631	0,524553571	4,425750694	32,71484375	2,321543333
963,7453631	0,521554129	4,455085207	32,71484375	2,323568087
963,2646921	0,519042969	4,48216322	32,71484375	2,326435304
962,7840211	0,515625	4,508489065	32,71484375	2,324689674
962,7840211	0,512765067	4,537071412	32,71484375	2,326451726
961,8226791	0,508510045	4,559636422	32,71484375	2,31862092
961,8226791	0,505022321	4,587466601	32,71484375	2,316773033
963,2646921	0,501116071	4,61304028	32,71484375	2,311668622
963,7453631	0,496791295	4,637861791	32,71484375	2,304049364
962,7840211	0,491908482	4,661931135	32,71484375	2,293243469
964,2260341	0,48702567	4,685248313	32,71484375	2,281836197

964,7067051	0,482212612	4,710821991	32,71484375	2,271617775
965,1873761	0,475446429	4,728873999	32,71484375	2,248326254
967,1100601	0,470284598	4,75143901	32,71484375	2,234528586
965,6680471	0,461216518	4,764225849	32,71484375	2,197339656
965,6680471	0,453473772	4,777764855	32,71484375	2,166591052
964,7067051	0,444824219	4,787543026	32,71484375	2,129615086
963,7453631	0,435546875	4,797321198	32,95898438	2,089458256
963,2646921	0,426967076	4,807851536	32,95898438	2,052794312
962,7840211	0,417061942	4,813868872	32,95898438	2,0076815
962,7840211	0,407296317	4,822894876	32,95898438	1,96434732
962,7840211	0,397112165	4,828912212	32,71484375	1,917619784
963,2646921	0,387555804	4,837938216	32,95898438	1,874971033
962,3033501	0,375418527	4,838690383	32,95898438	1,816534015
962,3033501	0,364257812	4,843203385	32,95898438	1,764174671
961,3420081	0,352678571	4,844707719	32,95898438	1,708624597
961,3420081	0,342354911	4,850725055	32,95898438	1,660669543
961,3420081	0,332310268	4,856742391	32,95898438	1,613945365
960,861337	0,321079799	4,858246725	32,95898438	1,559884883
961,3420081	0,311732701	4,865768396	32,95898438	1,516819124
960,380666	0,299316406	4,865768396	32,95898438	1,45640431
960,861337	0,288713728	4,870281398	32,95898438	1,406117097
959,899995	0,275878906	4,868024897	32,95898438	1,342985384
960,380666	0,264229911	4,871785732	33,203125	1,287271509
959,899995	0,252441406	4,873290066	32,95898438	1,230220197
960,380666	0,241350446	4,877050901	32,95898438	1,177078412
961,3420081	0,22984096	4,88231607	32,95898438	1,122156212
960,861337	0,21812221	4,883820404	33,203125	1,065269699
961,8226791	0,208426339	4,891342074	33,203125	1,019484523
960,380666	0,194545201	4,888333406	33,203125	0,951001804
961,8226791	0,186383929	4,899615911	33,203125	0,913209662
959,899995	0,173409598	4,895102909	33,203125	0,848857829
959,419324	0,162179129	4,895855076	33,203125	0,794005514
958,938653	0,15171596	4,898863744	33,203125	0,743235815
958,457982	0,140485491	4,899615911	33,203125	0,688324947
958,457982	0,12953404	4,901120245	33,203125	0,634861907
957,977311	0,118024554	4,900368078	33,203125	0,578363755
957,015969	0,104910714	4,895855076	33,203125	0,513627653
957,49664	0,093331473	4,895855076	33,203125	0,456937367
958,457982	0,083217076	4,903376746	33,203125	0,408044675
956,535298	0,068359375	4,892846408	33,203125	0,334471922
957,015969	0,058035714	4,89735941	33,203125	0,284221751
958,457982	0,048828125	4,907889748	33,203125	0,239643054

958,938653	0,038364955	4,911650583	33,203125	0,188435255
959,899995	0,029296875	4,91992442	33,44726563	0,144138411
958,457982	0,015694754	4,915411418	33,203125	0,077146175
958,457982	0,004673549	4,916915752	33,44726563	0,022979447

Χρησιμοποιώντας τους τύπους υπολογισμού της  $R_s$  προκύπτει:

$$R_s = 0,0235 \Omega$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα προσαρμοσμένα δεδομένα σε STC συνθήκες:

V2(STC)	I2(STC)	P (STC)
0,620068112	0,085925066	0,053279394
0,619903299	0,130117994	0,080660574
0,618952244	0,175138711	0,108402498
0,619470833	0,227899706	0,141177221
0,619268104	0,277727654	0,171987878
0,618925814	0,327557985	0,202734093
0,619102835	0,360317325	0,223073478
0,618938724	0,405274284	0,250839948
0,618720559	0,452660805	0,280070547
0,618269354	0,506590951	0,31320966
0,618034628	0,550791007	0,340407915
0,617907904	0,590136668	0,364650112
0,616944354	0,634419423	0,391401481
0,616550051	0,688914489	0,424750264
0,616097529	0,742844635	0,457664744
0,616610625	0,790157914	0,487219765
0,616038683	0,849561891	0,523362988
0,615873923	0,893752436	0,550438819
0,615476242	0,945276797	0,581795411
0,615191221	0,994919819	0,612065938
0,614957725	1,039860145	0,639470029
0,61466884	1,0864945	0,667834313
0,614682417	1,125804571	0,692012275
0,614393532	1,172438926	0,720338892
0,614105612	1,219825448	0,749101653
0,61383125	1,268146682	0,778428064
0,613720597	1,309905319	0,803915874
0,613431711	1,356539674	0,832144453

0,613018859	1,405610699	0,861665867
0,611899944	1,452890293	0,88902349
0,611554701	1,501209152	0,918071515
0,611193975	1,54709134	0,945572906
0,611357386	1,603985403	0,980608324
0,610819125	1,654762373	1,010760505
0,610459519	1,700644561	1,038174661
0,61015922	1,747838998	1,06646008
0,609799614	1,793721185	1,093810487
0,608597892	1,837982586	1,118592327
0,609055484	1,885108557	1,148135705
0,608587083	1,935880751	1,17815202
0,608281902	1,979316742	1,203982552
0,606856606	2,032617934	1,23350762
0,607205165	2,080880256	1,26352124
0,606900143	2,124309067	1,289243478
0,606361562	2,175100409	1,318897282
0,606180932	2,216073443	1,343341464
0,605572596	2,266864784	1,372751192
0,605128119	2,310291195	1,398022164
0,604701656	2,358429883	1,426146456
0,60438141	2,399407715	1,450157418
0,603882295	2,445289902	1,476667279
0,603316324	2,493428591	1,504326171
0,602995865	2,534415996	1,528242366
0,602550155	2,577102207	1,552833335
0,601332044	2,623624879	1,57766971
0,60051279	2,673640136	1,605555096
0,601023817	2,711372631	1,629599528
0,60045688	2,758759153	1,656515912
0,600011011	2,801452502	1,680902348
0,599495335	2,844148225	1,705053594
0,598730866	2,890960377	1,73090721
0,598269297	2,93122417	1,753661423
0,597574635	2,978033953	1,779597552
0,596755953	3,027282776	1,806549019
0,595758511	3,081431109	1,835788808
0,595048201	3,125808962	1,860006999
0,59392353	3,180949383	1,889240688
0,593217084	3,228335905	1,915104012
0,592631219	3,270255577	1,93805555
0,591670999	3,318800034	1,963637733



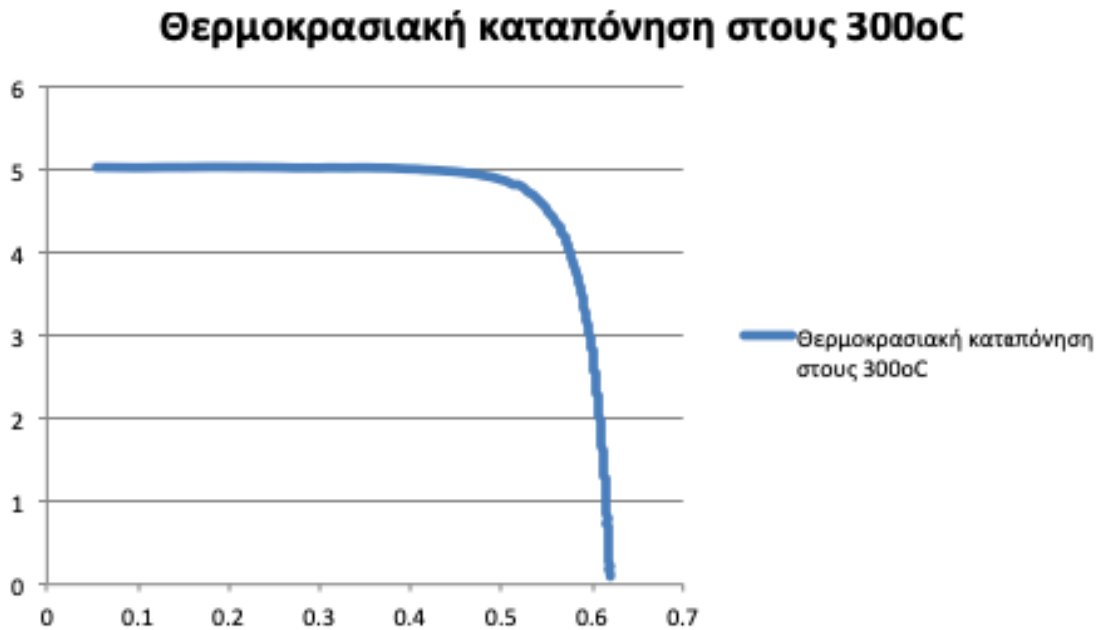
0,590893833	3,365434389	1,988614425
0,58998825	3,411523076	2,01275853
0,589262018	3,452685762	2,034536579
0,588595252	3,495153514	2,057230763
0,587603992	3,538027033	2,07895881
0,58673809	3,579196943	2,100051179
0,585058299	3,620248016	2,118056145
0,58518768	3,658905678	2,141146524
0,583947044	3,705921813	2,164062087
0,582815309	3,748043166	2,184416937
0,581504706	3,795068875	2,20685041
0,580498276	3,835489018	2,226494761
0,579311957	3,880063747	2,247767324
0,577790911	3,926346891	2,268607547
0,576768504	3,963554285	2,286053278
0,575356786	4,004923471	2,304259897
0,574641777	4,03856271	2,320726852
0,572910068	4,083317568	2,339373747
0,571606179	4,11904458	2,354471335
0,570056884	4,1619181	2,372530063
0,567602884	4,199414767	2,383599933
0,566048752	4,239279619	2,399638936
0,564840337	4,282264822	2,418795905
0,562742594	4,323069149	2,432775146
0,560698256	4,3606775	2,445024268
0,558322408	4,40223638	2,457867215
0,55407747	4,450884628	2,466134893
0,552434462	4,486915403	2,478726698
0,550110141	4,523771586	2,488572623
0,547085376	4,558371269	2,493818261
0,544550825	4,594475285	2,501925308
0,540870327	4,634214715	2,506509228
0,537354384	4,666557897	2,507595342
0,534423454	4,693009164	2,508054168
0,53082178	4,722139589	2,506614544
0,526748767	4,755234938	2,504814142
0,522639778	4,778903325	2,497644973
0,517840654	4,803406725	2,487399279
0,51309196	4,823260211	2,474776037
0,508616138	4,843013941	2,463235048
0,501127464	4,864330405	2,437649559
0,495078769	4,883813505	2,417872377

0,488280484	4,903554773	2,394310098
0,480290525	4,918785422	2,362446031
0,472709504	4,936085263	2,333334417
0,46352787	4,946805296	2,292982124
0,456667999	4,956773705	2,263599927
0,446940921	4,967676278	2,22025781
0,437323498	4,974445781	2,17544203
0,426350056	4,983295877	2,124628476
0,416380963	4,987808879	2,076828665
0,406707991	4,996279592	2,032026833
0,396029027	4,999164626	1,979814303
0,38662933	5,004553429	1,934907139
0,374731498	5,009467388	1,877205216
0,365222437	5,010570765	1,829972864
0,352985047	5,013432311	1,769666638
0,342707828	5,013778709	1,718261211
0,330290211	5,01159545	1,655280917
0,320455188	5,013026542	1,606450363
0,309213466	5,013579433	1,550266272
0,298721833	5,01017941	1,496649979
0,288121087	5,011683745	1,443971766
0,276877272	5,010739492	1,387359883
0,265592326	5,013188079	1,331464284
0,252660125	5,016860619	1,26756063
0,243579344	5,017340268	1,222120453
0,232026421	5,019245559	1,164597581
0,220599767	5,020201814	1,107455349
0,211425434	5,019596769	1,061270426
0,200069608	5,021300379	1,004609597
0,189328386	5,022052546	0,950817103
0,176656386	5,021706148	0,88711646
0,164307914	5,020201814	0,824858888
0,15279553	5,017945313	0,766719612
0,142530477	5,018493392	0,715288257
0,129846311	5,017945313	0,651561687
0,11861391	5,016440979	0,59501968
0,109425373	5,014134724	0,548673562
0,096730624	5,013455799	0,484954709
0,08765062	5,014692413	0,439540898
0,075749137	5,016588101	0,380002221
0,064241583	5,018092435	0,3223702
0,054660622	5,017701081	0,274270662

Η μέγιστη ισχύς προκύπτει για:

$$I_{\max} = 0,534423454 \text{ A} \quad V_{\max} = 4,693009164 \text{ V} \quad \text{και} \quad P_{\max} = 2,508054168 \text{ W}$$

Παρακάτω δίνεται η χαρακτηριστική I-V για τις παραπάνω τιμές:



#### 7.4.3 Μετρήσεις κελιού με θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 450°C

Για το κελί που έχει υποστεί θερμοκρασιακή καταπόνηση στους 450°C, οι τιμές της  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  και  $P_{max}$  είναι οι εξής :

- 1<sup>η</sup> ομάδα μετρήσεων

$$I_{mp} = 4,051 \text{ A}$$

$$V_{mp} = 0,463 \text{ V}$$

$$P_{\max} = 1,876 \text{ W}$$

Τα αποτελέσματα της πρώτης ομάδας μετρήσεων απεικονίζονται παρακάτω:

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
891,6447125	0,591936384	0,03008668	33,69140625	0,017809401

891,1640415	0,591378348	0,070703699	33,69140625	0,041812637
891,6447125	0,590820312	0,109816384	33,69140625	0,06488175
891,1640415	0,590122768	0,151185569	33,44726563	0,089218047
890,6833705	0,589494978	0,190298254	33,69140625	0,112179865
891,1640415	0,588797433	0,230915272	33,69140625	0,13596232
891,1640415	0,588169643	0,26927579	33,69140625	0,158379845
892,1253835	0,587541853	0,309892809	33,69140625	0,182074995
890,2026995	0,586704799	0,350509827	33,69140625	0,205645798
889,7220285	0,586007254	0,391879013	33,69140625	0,229643944
889,2413574	0,58530971	0,433248198	33,69140625	0,253584377
890,2026995	0,584612165	0,473865217	33,69140625	0,277027371
889,7220285	0,583914621	0,515234403	33,69140625	0,300852901
889,2413574	0,583147321	0,556603588	33,69140625	0,324581892
890,2026995	0,582449777	0,597972774	33,69140625	0,348289109
890,6833705	0,581821987	0,636333291	33,69140625	0,3702327
890,6833705	0,581054688	0,67695031	33,69140625	0,393345151
889,7220285	0,580287388	0,715310828	33,69140625	0,415085852
890,2026995	0,579520089	0,756680013	33,69140625	0,438511269
890,2026995	0,578892299	0,795040531	33,69140625	0,460242841
890,2026995	0,578194754	0,834905382	33,69140625	0,482737913
889,7220285	0,577566964	0,872513733	33,69140625	0,503935108
888,7606864	0,576799665	0,913130752	33,69140625	0,526693512
889,7220285	0,576171875	0,950739102	33,69140625	0,547789131
888,7606864	0,575404576	0,990603954	33,69140625	0,569998048
888,2800154	0,574707031	1,028212304	33,69140625	0,590920841
887,7993444	0,573869978	1,068077156	33,69140625	0,612937414
887,7993444	0,573172433	1,106437673	33,69140625	0,634179573
887,3186734	0,572405134	1,147054692	33,69140625	0,656579995
887,7993444	0,571707589	1,184663043	33,69140625	0,677280852
888,7606864	0,57094029	1,225280061	33,93554688	0,699561754
888,2800154	0,570172991	1,262888412	33,69140625	0,720064863
888,2800154	0,569405692	1,302753263	33,69140625	0,741795123
887,3186734	0,568638393	1,340361614	33,69140625	0,762181074
887,7993444	0,567871094	1,379474299	33,69140625	0,783363579
888,2800154	0,56703404	1,417082649	33,69140625	0,8035341
887,7993444	0,566196987	1,456947501	33,93554688	0,824919285
888,2800154	0,565429688	1,493803684	33,69140625	0,84464095
887,7993444	0,564592634	1,532916369	33,69140625	0,86547329
888,2800154	0,563825335	1,569772552	33,93554688	0,885077535
886,8380024	0,562918527	1,608885237	33,69140625	0,905671307
887,3186734	0,562081473	1,646493588	33,69140625	0,925463541
886,8380024	0,56124442	1,684854105	33,93554688	0,945614964

887,3186734	0,560407366	1,721710289	33,69140625	0,964859128
887,3186734	0,559570313	1,760822973	33,69140625	0,985304261
887,3186734	0,558733259	1,798431324	33,93554688	1,004843395
888,7606864	0,557896205	1,838296175	33,93554688	1,025578461
888,2800154	0,556989397	1,875152359	33,93554688	1,044439982
890,2026995	0,556222098	1,914265044	33,93554688	1,064756519
888,7606864	0,555245536	1,951121227	33,93554688	1,083351351
888,7606864	0,554338728	1,989481745	33,93554688	1,102846779
888,7606864	0,553501674	2,026337928	33,93554688	1,121581436
888,7606864	0,552525112	2,063946279	33,93554688	1,140382148
888,7606864	0,551688058	2,100050295	33,93554688	1,158572669
888,2800154	0,55078125	2,137658646	33,93554688	1,177382301
887,7993444	0,549804688	2,173762662	33,93554688	1,195144901
887,7993444	0,548897879	2,21212318	33,93554688	1,214229723
887,7993444	0,548060826	2,248979364	33,93554688	1,232577487
884,9153184	0,546875	2,286587714	33,93554688	1,250477656
885,3959894	0,546037946	2,323443898	33,93554688	1,268688535
885,8766604	0,545061384	2,361804415	33,93554688	1,287328383
886,8380024	0,544084821	2,398660599	33,93554688	1,305074824
886,8380024	0,543108259	2,437021116	33,93554688	1,323566295
885,3959894	0,541992188	2,473125133	33,93554688	1,340414501
885,8766604	0,540806362	2,51148565	33,93554688	1,358227417
886,3573314	0,539899554	2,548341834	33,93554688	1,375848619
886,3573314	0,538783482	2,586702352	33,93554688	1,3936725
885,3959894	0,537667411	2,623558535	33,93554688	1,410601924
885,3959894	0,536551339	2,661919053	33,93554688	1,428256233
886,3573314	0,535435268	2,698775236	33,93554688	1,445019441
886,8380024	0,534249442	2,737135754	33,93554688	1,462313249
887,7993444	0,533272879	2,773991937	33,93554688	1,479294668
887,3186734	0,53187779	2,811600288	33,93554688	1,495427748
887,3186734	0,53062221	2,847704304	33,93554688	1,511055151
887,3186734	0,529366629	2,885312655	33,93554688	1,527388235
886,8380024	0,528041295	2,921416672	34,1796875	1,542628641
886,3573314	0,526855469	2,959777189	33,93554688	1,559374798
885,8766604	0,525460379	2,995881206	34,1796875	1,574216875
887,3186734	0,524204799	3,034241723	33,93554688	1,590564073
887,3186734	0,522879464	3,07034574	33,93554688	1,605420736
887,3186734	0,521484375	3,10795409	33,93554688	1,620749496
885,8766604	0,519949777	3,14330594	34,1796875	1,634361222
886,3573314	0,518484933	3,181666457	34,1796875	1,64964612
886,3573314	0,516950335	3,217770474	34,1796875	1,663427524
886,3573314	0,515345982	3,256883159	34,1796875	1,67842165

885,8766604	0,513741629	3,293739342	33,93554688	1,692131017
884,9153184	0,511858259	3,33209986	34,1796875	1,705562833
886,3573314	0,51046317	3,36970821	34,1796875	1,720111934
885,3959894	0,508510045	3,407316561	34,1796875	1,732654696
885,3959894	0,506835938	3,441916243	34,1796875	1,744486846
884,4346474	0,504952567	3,47802026	34,1796875	1,756235258
884,9153184	0,503138951	3,512619942	34,1796875	1,767335913
884,9153184	0,501464844	3,547219625	34,1796875	1,778805935
884,9153184	0,499581473	3,581819307	34,1796875	1,789410566
885,3959894	0,497698103	3,61641899	34,1796875	1,79988487
885,3959894	0,495535714	3,651018672	34,1796875	1,809210146
885,3959894	0,493373326	3,687122689	34,1796875	1,819127984
884,4346474	0,491071429	3,721722371	34,1796875	1,827631522
885,3959894	0,489118304	3,755569887	34,1796875	1,836917972
884,9153184	0,486746652	3,790921737	34,1796875	1,845218462
884,9153184	0,484165737	3,823264918	34,1796875	1,851093875
885,3959894	0,481863839	3,859368935	34,42382813	1,859690332
884,9153184	0,479073661	3,891712116	34,1796875	1,86441677
885,8766604	0,476492746	3,925559632	34,1796875	1,870500687
884,9153184	0,47328404	3,956398479	34,1796875	1,872500257
884,4346474	0,469796317	3,989493827	34,1796875	1,874249507
883,9539764	0,466587612	4,020332675	34,1796875	1,875837421
884,4346474	0,463169643	4,051923689	34,42382813	1,876728048
882,9926344	0,459263393	4,079753869	34,1796875	1,873681604
882,9926344	0,455147879	4,108336215	34,42382813	1,869900516
883,9539764	0,452078683	4,137670729	34,42382813	1,870552734
883,9539764	0,447544643	4,163996574	34,42382813	1,86357436
883,9539764	0,443429129	4,188065918	34,42382813	1,857110424
882,5119634	0,438337054	4,212135263	34,42382813	1,84633496
882,5119634	0,433663504	4,234700273	34,42382813	1,836434961
883,9539764	0,429827009	4,261026119	34,42382813	1,831504111
884,4346474	0,424665179	4,281334628	34,42382813	1,818133734
884,9153184	0,419782366	4,305403972	34,42382813	1,807332666
884,4346474	0,413364955	4,322703813	34,42382813	1,786854269
885,3959894	0,407714844	4,344516657	34,42382813	1,77132393
884,9153184	0,400599888	4,35880783	34,42382813	1,74613793
884,9153184	0,393066406	4,374603337	34,42382813	1,719509613
882,9926344	0,384765625	4,386638009	34,42382813	1,687827515
882,5119634	0,375488281	4,397168348	34,42382813	1,651085185
882,5119634	0,36781529	4,409955187	34,42382813	1,622048947
882,0312924	0,358398438	4,41672469	34,42382813	1,582947228
882,5119634	0,351632254	4,428007195	34,42382813	1,557030153

881,5506214	0,341169085	4,43176803	34,42382813	1,511982243
883,9539764	0,33530971	4,44681137	34,66796875	1,49105903
884,4346474	0,325823103	4,452076539	34,66796875	1,450589391
884,9153184	0,317382813	4,458846042	34,66796875	1,415161097
884,4346474	0,307826451	4,463359045	34,42382813	1,373939974
884,9153184	0,297921317	4,467872047	34,66796875	1,331074324
885,3959894	0,288016183	4,475393717	34,66796875	1,288985816
885,8766604	0,27797154	4,478402385	34,42382813	1,244868408
884,4346474	0,265764509	4,477650218	34,66796875	1,190000511
882,5119634	0,253348214	4,47464155	34,66796875	1,133642446
882,5119634	0,241908482	4,476898051	34,66796875	1,082999612
879,6279374	0,226492746	4,46711988	34,66796875	1,011770246
879,1472664	0,214355469	4,469376381	34,66796875	0,958035269
879,1472664	0,20249721	4,470880715	34,66796875	0,90534087
878,6665954	0,188964844	4,471632882	34,66796875	0,844981409
879,6279374	0,177734375	4,476898051	34,66796875	0,795698677
879,1472664	0,163713728	4,476898051	34,66796875	0,732929668
878,6665954	0,151297433	4,479906719	34,66796875	0,677798387
879,1472664	0,139229911	4,485171888	34,66796875	0,624470081
879,6279374	0,127511161	4,48968489	34,66796875	0,572484932
879,1472664	0,114188058	4,491189224	34,66796875	0,512840176
880,1086084	0,103585379	4,497958727	34,66796875	0,465922762
880,5892794	0,091378348	4,501719562	34,91210938	0,411359698
880,1086084	0,078613281	4,500967395	34,91210938	0,353835816
881,5506214	0,067871094	4,507736898	34,91210938	0,305945034
881,5506214	0,056012835	4,507736898	34,91210938	0,252491122
881,5506214	0,044573103	4,510745566	34,91210938	0,201057925
880,5892794	0,031668527	4,507736898	34,91210938	0,142753387
879,6279374	0,018484933	4,505480397	34,91210938	0,083283503
880,1086084	0,007533482	4,508489065	34,91210938	0,033964622

- 2<sup>η</sup> ομάδα μετρήσεων

$I_{mp}=4,546A$

$V_{mp}=0,462V$

$P_{max}=2,103W$

Τα αποτελέσματα της δεύτερης ομάδας μετρήσεων απεικονίζονται παρακάτω:

Light	Voltage	Current	Temperature	Power
-------	---------	---------	-------------	-------

1003,641056	0,595145089	0,004513002	33,69140625	0,002685891
1004,602398	0,594796317	0,025573678	33,69140625	0,01521113
1004,602398	0,594447545	0,045882188	33,69140625	0,027274554
1005,083069	0,594098772	0,066942864	33,69140625	0,039770673
1005,083069	0,593819754	0,086499206	33,69140625	0,051364937
1005,56374	0,593610491	0,106807716	33,69140625	0,063402181
1004,602398	0,593191964	0,127868392	33,69140625	0,075850503
1005,083069	0,592843192	0,148176901	33,69140625	0,087845667
1004,602398	0,592633929	0,168485411	33,69140625	0,099850171
1005,083069	0,592354911	0,18879392	33,69140625	0,111833006
1005,083069	0,592075893	0,208350262	33,93554688	0,123359167
1004,602398	0,591796875	0,228658771	33,93554688	0,135319546
1006,044411	0,591517857	0,248967281	33,93554688	0,147268592
1006,044411	0,591308594	0,267019289	33,93554688	0,1578908
1007,967095	0,591169085	0,286575631	33,93554688	0,169414654
1007,005753	0,590820313	0,30462764	33,93554688	0,179980197
1007,005753	0,590541295	0,323431815	33,93554688	0,190999843
1007,005753	0,590262277	0,340731656	33,93554688	0,201121043
1007,967095	0,590053013	0,359535831	33,93554688	0,212145201
1008,928437	0,58984375	0,376835673	33,93554688	0,222274166
1008,447766	0,589494978	0,395639848	33,93554688	0,233227703
1007,486424	0,589146205	0,414444023	33,93554688	0,244168124
1006,525082	0,588867188	0,435504699	33,93554688	0,256454428
1007,005753	0,58858817	0,45806971	33,93554688	0,269614412
1003,641056	0,588099888	0,482891221	33,93554688	0,283988273
1002,679714	0,587681362	0,506208399	33,93554688	0,297489241
1001,718372	0,587262835	0,531782077	33,93554688	0,31229585
1001,237701	0,586914063	0,556603588	33,93554688	0,326678473
1002,199043	0,58656529	0,5814251	33,93554688	0,341043782
1001,237701	0,586077009	0,604742277	33,93554688	0,354425545
1001,237701	0,585658482	0,628059454	33,93554688	0,367828347
1002,199043	0,585379464	0,649120131	33,93554688	0,379981594
1003,641056	0,585100446	0,670180807	33,93554688	0,392123089
1003,160385	0,584751674	0,690489316	33,93554688	0,403764784
1004,121727	0,584472656	0,710797826	34,1796875	0,415441893
1004,602398	0,584123884	0,731106335	34,1796875	0,427056672
1004,121727	0,583844866	0,752919178	33,93554688	0,439587997
1004,602398	0,583565848	0,774732022	33,93554688	0,452107149
1003,641056	0,583147321	0,798801366	34,1796875	0,465818877
1003,641056	0,58265904	0,824375044	33,93554688	0,480329572
1003,641056	0,582240513	0,85070089	34,1796875	0,495312523
1003,160385	0,581752232	0,878531069	34,1796875	0,51108741



1003,160385	0,581333705	0,906361249	34,1796875	0,526898343
1002,679714	0,580915179	0,929678426	34,1796875	0,540064309
1005,083069	0,580566406	0,952995603	34,1796875	0,553277233
1004,121727	0,580078125	0,978569282	34,1796875	0,567646634
1004,121727	0,579659598	1,007903795	34,1796875	0,584241109
1001,237701	0,579101562	1,035733974	34,1796875	0,599795163
1001,718372	0,578613281	1,063564154	34,1796875	0,615392345
1001,237701	0,578055246	1,095155168	34,1796875	0,63306019
1002,679714	0,577427455	1,131259185	34,1796875	0,653220112
1001,718372	0,576729911	1,168867535	34,1796875	0,674120869
1001,237701	0,576102121	1,205723719	34,1796875	0,694619991
1002,199043	0,575404576	1,241075568	34,1796875	0,714120561
1001,718372	0,574637277	1,282444754	34,1796875	0,736940561
1001,718372	0,573869978	1,325318274	34,1796875	0,760560368
1000,276359	0,573032924	1,366687459	34,1796875	0,783156911
1000,276359	0,572195871	1,412569647	34,1796875	0,808266519
1000,75703	0,571358817	1,457699668	34,1796875	0,832869558
1001,718372	0,570452009	1,503581855	34,1796875	0,85772129
1002,199043	0,569405692	1,559242214	34,1796875	0,887841392
1002,199043	0,568359375	1,609637404	34,1796875	0,914852509
1002,199043	0,567313058	1,65852826	34,42382813	0,940904739
1001,718372	0,566615513	1,692375775	34,1796875	0,958926369
1002,199043	0,566127232	1,720205955	34,1796875	0,973855436
1001,237701	0,565638951	1,745027466	34,1796875	0,987055505
1000,75703	0,565220424	1,767592476	34,42382813	0,999079369
1000,75703	0,565011161	1,781131483	34,42382813	1,006359166
1001,237701	0,564732143	1,798431324	34,1796875	1,015631975
1002,199043	0,564383371	1,820244167	34,42382813	1,027315538
1000,75703	0,563476563	1,863117687	34,1796875	1,04982315
1000,276359	0,562220982	1,916521545	34,42382813	1,077508625
999,7956884	0,560616629	1,987977411	34,42382813	1,114493195
1000,276359	0,559012277	2,060937611	34,1796875	1,152089426
998,8343464	0,557128906	2,140667314	34,42382813	1,192627639
997,3923334	0,554338728	2,250483698	34,42382813	1,24753027
998,8343464	0,551548549	2,36556525	34,1796875	1,304724082
999,3150174	0,548828125	2,471620799	34,1796875	1,356495009
999,7956884	0,54624721	2,573163345	34,42382813	1,405583298
998,3536754	0,544084821	2,650636548	34,1796875	1,442171113
998,8343464	0,543875558	2,659662552	34,1796875	1,446525454
999,7956884	0,544084821	2,658158218	34,42382813	1,446263539
1000,75703	0,545200893	2,622806368	34,1796875	1,429956374
1000,276359	0,546735491	2,573163345	34,42382813	1,406839725

998,3536754	0,548060826	2,528033325	34,42382813	1,385516032
999,3150174	0,549595424	2,479142469	34,42382813	1,362525357
998,3536754	0,550851004	2,440781951	34,42382813	1,34450719
998,8343464	0,550223214	2,473125133	34,42382813	1,36077086
997,8730044	0,549246652	2,509981316	34,42382813	1,378598834
998,3536754	0,548339844	2,549094001	34,42382813	1,397769806
998,3536754	0,547154018	2,594976189	34,66796875	1,419851648
999,3150174	0,545968192	2,64236271	34,42382813	1,442645992
999,7956884	0,544782366	2,692005733	34,42382813	1,466557253
999,3150174	0,543457031	2,739392255	34,42382813	1,488741982
1001,237701	0,542480469	2,783017941	34,66796875	1,509732877
1000,276359	0,541364397	2,824387127	34,42382813	1,529022635
1000,276359	0,54031808	2,863499812	34,42382813	1,547200721
999,7956884	0,539271763	2,901108162	34,42382813	1,564485714
999,7956884	0,538016183	2,942477348	34,42382813	1,583100431
1000,276359	0,536969866	2,982342199	34,42382813	1,601427891
999,7956884	0,53578404	3,021454884	34,42382813	1,618847305
997,8730044	0,534458705	3,06282407	34,42382813	1,636952987
996,9116623	0,533063616	3,105697589	34,66796875	1,655534387
996,9116623	0,531598772	3,153084111	34,42382813	1,676175642
994,0276363	0,529854911	3,203479301	34,42382813	1,697379239
993,5469653	0,528320313	3,252370156	34,66796875	1,718293217
993,0662943	0,52671596	3,302013179	34,42382813	1,739223041
992,5856233	0,524553571	3,365195208	34,66796875	1,765225165
994,5083073	0,522460938	3,431385905	34,66796875	1,792765097
994,0276363	0,520298549	3,492311433	34,66796875	1,817044572
994,5083073	0,518484933	3,546467458	34,42382813	1,838789942
995,9503203	0,516810826	3,594606147	34,42382813	1,857731371
996,9116623	0,515066964	3,643497002	34,66796875	1,87664494
996,9116623	0,513462612	3,687122689	34,66796875	1,893199645
1000,75703	0,512765067	3,718713703	34,66796875	1,906826481
999,7956884	0,511439732	3,752561219	34,66796875	1,919208905
999,7956884	0,509905134	3,786408734	34,66796875	1,930709253
1000,276359	0,50844029	3,823264918	34,66796875	1,943901924
999,7956884	0,50655692	3,865386271	34,66796875	1,958038162
999,7956884	0,505022321	3,901490287	34,66796875	1,970339682
998,3536754	0,502022879	3,959407147	34,66796875	1,987712977
994,9889783	0,498395647	4,018076174	34,66796875	2,002591676
995,9503203	0,495744978	4,070727865	34,66796875	2,018042894
995,9503203	0,492675781	4,125636056	34,66796875	2,032600967
997,3923334	0,489885603	4,180544248	34,66796875	2,047988439
995,9503203	0,486467634	4,233195939	34,66796875	2,059312812

995,9503203	0,483049665	4,286599797	34,66796875	2,070640597
995,4696493	0,480678013	4,320447312	34,66796875	2,076744031
995,9503203	0,478794643	4,35128616	34,66796875	2,083372503
994,9889783	0,47719029	4,37385117	34,66796875	2,087159309
994,9889783	0,475516183	4,396416181	34,66796875	2,090567041
994,9889783	0,473981585	4,420485525	34,66796875	2,095228735
994,9889783	0,472586496	4,4392897	34,66796875	2,097948362
995,4696493	0,471051897	4,462606878	34,66796875	2,102119437
994,0276363	0,468610491	4,485171888	34,66796875	2,101798601
994,0276363	0,465820313	4,511497733	34,66796875	2,101547284
994,0276363	0,462751116	4,546097416	34,66796875	2,103711653
993,5469653	0,459402902	4,578440597	34,66796875	2,103348896
993,0662943	0,456473214	4,608527278	34,66796875	2,10366926
992,5856233	0,451799665	4,644631294	34,66796875	2,098442864
994,0276363	0,448172433	4,680735311	34,66796875	2,097776533
994,5083073	0,443010603	4,715334993	34,66796875	2,088943397
994,9889783	0,437918527	4,747678175	34,66796875	2,079096232
993,0662943	0,431501116	4,778517022	34,66796875	2,061935428
994,5083073	0,426060268	4,808603703	34,91210938	2,048754982
994,0276363	0,420131138	4,842451218	34,66796875	2,034464543
994,5083073	0,414341518	4,865768396	34,66796875	2,016089863
994,5083073	0,40750558	4,893598575	34,91210938	1,994168727
993,0662943	0,398297991	4,910146249	34,91210938	1,955701387
993,5469653	0,390904018	4,931206926	34,91210938	1,9276286
992,5856233	0,381835937	4,945498099	34,91210938	1,888368903
991,6242813	0,372000558	4,959789272	34,91210938	1,845044377
991,1436103	0,361397879	4,975584779	34,91210938	1,798165788
990,6629393	0,348632813	4,986867284	34,91210938	1,738585567
988,7402553	0,338030134	4,992132453	34,91210938	1,687491202
989,2209263	0,32686942	4,999654124	34,91210938	1,634234042
990,1822683	0,31968471	5,012440963	34,91210938	1,602400735
990,1822683	0,30796596	5,016201798	34,91210938	1,544819401
991,1436103	0,297363281	5,022971301	34,91210938	1,493647228
990,1822683	0,285923549	5,022971301	34,91210938	1,436185781
991,1436103	0,273646763	5,030492971	34,91210938	1,37657812
993,0662943	0,264508929	5,041023309	34,91210938	1,333395674
992,5856233	0,252790179	5,042527643	34,91210938	1,274701463
993,5469653	0,242536272	5,048544979	34,91210938	1,22445528
993,0662943	0,231375558	5,049297146	34,91210938	1,168283945
993,0662943	0,221958705	5,056066649	35,15625	1,122238008
991,6242813	0,207380022	5,052305814	34,91210938	1,047747293
991,6242813	0,195870536	5,055314482	35,15625	0,990187156

990,6629393	0,177734375	5,053810148	34,91210938	0,898235788
991,1436103	0,160923549	5,059075317	34,91210938	0,814124355
990,6629393	0,142508371	5,059827484	35,15625	0,72106777
990,1822683	0,123046875	5,060579651	35,15625	0,622688512
992,1049523	0,107631138	5,069605656	35,15625	0,545647428
992,1049523	0,089913504	5,071862157	35,15625	0,456028901
994,0276363	0,078822545	5,085401163	35,15625	0,40084426
992,1049523	0,063406808	5,081640328	35,15625	0,322210593
992,1049523	0,051618304	5,08615333	35,15625	0,262538607
991,6242813	0,03843471	5,089161998	35,15625	0,195600465
991,6242813	0,025669643	5,094427167	35,15625	0,130772126
991,1436103	0,012207031	5,098188002	35,15625	0,06223374

Χρησιμοποιώντας τους τύπους υπολογισμού της  $R_s$  προκύπτει:

$$R_s = 0,0766 \Omega$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα προσαρμοσμένα δεδομένα σε STC συνθήκες:

V2(STC)	I2(STC)	P(STC)
0,630657345	0,031750732	0,020023832
0,629483722	0,080761171	0,050837842
0,628590502	0,128191796	0,080580146
0,62783583	0,174872381	0,109791146
0,627359643	0,216947504	0,136104109
0,626779091	0,261325357	0,16379327
0,626854099	0,306382136	0,192056898
0,625758083	0,346986312	0,21712949
0,625281415	0,389067805	0,243276867
0,626779412	0,41810918	0,262062226
0,62474191	0,467154879	0,291851231
0,624821943	0,512211657	0,320041083
0,622954028	0,558984178	0,348221446
0,622303722	0,603362032	0,375474438
0,622280296	0,647702272	0,403052362
0,621318142	0,694374369	0,431427393
0,620248564	0,740338397	0,459193828
0,618549681	0,787090098	0,486854329
0,618703184	0,828386042	0,512525082
0,616867651	0,886612279	0,546922434

0,616145397	0,927981465	0,571771508
0,615495355	0,971607151	0,598019689
0,614101892	1,013801746	0,622577571
0,613801278	1,053554927	0,646673361
0,613716824	1,097162136	0,673346862
0,613521488	1,134612604	0,696109214
0,613217278	1,171374199	0,718306897
0,612672203	1,213451447	0,743447972
0,611533047	1,260176136	0,770639353
0,611091463	1,299198487	0,793929104
0,610299455	1,340567672	0,81814772
0,608515363	1,386567206	0,843747447
0,608857405	1,425562545	0,867964312
0,607581197	1,474543734	0,895905048
0,606789189	1,51591292	0,919839572
0,605580454	1,563398292	0,946763448
0,603787876	1,607149848	0,970377592
0,603649639	1,653013558	0,997841038
0,602857631	1,694382743	1,021471567
0,602173035	1,735697164	1,045190029
0,601380208	1,776314183	1,068240192
0,600834958	1,817630742	1,092096091
0,599379314	1,865933728	1,118402078
0,598275222	1,911874965	1,143827419
0,597062088	1,957129529	1,168527842
0,596377321	1,997683201	1,191372955
0,595515558	2,039052387	1,21428742
0,594410322	2,084245754	1,238897189
0,594074145	2,118661843	1,258642222
0,593038987	2,163850914	1,283247955
0,592421193	2,202152382	1,304601741
0,59082622	2,251978997	1,330528238
0,590069241	2,290276168	1,351421521
0,588964005	2,335469536	1,375507491
0,588031669	2,376086554	1,397214142
0,586925451	2,420529908	1,420670607
0,585747677	2,463471083	1,442972464
0,584923727	2,504020446	1,464660971
0,583815708	2,546961621	1,486956201
0,583482144	2,582869136	1,507058022
0,582058602	2,627375836	1,529286707
0,58105815	2,669497188	1,551133098

0,580406938	2,705472358	1,570274926
0,579511926	2,745276013	1,59092019
0,579173138	2,778200642	1,609059183
0,577437991	2,826510051	1,632134284
0,575524061	2,875658605	1,655010719
0,574031424	2,921682584	1,677137616
0,572957942	2,960795269	1,696411163
0,570547574	3,015428725	1,720445545
0,569333764	3,053789242	1,738625322
0,568300224	3,092816915	1,757648546
0,567333817	3,129590266	1,775522392
0,566615959	3,166287314	1,794068922
0,564979226	3,209319969	1,813199112
0,564121859	3,246017017	1,831149153
0,563576078	3,277385604	1,847056124
0,562365543	3,318754789	1,866353339
0,561151732	3,357115307	1,88385107
0,559800869	3,397732325	1,90205351
0,559219712	3,426800522	1,916334401
0,557728521	3,466665374	1,933458153
0,556375201	3,505025891	1,950109487
0,554288514	3,552608915	1,969170317
0,553040304	3,587893109	1,984249496
0,551549113	3,627757961	2,000886687
0,549917595	3,666870645	2,016476686
0,548496978	3,707487664	2,033545778
0,546444994	3,752002988	2,050263249
0,546147586	3,779446604	2,064135638
0,544062016	3,820874839	2,078792869
0,542291808	3,860739691	2,093647507
0,539892029	3,905242088	2,108409074
0,538049609	3,942850439	2,121449136
0,536208827	3,981963123	2,135163774
0,53422526	4,01806714	2,146552961
0,531822373	4,060321648	2,159369892
0,529276867	4,100328291	2,17020891
0,527086493	4,138688808	2,181446971
0,523799433	4,184211248	2,191687481
0,521784253	4,218728099	2,201265888
0,519096449	4,258008627	2,21031716
0,516801596	4,291771131	2,217994172
0,514854532	4,324783647	2,226634461

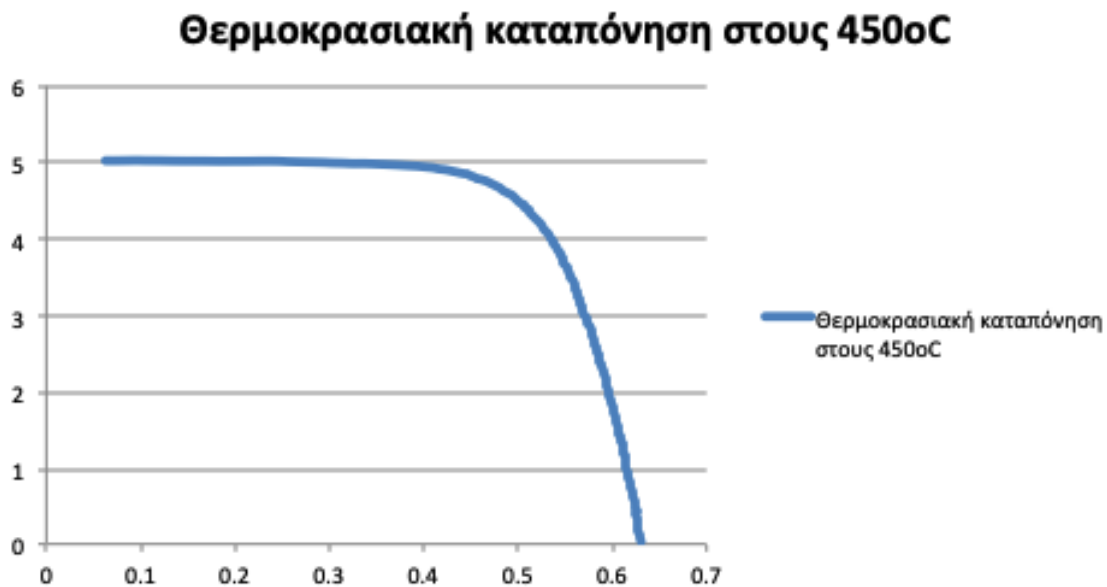
0,513205344	4,360062254	2,237607247
0,511609971	4,386904821	2,244384248
0,508069997	4,419247103	2,245286865
0,506141585	4,45226921	2,253478596
0,501968651	4,489272777	2,253474199
0,499427183	4,517709005	2,256266684
0,497083486	4,551483279	2,262467172
0,493279648	4,580817792	2,259624186
0,489421196	4,610088077	2,25627482
0,484844128	4,641816562	2,250557503
0,481521873	4,671077833	2,249226149
0,476593642	4,700558465	2,24025628
0,471494103	4,729217121	2,229797984
0,467091107	4,757125781	2,222011146
0,460844113	4,782020535	2,203766012
0,456434328	4,806849459	2,194011104
0,449900855	4,827910135	2,172080898
0,445854028	4,845726698	2,160486766
0,438653481	4,866863684	2,134866695
0,432572794	4,883335049	2,112397885
0,423969527	4,906135505	2,080051948
0,416210037	4,918089522	2,04695822
0,410028451	4,933730239	2,022969769
0,401251112	4,944260577	1,983890055
0,393458657	4,954644797	1,949447887
0,382019814	4,963064752	1,895989074
0,370759273	4,971414899	1,843198173
0,35956581	4,977510716	1,789742671
0,348760567	4,983528052	1,738058068
0,33721733	4,988873876	1,682334727
0,325119665	4,988793221	1,621954781
0,314522848	4,99405839	1,570745468
0,302280392	4,99789988	1,510767133
0,293436742	5,003005913	1,468065754
0,279301445	5,007008716	1,398464768
0,271161296	5,00894694	1,358232543
0,257236592	5,013695387	1,289705917
0,246112555	5,019795555	1,23543471
0,233628181	5,021299889	1,173117158
0,222018124	5,02046489	1,114634199
0,211532952	5,019477278	1,061784846
0,199604939	5,019477278	1,001912454

0,184279284	5,018960556	0,92489046
0,170279997	5,02071993	0,854928172
0,158532436	5,021384902	0,79605238
0,142495986	5,021842772	0,715592439
0,130499893	5,023347106	0,655546261
0,118742721	5,025701765	0,596765501
0,105518863	5,026554291	0,530396295
0,096116804	5,028612275	0,483334141
0,084189823	5,027034699	0,423225161
0,072367951	5,025507648	0,36368569
0,062756639	5,026001239	0,315414945

Η μέγιστη ισχύς προκύπτει για:

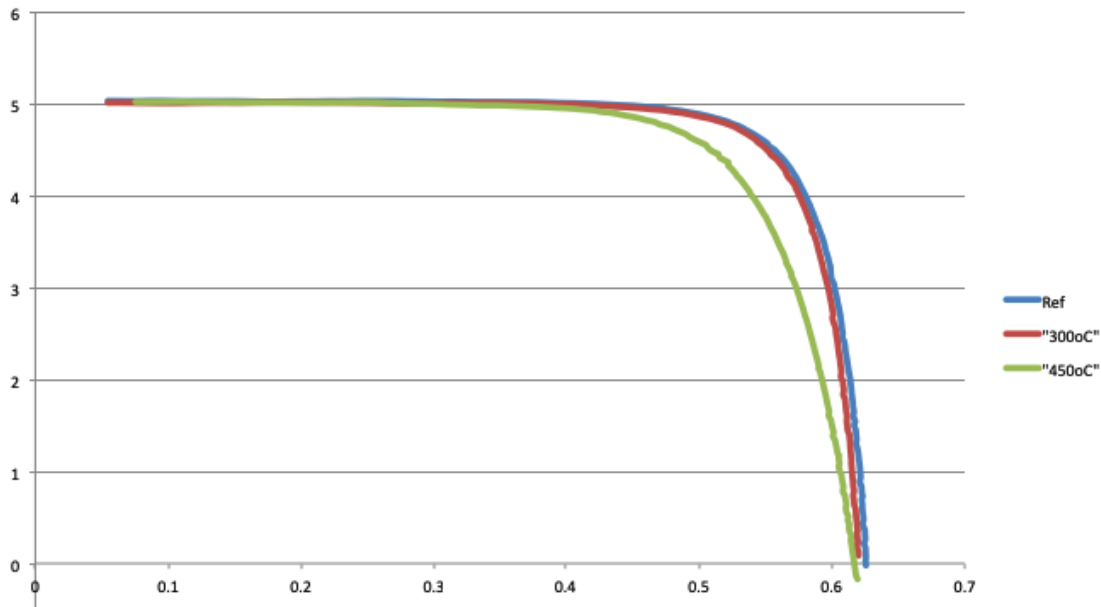
$I_{\max} = 0,497083486 \text{ A}$  ,  $V_{\max} = 4,551483279 \text{ V}$  και  $P_{\max} = 2,262467172 \text{ W}$

Παρακάτω δίνεται η χαρακτηριστική I-V για τις παραπάνω τιμές:





Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές για τις 3 θερμικές καταπονήσεις:



Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθεται η τιμή της μέγιστης ισχύος για τις 3 θερμικές καταπονήσεις:

Θερμοκρασία(°C)	Ρεύμα I (A)	Τάση V (V)	Ισχύς P (W)
0	0,539329282	4,690692479	2,529827807
300	0,534423454	4,693009164	2,508054168
450	0,497083486	4,551483279	2,262467172

## 7.5 Συμπεράσματα

Όπως είχε επισημανθεί και στο Κεφάλαιο 5, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η θερμοκρασία του κελιού στην απόδοση του. Στο Κεφάλαιο αυτό μέσω της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήσαμε, διαπιστώσαμε στην πράξη ότι αυτό ισχύει. Πιο συγκεκριμένα, με τη θέρμανση του στοιχείου στους 300°C παρατηρείται μείωση της παρεχόμενης ισχύος κατά 0,86%, ποσοστό σχετικά αμελητέο. Μετά τη θέρμανση στους 450 °C παρατηρείται μείωση της ισχύος κατά 10,56%, ποσοστό αρκετά σημαντικό που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Τα προηγούμενα συμπεράσματα διαφαίνονται και από το συγκεντρωτικό διάγραμμα των χαρακτηριστικών, όπου παρατηρούμε μικρή απόκλιση μεταξύ των καμπυλών αναφοράς και 300 °C, ενώ υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των καμπυλών αναφοράς και 450 °C γεγονός που μειώνει το εμβαδό του τετραγώνου μέγιστης ισχύος ( $I_{max}, V_{max}$ ).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ από τη Θεωρία στην Πράξη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 2013
- [2] [https://selasenergy.gr/fv\\_systems.php#bookmark2](https://selasenergy.gr/fv_systems.php#bookmark2)
- [3] Στέφανος Ε. Τετελενης, Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2011
- [4] Αναστάσιος Κωνσταντίνος Φυσέας, Φωτοβολταϊκά συστήματα και μελέτη απόδοσής τους για την πόλη της Θεσσαλονίκης , Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη , 2018
- [5] <https://sinovoltaics.com/learning-center/materials/ethylene-vinyl-acetate-eva-film-composition-and-application/>
- [6] Thermomechanics of photovoltaic modules, zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur, Dipl.-Math. techn. Ulrich Eitner, März 2011
- [7] The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review , Michele Cândida Carvalho de Oliveiraa, Antônia Sonia Alves Diniz Cardosob, Marcelo Machado Vianac, Vanessa de Freitas Cunha Lins. June 2017
- [8] [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5786/3/02\\_chapter\\_07.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5786/3/02_chapter_07.pdf)
- [9] [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC\\_WORK/scient\\_typopoiisi](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/scient_typopoiisi)