

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ Φ/Β
ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΜΑΥΡΟΥΔΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ
ΠΑΠΙΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΠΛΑΝΗΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ
Δρ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΠΑΤΡΑ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ηπίων Μορφών Ενέργειας του Τμήματος Μηχανολογίας του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στη μελέτη της συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών υπό συνθήκες αυξημένης ακτινοβολίας. Η εφαρμογή των αποτελεσμάτων της εργασίας μπορεί να οδηγήσει σε δραματική μείωση του κόστους παραγωγής ανα μονάδα ισχύος από φωτοβολταϊκά, επιτρέποντας την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους σε συγκεντρωτικά συστήματα.

Παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά και η αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού και η συμπεριφορά του κάτω από συνήθεις συνθήκες λειτουργίας. Στη συνέχεια περιγράφεται ποιοτικά η συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Αναλύονται στοιχεία που αφορούν τη διεξαγωγή των πειραμάτων και τις συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων και γίνεται ανάλυση αυτών για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Σωκράτη Καπλάνη, Δρ. Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας, για τη διάθεση του εξοπλισμού του εργαστηρίου, τις παρααινέσεις και την καθοδήγησή του.

Μαυρουδής Απόστολος
Παππάς Νικόλαος
Απρίλιος 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην ενεργειακή συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου υπό συνθήκες αυξημένης ακτινοβολίας. Η διερεύνηση της εξάρτησης των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών από την ένταση της ακτινοβολίας, θα μπορούσε να οδηγήσει στον σχεδιασμό και κατασκευή μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά με τη χρήση συγκεντρωτικών συστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο ενδέχεται να ελαττωθεί δραματικά το κόστος παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά και κατά συνέπεια να ενισχυθεί η διείδυσή τους στη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αναλύονται στοιχεία από την δομή και τον τρόπο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών. Αναλύεται η αρχή λειτουργίας τους και παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιοι βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών. Κατόπιν γίνεται παρουσίαση των μεγεθών που χαρακτηρίζουν την λειτουργία του φωτοβολταϊκού και αναλύονται θέματα που αφορούν την επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας στην αποδιδόμενη τάση και ρεύμα. Τέλος παρατίθενται θεωρητικά μοντέλα που περιγράφουν την λειτουργία των φωτοβολταϊκών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας μας γίνεται συνοπτική παρουσίαση της πειραματικής διάταξης και της διαδικασίας η οποία ακολουθήθηκε. Αναλύονται οι δυνατότητες του εξοπλισμού που ήταν διαθέσιμος για το πείραμα, καθώς και κρίσιμες παράμετροι οι οποίες ήταν απαραίτητο να ελέγχονται κατά την εκτέλεση των μετρήσεων.

Το τρίτο και τελευταίο μέρος της εργασίας μας περιλαμβάνει τμήματα των πειραματικών μετρήσεων κατά τρόπον ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να σχηματίσει εικόνα για τα πειράματα που εκτελέστηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι υπολογισμοί που έγιναν και παρατίθενται συμπεράσματα που αφορούν την επίδραση της αυξημένης ακτινοβολίας στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού. Η ανωτέρω ανάλυση δεν αποσκοπούσε στην δημιουργία μεθόδων προσδιορισμού των μελετούμενων μεγεθών, αλλά σε ποιοτική περιγραφή της μεταβολής στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού, λόγω της αύξησης της ακτινοβολίας.

Αξίζει να αναφερθούμε σε αυτό το σημείο στην περιπλοκότητα των πειραμάτων που εκπονήθηκαν. Για την σωστή εκτέλεσή τους χρειάζεται να

ελεγχθούν τα επίπεδα ακτινοβολίας από πηγές εκτός της πειραματικής διαδικασίας, καθώς επίσης και του αποκλεισμού δημιουργίας ρευμάτων αέρα στο χώρο του πειράματος από εξωτερικές πηγές. Εάν δεν επιτευχθούν οι παραπάνω συνθήκες, δεν θα είναι δυνατό να εκτελεσθεί το πείραμα κατά τρόπον ώστε να ληφθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	1
2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	2
3. ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ - ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ.....	2
4. Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	4
5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	6

1. ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

1.1. Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	7
1.2 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΑΠΟ ΠΥΡΙΤΙΟ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΤΟΥΣ ΠΛΕΓΜΑ.....	8
1.3 ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ – ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	9
1.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	10
1.4.1 Χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ φωτοβολταϊκού.....	11
1.4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στην τάση και το ρεύμα.....	15
1.4.3 Επίδραση της ακτινοβολίας στα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού.....	16
1.4.4 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	18

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	21
2.1.1 Περιγραφή του datalogger CR1000.....	23
2.1.2 Περιγραφή του ηλεκτρονικού φορτίου.....	27
2.1.3 Φωτοβολταϊκό και διάταξη στήριξης.....	28
2.1.4 Περιγραφή της διάταξης φωτισμού και ελέγχου της έντασης της ακτινοβολίας.....	29

2.1.5 Περιγραφή της διάταξης ελέγχου και μέτρησης της θερμοκρασίας.....	30
2.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	31

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	35
3.1.1 Αποτελέσματα πρώτης σειράς μετρήσεων.....	35
3.1.2 Αποτελέσματα δεύτερης σειράς μετρήσεων – I-V.....	62
3.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	
3.2.1 Μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας.....	82
3.2.2 Εξάρτηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος από την θερμοκρασία.....	89
3.2.3 Εξάρτηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος από την θερμοκρασία.....	94
3.2.4 Μέγιστη ισχύς και βαθμός ενεργειακής απόδοσης.....	96
3.2.5 Εξάρτηση αντίστασης εν σειρά, αντίστασης διαρροής και παράγοντα πλήρωσης από την θερμοκρασία.....	98

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	101
--------------------------	------------

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Η περίπτωση της άμεσης μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική μέσω του φωτοβολταϊκού (Φως-Volt) φαινομένου, που αρχικά μελετήθηκε από το Γάλλο φυσικό *Becquerel*, (1839), είναι μία πρόκληση για μελέτη και εφαρμογές, με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, φυσικών πόρων, αλλά και προστασίας του περιβάλλοντος και της υγείας. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν αναλογιστούμε ότι αντί της καύσης άνθρακα, C, ή υδρογονανθράκων που ρυπαίνουν το περιβάλλον με μονοξείδιο του άνθρακα, CO, διοξείδιο του άνθρακα, CO₂ και οξείδια αζώτου, N και θείου, S, κλπ, είναι δυνατόν μέσω του φαινομένου αυτού, να επιτύχουμε απ' ευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο.

Το 1877 οι επιστήμονες, *Adams* και *Day*, από το Cambridge, παρουσίασαν στην Royal Society, την εργασία τους επί των μεταβολών των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του στοιχείου Σεληνίου, Se, όταν εκτίθεται στο φως. Το 1883, ο *Charles Edgar Fritts*, από την Νέα Υόρκη κατασκεύασε ένα φωτοστοιχείο (solar cell) από Σελήνιο που μοιάζει, κατ' αρχήν, με τα σημερινά στοιχεία.

Εκατό και πλέον χρόνια από την παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου από τον *Becquerel*, ερευνητές των εργαστηρίων Bell τελειοποίησαν την πρώτη σύγχρονη φωτοβολταϊκή κυψελίδα (1954). Το σύστημα που παρουσίασαν αποτελείτο από πυρίτιο με σχηματισμό επαφής p-n και απόδοση 6%. Τέσσερα χρόνια αργότερα τα πρώτα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιήθηκαν για να παρέχουν ισχύ σε ένα δορυφόρο.

Από τη δεκαετία του '60, στην οποία συνετελέσθη η πρώτη μεγάλη έκρηξη στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές με κόστος των φωτοβολταϊκών 1000 \$/Wp και απόδοση των στοιχείων 5-10%, επιτεύχθηκε σήμερα ελάττωση του κόστους κατά 200 φορές, 5\$/Wp σε εγκαταστάσεις 50-100 KWp.

Στη δεκαετία του '80 οι προσπάθειες μείωσης του κόστους βιομηχανικής παραγωγής των φωτοβολταϊκών στοιχείων οδήγησαν στη χρησιμοποίηση οικονομικότερων μεθόδων παραγωγής του ενεργού υλικού. Οι μέθοδοι αυτοί χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία πολύ λεπτών στρωμάτων σε επιφάνεια που επιτρέπει την πρόσφυση του υλικού.

2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Βασικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών διατάξεων είναι η απουσία κινούμενων τμημάτων και η σχετικά αυξημένη ενεργειακή τους αυτονομία. Επίσης η μεγάλη διάρκεια ωφέλιμης ζωής τους που αγγίζει τα 25 έτη, η αφθονία πρώτης ύλης για την κατασκευή τους καθώς το πυρίτιο είναι το δεύτερο πιο κοινό στοιχείο στη γη, η χαμηλή αναλογία βάρους ανά αποδιδόμενη μονάδα ισχύος (100W/Kg), που είναι σημαντική ιδιότητα στις διαστημικές εφαρμογές, οι περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης, η αθόρυβη λειτουργία τους και η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον.

Μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορούν εύκολα να τροφοδοτηθούν με ενέργεια συστήματα που τοποθετούνται σε μη διασυνδεδεμένες με το δίκτυο περιοχές, όπως σταθμοί αναμετάδοσης τηλεπικοινωνιακών δικτύων, οι οποίοι τοποθετούνται σε κορυφές βουνών.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μειονεκτούν όσον αφορά το αυξημένο κόστος παραγωγής, την μικρή απόδοση που φτάνει μόλις το 10 – 15%, την αυξημένη επιφάνεια εγκατάστασης η οποία απαιτείται ανα μονάδα ενέργειας. Ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα της τεχνολογίας μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι ο ετεροχρονισμός παραγωγής και ζήτησης, καθώς κατά τις περιόδους στις οποίες υπάρχει αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, τη νύχτα για φωτισμό και το χειμώνα για θέρμανση, δεν είναι διαθέσιμη αρκετή ή καθόλου ηλιακή ενέργεια.

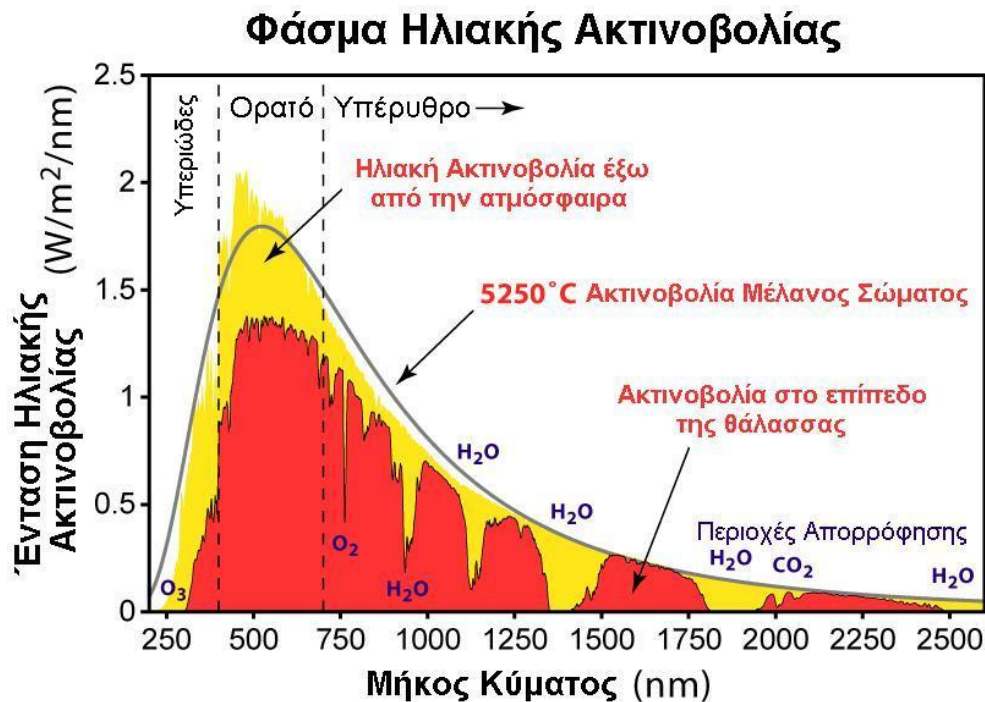
Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιήθηκε αρχικά λόγω περιορισμένου βάρους, για την παραγωγή ενέργειας σε διαστημικές εφαρμογές τη δεκαετία του '60. Αργότερα δοκιμάστηκε με επιτυχία και σε άλλους τομείς, ιδιαίτερα για την κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών σε απομονωμένες περιοχές με μικρή εγκατεστημένη ισχύ, όπου η κατασκευή ηλεκτρικού φορτίου είναι δαπανηρή.

Στην Ελλάδα οι δυνατότητες εφαρμογής των φωτοβολταϊκών διατάξεων είναι ευρύτατες. Εδώ και καιρό οι φάροι ηλεκτροδοτούνται μέσω τέτοιων διατάξεων και συστημάτων αποθήκευσης με συσσωρευτές. Επίσης αρκετές μονάδες φωτοβολταϊκών έχουν εγκατασταθεί σε περιοχές με λίγους κατοίκους για την ηλεκτροδότησή τους.

3. ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ - ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ

Φως ονομάζεται εκείνη η περιοχή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η οποία γίνεται αντιληπτή από την ανθρώπινη όραση. Το ορατό φως αποτελεί τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας την οποία εκπέμπει ο ήλιος,

περίπου το 40% αυτής, και περιλαμβάνει μήκη κύματος από 400 nm στην περιοχή του ιώδους έως 700 nm στην περιοχή του ερυθρού (Σχ.1).



Σχήμα 1: Φασματομετρική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας, και την επιφάνεια της θάλασσας. Κάποια μήκη κύματος απορροφώνται από την ατμόσφαιρα.

Κατά τη διάρκεια των αιώνων έγιναν πολλές προσπάθειες από επιστήμονες για την κατανόηση της φύσης του φωτός και των φαινομένων τα οποία το περιλαμβάνουν. Ο *Ήρωνας* διατύπωσε την Αρχή που φέρει το όνομά του και λέει ότι «το φως διαδιδόμενο από ένα σημείο σε άλλο ακολουθεί την συντομότερη οδό» η οποία το 1662 εκφράστηκε από τον *Φερμά* στην έννοια του χρόνου και ονομάστηκε Αρχή του ελαχίστου χρόνου.

Όντας, η φύση του φωτός, ένα από τα ελκυστικότερα θέματα που απασχόλησαν τον άνθρωπο, μεγάλα ονόματα της επιστήμης άρχισαν να ασχολούνται προσπαθώντας να διατυπώσουν τη θεωρία που θα την εξηγούσε καλύτερα. Ο *Ισαάκ Νεύτων* ήταν ο πρώτος που διατύπωσε μια θεωρία που εξηγούσε κάπως ικανοποιητικά μέρος των φαινομένων που έχουν σχέση με το φως. Η θεωρία του έλεγε ότι «τα φωτεινά σώματα εκπέμπουν σωματίδια, τα οποία κινούνται ευθύγραμμα και με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός. Τα σωματίδια αυτά ανακλώνται στο μάτι και προκαλούν τη ανάλογη αίσθηση, αντίληψη».

Σε μεγάλη αντιπαράθεση με τη θεωρία αυτή, ήταν εκείνη του *Χόυχενς* ο οποίος υποστήριζε ότι «το φως αποστέλλεται κατά κύματα από περιοδικές «διαταραχές» (μεταβολές) κάποιου υποθετικού μέσου. Αίτιο των μεταβολών αυτών ήταν οι φωτεινές πηγές, ενώ το υποθετικό μέσο ήταν ο αιθέρας».

Χρόνια αργότερα ο *Μάξγουελ* διατύπωσε την *ηλεκτρομαγνητική θεωρία*, που φέρει το όνομά του, βασιζόμενος στη θεωρία του *Χούχενς*, που υποστήριζε ότι «το φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ξεκινούν από φωτεινή πηγή». Τη θεωρία αυτή επιβεβαίωσε αργότερα ο *Χέρτζ* με τα πειράματα που έκανε.

Ως τα τέλη του 19^{ου} αιώνα αυτή ήταν και η πλέον παραδεκτή θεωρία για τη φύση του φωτός. Τότε όμως παρατηρήθηκε ένα νέο φαινόμενο που δεν μπορούσε να εξηγηθεί από την κυματική, το λεγόμενο *φωτοηλεκτρικό*. Παρατηρήθηκε λοιπόν πως όταν φωτεινή δέσμη μικρού μήκους κύματος προσπέσει σε μεταλλική πλάκα αποσπώνται απ' αυτήν ηλεκτρόνια *αμέσως και ανεξάρτητα από την ισχύ της δέσμης*. Αν λοιπόν το φως είναι κύμα, θα έπρεπε να περάσει κάποιος χρόνος έως ότου το ηλεκτρόνιο αποσπασθεί, δεδομένου ότι θα έπρεπε να απορροφήσει κάποια ενέργεια. Τη λύση στο πρόβλημα έδωσε ο φυσικός *Μαξ Πλανκ* διατυπώνοντας τη *θεωρία των κβάντα* σύμφωνα με την οποία «το φως ως ενέργεια ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου εκπέμπεται και διαδίδεται στο χώρο κατά στοιχειώδη ποσά (δηλαδή ούτε συνέχεια ούτε ομοιόμορφα κατ' έκταση) που καλούνται *κβάντα ενέργειας*». Τα κβάντα ενέργειας που ανάγονται στο φως ονομάζονται *φωτόνια*.

4. Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο ήλιος εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελεί διαδιδόμενη διαταραχή συνδυασμένου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Η ταχύτητα διάδοσής της στο κενό προσεγγίζει τα 300000 Km/s. Η εκπομπή της γίνεται από τα θεμελιώδη σωματίδια της ύλης και εξαρτάται από τη θερμοκρασία των σωμάτων (θερμική ακτινοβολία) καθώς και από τις ηλεκτρονικές αποδιεγέρσεις των θεμελιωδών σωματιδίων της ύλης που προκαλούνται από άλλες αιτίες πέραν της θερμοκρασίας.

Για την περιγραφή της εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα θερμό σώμα χρησιμοποιείται το μοντέλο του «Μέλανος σώματος». Το μέλαν σώμα αποτελεί ένα ιδανικό απορροφητή και εκπομπό ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Όταν προσπίπτει ακτινοβολία στο μέλαν σώμα, αυτό την απορροφά εξ'ολοκλήρου, ανεξάρτητα από το μήκος κύματός της και την θερμοκρασία του με αποτέλεσμα να φαίνεται μαύρο (μέλαν). Αντίστοιχα, όταν το μέλαν σώμα θερμανθεί, εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συγκεκριμένη φασματική κατανομή, η οποία έχει άμεση εξάρτηση από την θερμοκρασία του. Σαν παράδειγμα θα μπορούσε να αναφερθεί ένα μέταλλο το οποίο θερμαίνεται, με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας να μικραίνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του και το χρώμα του να μεταβάλλεται από ερυθρό αρχικά, σε λευκό.

Η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος εμφανίζει ένα μέγιστο, το μέγεθος και η θέση (μήκος κύματος) του οποίου, εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Με την αύξηση της θερμοκρασίας του εμφανίζεται αύξηση της έντασης για όλα τα μήκη κύματος ακτινοβολίας με μετατόπιση του μεγίστου προς τα μικρότερα μήκη κύματος στα οποία παρουσιάζονται μεγαλύτερες ενέργειες φωτονίων. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά του μήκους κύματος από το μέγιστο, τόσο η ένταση της ακτινοβολίας τείνει να μηδενιστεί. Η φασματική κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος συναρτήσει του μήκους κύματος και της θερμοκρασίας περιγράφεται από την εξίσωση κατανομής του *Planck* (1900) και φαίνεται στο σχήμα 2 :

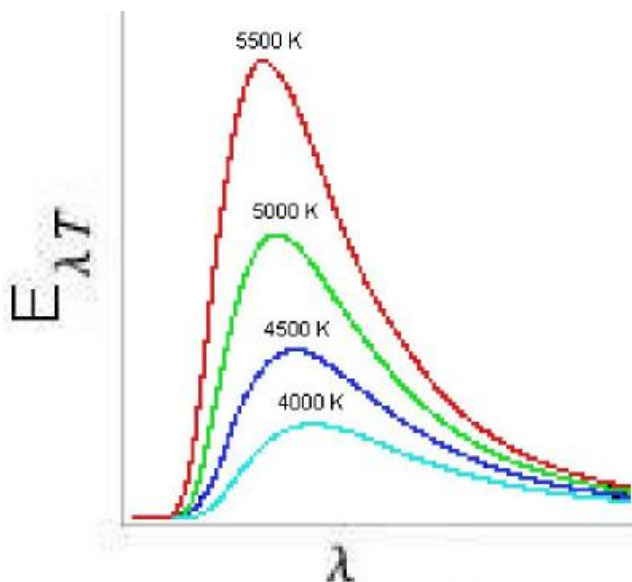
$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi^5 h^6 c^2}{15 \lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]}$$

όπου: h είναι η σταθερά του Planck $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

c είναι η ταχύτητα του φωτός $c = 2.997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

k είναι η σταθερά Boltzmann $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

λ είναι το μήκος κύματος σε nm



Σχημα 2: Γραφικές παραστάσεις φασματικής κατανομής μέλανος σώματος όπου η μετατόπιση του μεγίστου ακολουθεί το νόμο Wien:

$$\lambda_{\text{meg}} \cdot T = 2897,8 \text{ mm} \cdot \text{K}$$

5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Για τη μελέτη των φαινομένων που αφορούν την παρούσα πτυχιακή εργασία για τα Φ/Β στοιχεία, είναι απαραίτητη η γνώση χαρακτηριστικών που περιγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν συλλογιστούμε ότι το αίτιο του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι η ΗΜ ακτινοβολία.

Η ισχύς (radiant flux) της ΗΜ ακτινοβολίας ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολούμενης ενέργειας dU προς το χρόνο dt :

$$P = \frac{dU}{dt}$$

Μονάδα μέτρησής της είναι το 1 Watt. Για την ισχύ της ΗΜ ακτινοβολίας άλλοτε χρησιμοποιείται ο συμβολισμός Φ .

Η πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας (irradiance) ορίζεται από την συνολική ισχύ που προσπίπτει από όλες τις κατευθύνσεις σε μία επιφάνεια, ανεξάρτητα από την γωνία πρόσπτωσης. Η μαθηματική έκφρασή της δίνεται από την εξίσωση:

$$E = \frac{dP}{dS}$$

Μονάδα μέτρησής της είναι το 1 W/m².

Η ένταση της ακτινοβολίας ορίζεται σαν το πηλίκο της ισχύος που διαπερνά κάθετα μία επιφάνεια προς το εμβαδό αυτής:

$$J = \frac{dP}{dS_{\perp}}$$

Μονάδα μέτρησής της είναι επίσης το 1 W/m².

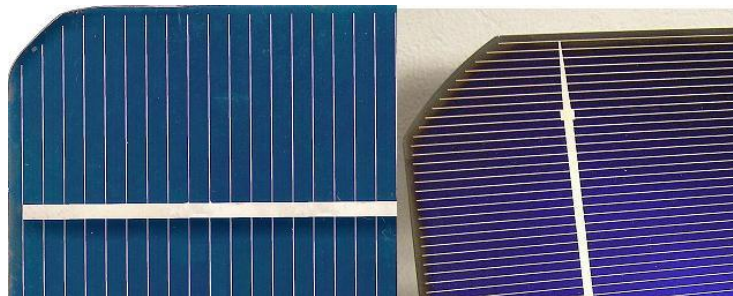
1. ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

1.1. Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγωγά υλικά, όπως Σελήνιο (Se), Γερμάνιο (Ge), Πυρίτιο (Si), με το τελευταίο να έχει επικρατήσει. Ημιαγωγά υλικά είναι εκείνα που υπό συνθήκες λειτουργούν ως μονωτές ή αγωγοί. Σαν αγωγοί λειτουργούν όταν έχουμε αυξημένη θερμότητα ή ενέργεια ή και τα δύο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση σαν μονωτές.

Γενικά το φωτοβολταϊκό αποτελείται από δύο τμήματα στα οποία έχει γίνει διάχυση ατόμων στοιχείων. Στο ένα τμήμα διαχέεται στοιχείο με περίσσεια ηλεκτρονίων π.χ. Φώσφορος (P) στο άλλο τμήμα διαχέεται στοιχείο με έλλειμμα ηλεκτρονίων π.χ. Βόριο (B). Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται περίσσεια αρνητικών φορέων φορτίου (ηλεκτρονίων, e^-) για το πρώτο τμήμα, τμήμα n του φωτοβολταϊκού, και περίσσεια θετικών φορέων φορτίου (οπών, h^+) στο δεύτερο τμήμα, τμήμα p του φωτοβολταϊκού. Στην περιοχή που τα δύο τμήματα συνδέονται δημιουργείται επαφή p-n με εμφάνιση ηλεκτρικού πεδίου φοράς από το p τμήμα στο n τμήμα του φωτοβολταϊκού.

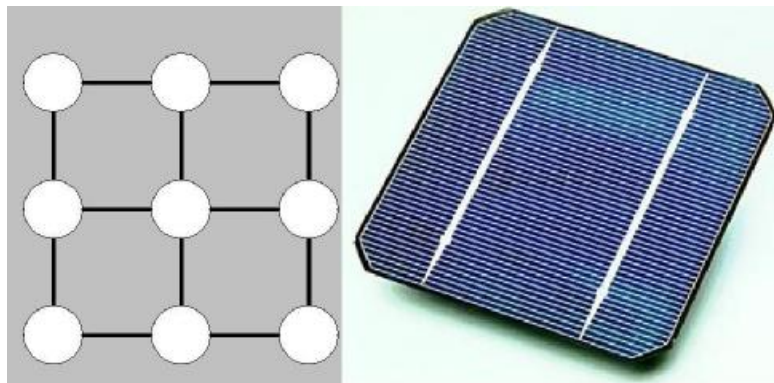
Για την συλλογή των φορέων φορτίου κατά τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού είναι απαραίτητη η ύπαρξη αγωγών στις επιφάνειες των δύο τμημάτων, που στην εμπρόσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού δημιουργούν ένα «δίκτυο» αγωγών σταθερού ή μεταβαλλόμενου πλάτους, Εικ. 1.1, ώστε να διατηρείται η ισορροπία ανάμεσα στην αντίσταση των αγωγών και τη διαθέσιμη επιφάνεια για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην οπίσθια επιφάνεια, οι φορείς φορτίου συλλέγονται από το αγώγιμο υπόβαθρο.



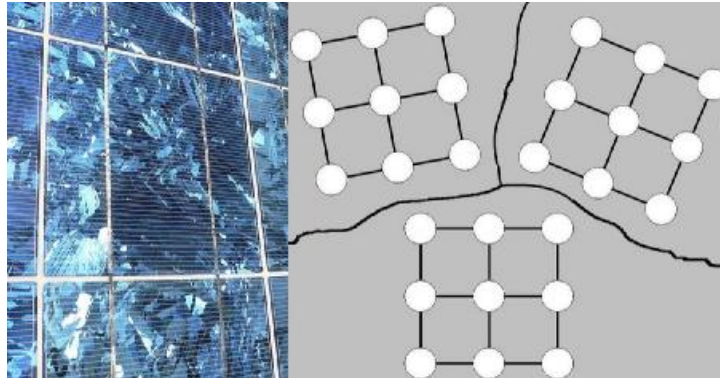
Εικόνα 1.1 αγωγοί στην επιφάνεια φωτοβολταϊκών στοιχείων cSi σταθερού πλάτους (αριστερά) και μεταβαλλόμενου (δεξιά)

1.2 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΑΠΟ ΠΥΡΙΤΙΟ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΤΟΥΣ ΠΛΕΓΜΑ

Η χρήση κρυσταλλικού πυριτίου είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, καθώς επιτρέπει την εφαρμογή της θεωρίας των κρυσταλλικών υλικών και παρουσιάζει, σε ένα βαθμό, συμπεριφορά που μπορούμε να προβλέψουμε. Τα φωτοβολταϊκά από c-Si, Εικ. 1.2, λόγω της αργής και πολύπλοκης διαδικασίας που απαιτείται για την παραγωγή τους, αποτελούν το ακριβότερο είδος της κατηγορίας.



Εικόνα 1.2 κρυσταλλικό πυρίτιο και φωτοβολταϊκή κυψελίδα c-Si



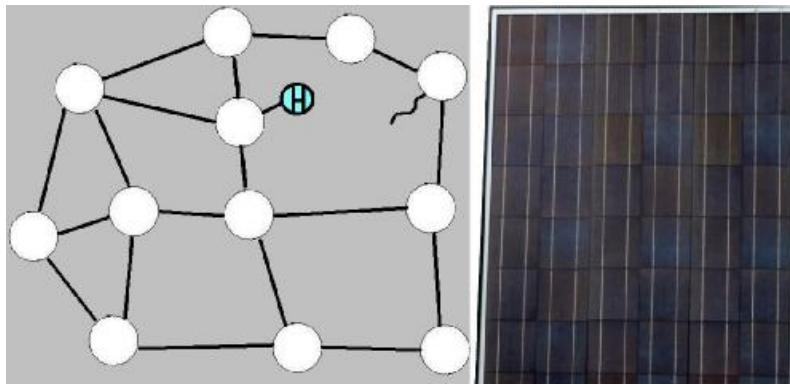
Εικόνα 1.3 φωτοβολταϊκό m-Si και δομή του

Η παραγωγή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου, Εικ. 1.3, δεν είναι τόσο εξεζητημένη όσο του μονοκρυσταλλικού, γεγονός το οποίο το κάνει φθηνότερο. Τα όρια μεταξύ των κρυστάλλων μειώνουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών εμποδίζοντας την ελεύθερη ροή των φορέων φορτίου. Για να ελαττωθεί το παραπάνω φαινόμενο είναι απαραίτητη η δημιουργία κρυστάλλων μεγέθους μερικών χιλιοστών ώστε να φτάνει ένας κρύσταλλος από την εμπρόσθια επιφάνεια στην επαφή p-n μειώνοντας το μήκος των ορίων των κρυστάλλων ανά επιφάνεια φωτοβολταϊκού, και κατά συνέπεια, τις απώλειες λόγω

επανασυνδυασμού ηλεκτρονίων – οπών, τις εσωτερικές αγώγιμες διαρροές και την αντίσταση στην ροή των φορέων φορτίου προς την επαφή p-n.

Η παραγωγή του άμορφου πυριτίου, Εικ. 1.4, είναι ακόμα φθηνότερη από του πολυκρυσταλλικού. Στο κρυσταλλικό πλέγμα του άμορφου πυριτίου τα άτομα δεν είναι διατεταγμένα ομοιόμορφα με αποτέλεσμα να μην έχουμε δημιουργία τεσσάρων δεσμών σε ορισμένα από αυτά, δηλαδή να υπάρχουν άτομα στα οποία δεν συμμετέχουν όλα τα ηλεκτρόνια σθένους σε δεσμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ακόρεστων δεσμών που δεν ευνοούν την εισαγωγή προσμίξεων και ικανοποιητικής ροής φορτίων σε φωτοβολταϊκά από καθαρό άμορφο πυρίτιο.

Έχει αποδειχτεί ότι η προσθήκη ατομικού υδρογόνου σε ποσοστό 5-10% στο άμορφο πυρίτιο βελτιώνει την ποιότητα του υλικού προκαλώντας κορεσμό των ακόρεστων δεσμών. Επίσης αυξάνει το ενεργειακό χάσμα από 1,12 eV στο c-Si, σε 1,7 eV, κάνοντας τον ημιαγωγό ισχυρότερα απορροφητικό για φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη του προαναφερθέντος ορίου.



Εικόνα 1.4 άμορφο πυρίτιο και φωτοβολταϊκή κυψελίδα a-Si.

1.3 ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ – ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Όταν το φωτοβολταϊκό φωτίζεται, τα φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου, δηλαδή 1,12 eV, διεγείρουν ηλεκτρόνια του κρυσταλλικού πλέγματος του πυριτίου με αποτέλεσμα αυτά να περνούν από τη ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας και να μπορούν να κινηθούν ελεύθερα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται ζεύγη φορέων φορτίου, ηλεκτρονίων και οπών, που ωθούμενοι από το ηλεκτρικό πεδίο επαφής οδηγούνται στο τμήμα εκείνο του φωτοβολταϊκού στο οποίο αποτελούν φορείς πλειονότητας, τμήμα n για τα ηλεκτρόνια και τμήμα p για τις οπές, δημιουργώντας μεταξύ των άκρων του, διαφορά δυναμικού. Αυτή

η διαφορά δυναμικού, δημιουργεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος όταν το φωτοβολταϊκό συνδεθεί σε κύκλωμα.

Η ροή των φορέων φορτίου στο εσωτερικό του φωτοβολταϊκού εξαιτίας της επίδρασης των φωτονίων ονομάζεται φωτόρευμα, I_{ph} , και είναι ανάλογη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, I_T . Ορίζεται σαν συγκέντρωση C της ακτινοβολίας το πηλίκο της έντασής της προς την ένταση της ακτινοβολίας του ηλίου, η οποία θεωρούμε ότι ισούται με $I_{T,SUN}=1 \text{ kW/m}^2$:

$$C = \frac{I_T}{I_{T,sun}} \quad (1.1)$$

Κατά συνέπεια, η εξάρτηση του φωτορεύματος από την ένταση της ακτινοβολίας θα είναι:

$$I_{ph}^{(C)} = C * I_{ph}^{(C=1)} \quad (1.2)$$

1.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Η ακτινοβολία δημιουργεί στο φωτοβολταϊκό ελεύθερα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Κατόπιν το ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο της επαφής p-n ωθεί τα ηλεκτρόνια και τις οπές προς το τμήμα εκείνο που αποτελούν φορείς πλειονότητας. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στο τμήμα n και των οπών στο τμήμα p του φωτοβολταϊκού, και κατά συνέπεια η τάση τους να διαχυθούν προς τις αντίθετες περιοχές διαπερνώντας τον εσωτερικό ηλεκτρικό φραγμό του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου. Τα δύο ρεύματα, φωτόρευμα, I_{ph} , και ρεύμα διαχύσεως, I_{δ} , αντίστοιχα, είναι ίσης έντασης και αντιθέτου φοράς.

Η αύξηση των συγκεντρώσεων ηλεκτρονίων – οπών στα δύο τμήματα του φωτοβολταϊκού δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο αντίρροπο του ηλεκτρικού πεδίου της επαφής p-n του οποίου η τάση προσεγγίζει την τάση του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου. Ο λόγος που οι δύο τάσεις δεν είναι ίσες είναι ότι μέρος των φορέων φορτίου επανασυνδυάζονται. Η εμφανιζόμενη στα άκρα του φωτοβολταϊκού τάση ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού, V_{oc} . Στην περίπτωση του φωτιζόμενου φωτοβολταϊκού σε ανοιχτό κύκλωμα, το ρεύμα διάχυσης το οποίο εμφανίζεται στο εσωτερικό του έχει τη φορά του ρεύματος που θα διέρρεε την επαφή p-n αν σε αυτή εφαρμοζόταν τάση με ορθή πόλωση ίση με την τάση ανοικτού κυκλώματος.

Αν τα άκρα του φωτοβολταϊκού βραχυκυκλωθούν τότε παρατηρείται το μέγιστο ρεύμα που μπορεί αυτό να δώσει, υπό τις δεδομένες συνθήκες. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα βραχυκυκλώματος, έχει δε φορά αντίθετη του ρεύματος ορθής πόλωσης της διόδου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το φωτόρευμα είναι ανάλογο της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού. Επίσης μέρος του φωτορεύματος χάνεται στο εσωτερικό του φωτοβολταϊκού λόγω του επανασυνδυασμού ηλεκτρονίων οπών, της διάχυσης και των παρασιτικών αντιστάσεων του φωτοβολταϊκού, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο.

Αν συνδέσουμε φορτίο R_L στο φωτοβολταϊκό, στο κύκλωμα που δημιουργείται θα εμφανιστεί ρεύμα έντασης I_R , ίσης με τη συνισταμένη του φωτορεύματος I_L και του ρεύματος διαχύσεως I_δ . Ισχύει:

$$I_R = I_{ph} - I_\delta \quad (1.3)$$

Η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού, V , θα είναι ίση με την πτώση τάσεως στα άκρα της αντίστασης, $I_R \cdot R_L$. Μεταβάλλοντας την R_L σε διάφορες τιμές, θα παρατηρήσουμε ότι η πτώση τάσης και άρα η εμφανιζόμενη στα άκρα του φωτοβολταϊκού τάση V μεταβάλλεται, ενώ το ρεύμα I_R που διαρρέει το κύκλωμα παρουσιάζει πολύ μικρές μεταβολές για μεγάλο εύρος τάσεων. Από μία τιμή της αντίστασης και μετά, η ένταση του ρεύματος αλλάζει ραγδαία για μικρό εύρος τάσεων. Η καμπύλη που δημιουργείται από τα ζεύγη τιμών τάσης έντασης ονομάζεται χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού (I-V).

1.4.1 Χαρακτηριστική καμπύλη I – V φωτοβολταϊκού

Το ρεύμα I σε φορτίο τροφοδοτούμενο από φωτοβολταϊκό, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, ισούται με το φωτόρευμα ελαττωμένο κατά το ρεύμα διαχύσεως $I = I_{ph} - I_\delta$. Το ρεύμα διαχύσεως προκύπτει από την εξίσωση Shockley:

$$I_\delta = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.4)$$

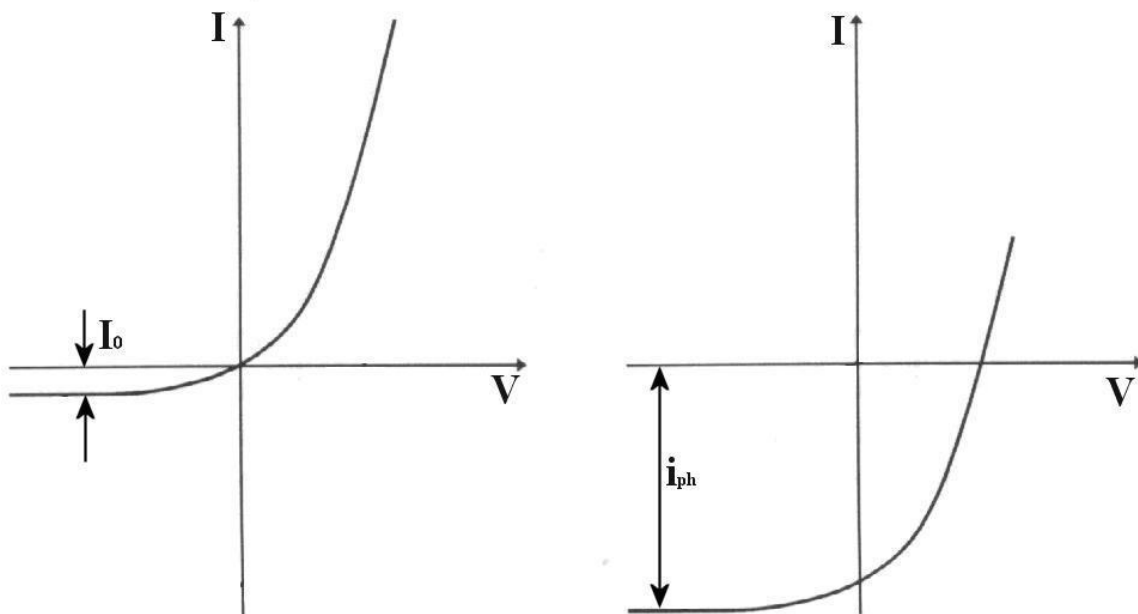
όπου: I_0 είναι το ρεύμα σκότους του φωτοβολταϊκού

q είναι το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου, $1.602 \cdot 10^{-19}$ Cb

k είναι η σταθερά Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T είναι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού σε Kelvin

V είναι η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού σε Volt



Σχήμα 1.1 αριστερά η γραφική παράσταση της εξίσωσης Shockley και δεξιά η γραφική παράσταση της $I - V$ φωτοβολταϊκού

Με αντικατάσταση του I_{δ} προκύπτει η χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ του φωτοβολταϊκού η οποία εμφανίζεται στο τέταρτο τεταρτημόριο, Σχ. 1.1, διότι το αποδιδόμενο από φωτοβολταϊκό σε κύκλωμα ρεύμα είναι αντίθετης φοράς από το ρεύμα που διαρρέει την επαφή p-n στην περίπτωση της ορθής πόλωσης και είναι:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.5)$$

Στην πράξη χαράσσουμε την καμπύλη $I - V$ ενός φωτοβολταϊκού στο πρώτο τεταρτημόριο.

Μελετώντας την χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοβολταϊκού μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες όσον αφορά τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του και την απόδοσή του κάτω από τις συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στις οποίες αυτή αναφέρεται. Εκεί όπου η καμπύλη τέμνει τον οριζόντιο άξονα, εντοπίζεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} . Αντίστοιχα, στο σημείο όπου η καμπύλη τέμνει τον κατακόρυφο άξονα και η τάση μηδενίζεται, εντοπίζουμε το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} . Η τάση ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκυκλώματος αποτελούν τις μέγιστες τιμές τάσης και ρεύματος αντίστοιχα που αποδίδει το φωτοβολταϊκό. Στην περιοχή της χαρακτηριστικής η οποία εμφανίζει μεγάλη μεταβολή της κλίσης dI/dV , εντοπίζεται το σημείο μέγιστης ισχύος, Maximum Power Point - MPP. Στο σημείο αυτό αποδίδεται η μέγιστη

ισχύς του φωτοβολταϊκού , P_m , στις συγκεκριμένες συνθήκες, με ένταση ρεύματος I_m και τάση V_m . Είναι προφανές ότι:

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (1.6)$$

Με βάση τη μέγιστη ισχύ του φωτοβολταϊκού, την τάση ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκυκλώματος, ορίζεται ο συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor), που αποτελεί δείκτη της ποιότητας του φωτοβολταϊκού. Όσο πλησιάζει τη μονάδα, τόσο η λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλησιάζει τη συμπεριφορά της ιδανικής πηγής ρεύματος. Για φωτοβολταϊκά με πολύ καλή ενεργειακή απόδοση ο συντελεστής είναι 0,7 έως 0,9. Ισχύει:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (1.7)$$

Η ενεργειακή απόδοση του φωτοβολταϊκού περιγράφεται από το ηλίκιο της μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού, P_m , προς την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

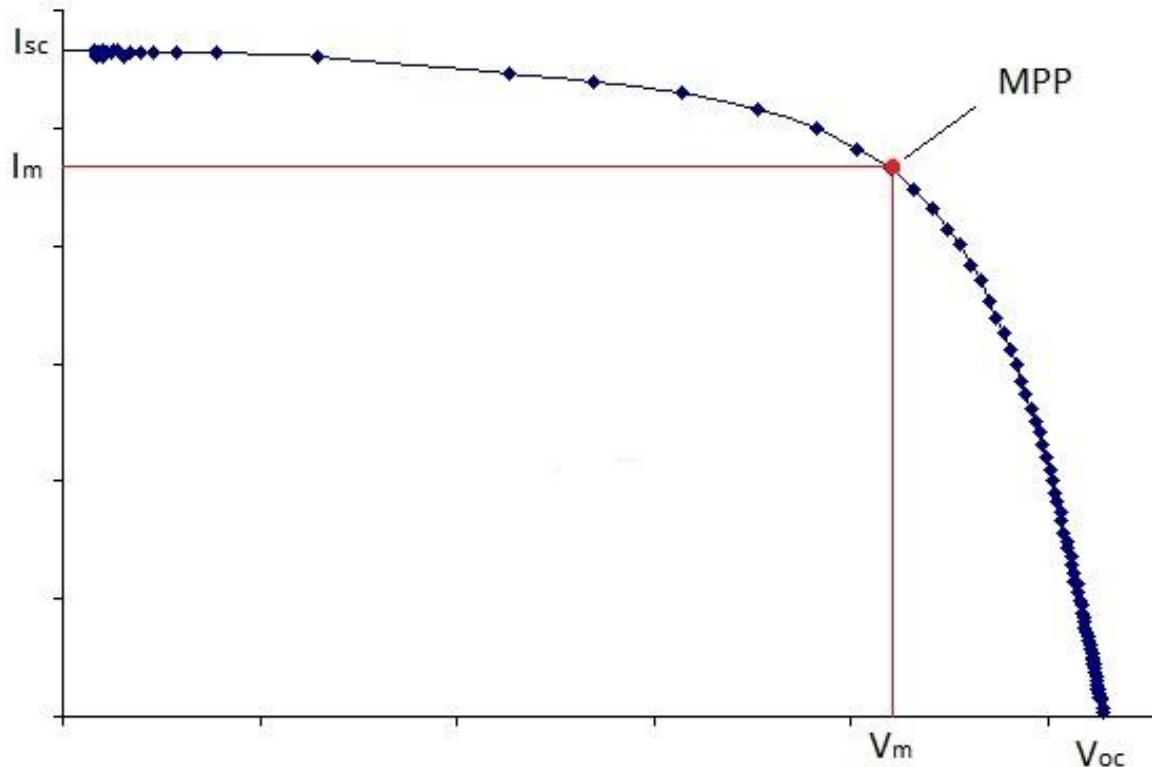
$$\eta_c = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{I_T \cdot A_c} \quad (1.8)$$

όπου: $P_{in} = I_T \cdot A_c$ η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

A_c είναι το εμβαδό του φωτοβολταϊκού σε m^2

I_T η ένταση της προσπίπτουσας στο φωτοβολταϊκό ακτινοβολίας σε W/m^2

Η μέτρηση των ονομαστικών μεγεθών των φωτοβολταϊκών καθώς και η χάραξη της χαρακτηριστικής τους, προκειμένου να υπάρχει συγκρισιμότητα των μετρήσεων, γίνεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες οι οποίες ονομάζονται πρότυπες συνθήκες ελέγχου, standard test conditions–STC, και είναι ακτινοβολία έντασης $1kW/m^2$, θερμοκρασία $25^\circ C$ και δείκτης μάζας αέρα, Air Mass, $AM=1,5$. Θα πρέπει η ακτινοβολία να προσπίπτει κάθετα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Από αυτή τη μέτρηση προκύπτει το ονομαστικό ρεύμα βραχυκυκλώματος, η ονομαστική τάση ανοιχτού κυκλώματος και η ονομαστική ισχύς (ισχύς αιχμής) του φωτοβολταϊκού για ακτινοβολία $1kW/m^2$. Ισχύς αιχμής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ονομάζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να αποδώσει το στοιχείο κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου. Συμβολίζεται στο SI με W_p (Watt Peak).



Σχήμα 1.2 Χαρακτηριστικά σημεία της I-V φωτοβολταϊκού

Η μελέτη της I-V, Σχ 1.2, αποκαλύπτει πώς το φωτοβολταϊκό για μία περιοχή τάσεων συμπεριφέρεται περίπου σαν ιδανική πηγή ρεύματος, δίνοντας σχετικά σταθερή ένταση ρεύματος. Από μηδενική τάση έως περίπου το V_m το ρεύμα δεν μεταβάλλεται σχηματίζοντας στην I-V ένα σχεδόν οριζόντιο τμήμα. Για τιμές τάσης μεγαλύτερες από V_m και μέχρι την V_{oc} έχουμε αντίθετη εικόνα, με το ρεύμα να μεταβάλλεται ραγδαία.

Έχει αποδειχθεί ότι η παράγωγος της I-V στα χαρακτηριστικά σημεία V_{oc} και I_{sc} δίνει τιμές των αντιστάσεων που χαρακτηρίζουν το φωτοβολταϊκό και περιγράφονται στην παράγραφο που ακολουθεί. Ισχύει:

$$-\left[\frac{dV}{dI}\right]_{V_{oc}} = R_{sh} \qquad -\left[\frac{dV}{dI}\right]_{I_{sc}} = r_s \qquad (1.9)$$

όπου: R_{sh} η εσωτερική εν παραλλήλω αντίσταση του φωτοβολταϊκού
 r_s η εσωτερική εν σειρά αντίσταση του φωτοβολταϊκού

1.4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στην τάση και το ρεύμα

Με αντικατάσταση του $V=V_{oc}$ και του $I=0$ στην Εξ. 1.5, λαμβάνοντας υπόψιν ότι $I_{ph} \gg I_0$, προκύπτει η ακόλουθη έκφραση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας και του φωτορεύματος:

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - I_0}{I_0} \right) \stackrel{I_{ph} \gg I_0}{\Rightarrow} V_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \ln I_{ph} + C' \quad (1.10)$$

$$\text{όπου: } C' = -\frac{k \cdot T}{q} \ln I_0$$

Επίσης για την εξάρτηση της τάσης από τη θερμοκρασία στο μονοκρυσταλλικό πυρίτιο ισχύει η ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$V_{oc} = 1.25 - \frac{0.63 - \log C}{300} \cdot T \quad (1.11)$$

Στην οποία θέτοντας $\log C=1$ και παραγωγίζοντας ως προς T θα είναι:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = -2.2 \frac{mV}{^{\circ}C} \quad (1.12)$$

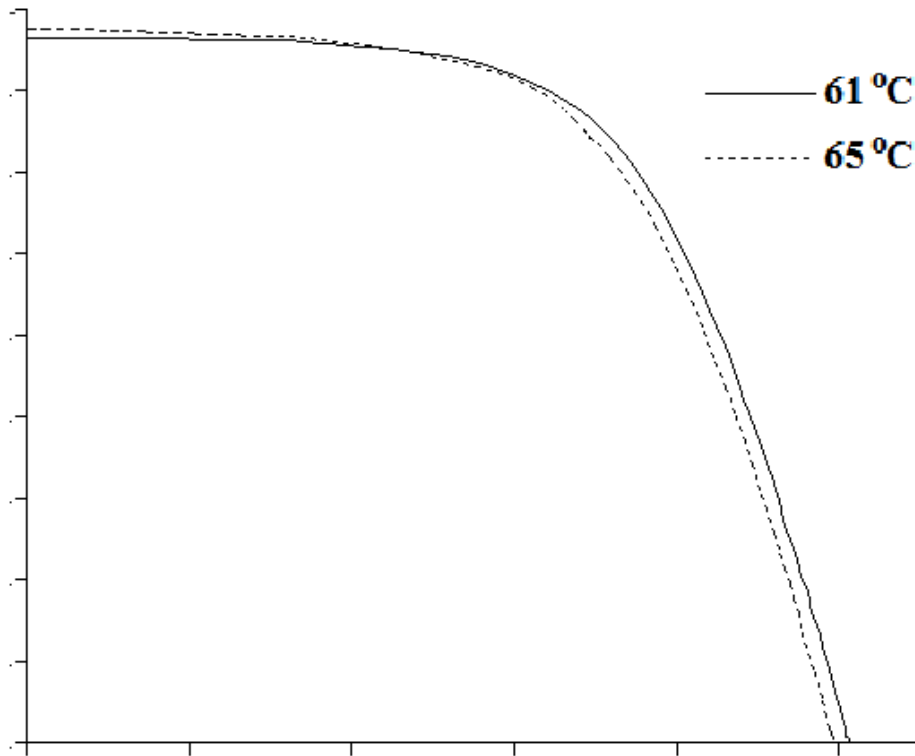
Συνεπώς η Εξ. 1.10 θα πρέπει να διορθωθεί με την προσθήκη της εξάρτησης της θερμοκρασίας:

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln I_{ph} + C' + \frac{dV_{oc}}{dT} \cdot \Delta T \quad (1.13)$$

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Θεωρητικά έχει υπολογιστεί ελάττωση της τάσης κατά 2,2mV ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας για φωτοβολταϊκά από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

Με απλή διερεύνηση της Εξ. 1.5, διαπιστώνει κανείς ότι η ένταση του ρεύματος αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, Σχ. 1.3. Αυτό εξηγείται εν μέρει διότι το ενεργειακό χάσμα των ημιαγωγών, E_g , ελαττώνεται όσο η θερμοκρασία αυξάνει. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται ο αριθμός των φωτονίων τα οποία έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να δημιουργηθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου οπής. Επίσης η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το μήκος διάχυσης των

φορέων και κατά συνέπεια το πλήθος το οποίο φτάνει στους χώρους στους οποίους τα ηλεκτρόνια και οι οπές αντίστοιχα αποτελούν φορείς πλειονότητας.



Σχήμα 1.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην χαρακτηριστική I-V

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι, η ελάττωση της τάσης είναι κατά μία τάξη μεγαλύτερη από την αύξηση του ρεύματος του φωτοβολταϊκού. Η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στην ισχύ είναι λοιπόν αρνητική.

1.4.3 Επίδραση της ακτινοβολίας στα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού

Η εξίσωση 1.2 περιγράφει την εξάρτηση του φωτορεύματος από την ένταση της ακτινοβολίας. Για να μπορέσει κανείς να υπολογίσει το φωτόρευμα σε ένταση ακτινοβολίας C , αρκεί να γνωρίζει το ρεύμα βραχυκυκλώματος σε ένταση $C=1$. Σε επίπεδα έντασης ακτινοβολίας της τάξης του 1 kW/m^2 τα φαινόμενα της επανασύνδεσης και της διάχυσης δεν είναι έντονα. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι το $I_{sc}(C=1)$ είναι κατά προσέγγιση ίσο με το $I_{ph}(C=1)$.

Μετά τα παραπάνω η εξίσωση 1.5 θα γίνει:

$$I^{(C)} = C * I_{ph}^{C=1} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.14)$$

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 V_{oc}^C &= \frac{k \cdot T}{q} \ln \left(\frac{C \cdot I_{ph}^{C=1} - I_0}{I_0} \right) \Big|_{I_{ph} \gg I_0} \Rightarrow \\
 V_{oc}^C &= \frac{k \cdot T}{q} \left[\ln \left(\frac{I_{ph}^{C=1}}{I_0} \right) + \ln C \right] \Rightarrow \\
 V_{oc}^C &= V_{oc}^{C=1} + \frac{k \cdot T}{q} \ln C
 \end{aligned} \tag{1.15}$$

Σε αντιστοιχία με την εξ. 1.13 θα ισχύει:

$$V_{oc}^C = V_{oc}^{C=1} + \frac{k \cdot T}{q} \ln C + \frac{dV_{oc}}{dT} \cdot (T_C - T_{C=1}) \tag{1.16}$$

όπου: T_C , $T_{C=1}$ η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού για συγκέντρωση ακτινοβολίας C και $C=1$ αντίστοιχα.

Αύξηση της προσπίπτουσας στο φωτοβολταϊκό ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του. Αυτό εξηγείται εύκολα εφόσον με μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας αυξάνεται ο αριθμός των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού της οποίας μέρος μετατρέπεται σε θερμότητα. Επίσης αυξάνεται το παραγόμενο από το φωτοβολταϊκό ρεύμα αυξάνοντας παράλληλα την παραγόμενη θερμότητα, λόγω του φαινομένου Joule.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, η τάση ανοιχτού κυκλώματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού ενώ το ρεύμα αυξάνεται. Επίσης, αύξηση της ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση του ρεύματος και της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού και κατά συνέπεια μείωση της τάσης.

Η ισχύς του φωτοβολταϊκού αναμένεται να αυξηθεί καθώς η ακτινοβολία αυξάνεται, μέχρι κάποια βέλτιστη τιμή του C . Αυτό συμβαίνει διότι για πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις, οι απώλειες λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας υπερβαίνουν την αύξηση της ισχύος.

1.4.4 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η θεωρητική προσέγγιση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού γίνεται μέσω του ηλεκτρικού ισοδυναμίου. Σε αυτό, κάθε ξεχωριστό φαινόμενο αντιπροσωπεύεται από ένα στοιχείο με αντίστοιχες ιδιότητες. Η δημιουργία του φωτορεύματος αντιπροσωπεύεται από πηγή ρεύματος και οι απώλειες λόγω των χαρακτηριστικών των φορέων φορτίου και της επαφής p-n με διόδους. Τέλος συμπεριλαμβάνονται οι παρασιτικές αντιστάσεις του φωτοβολταϊκού. Στο ισοδύναμο κύκλωμα μιας διόδου λαμβάνονται υπόψιν οι παρασιτικές αντιστάσεις και το φαινόμενο της διάχυσης.

Η παράλληλη στην πηγή ρεύματος παρασιτική αντίσταση R_{sh} ονομάζεται παράλληλη αντίσταση διαρροής, Shunt, και αντιπροσωπεύει στο κύκλωμα διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό του φωτοβολταϊκού μεταξύ σημείων που βρίσκονται υπό διαφορά δυναμικού ίση με αυτήν που επικρατεί στα άκρα του. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες που δημιουργεί. Ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος και θερμικά ή μηχανικά «σοκ» ελαττώνουν την τιμή της.

Η αντίσταση σε σειρά r_s , series, αντιπροσωπεύει την αντίσταση που παρουσιάζει το φωτοβολταϊκό κατά τη ροή του ρεύματος διαμέσου του ημιαγωγού, την αντίσταση επαφής των σημείων πρόσφυσης του πλέγματος των αγωγών στον ημιαγωγό και την αντίσταση των ίδιων των αγωγών.

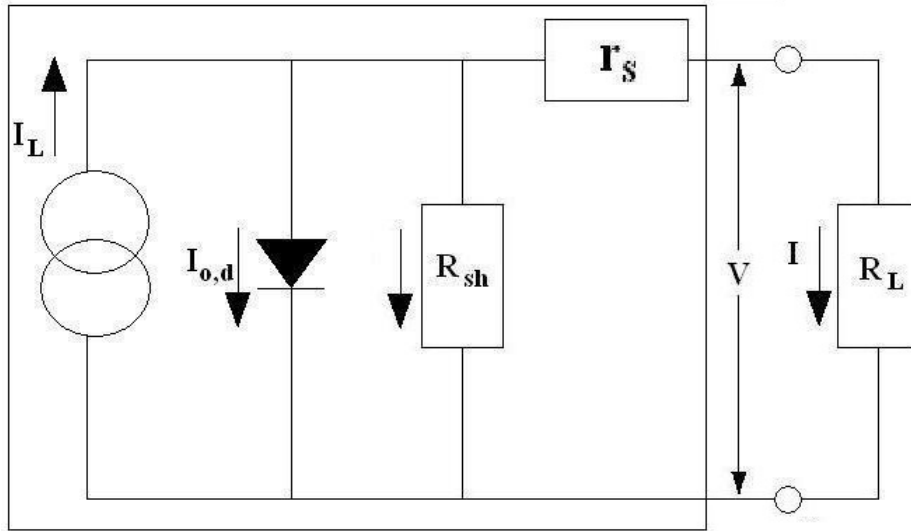
Η παράλληλη στην πηγή ρεύματος δίοδος αντιπροσωπεύει το ρεύμα διάχυσης στο εσωτερικό του. Ελαττώνει τον αριθμό φορέων φορτίου οι οποίοι είναι τελικά διαθέσιμοι για τη δημιουργία ρεύματος στο κύκλωμα.

Η μαθηματική έκφραση της χαρακτηριστικής καμπύλης του φωτοβολταϊκού για το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μίας διόδου, Σχ. 1.4, στην οποία ο όρος $I \cdot r_s$ εκφράζει την πτώση τάσεως στα άκρα της σε σειρά αντίστασης, είναι:

$$I = I_{ph} - I_d \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot r_s}{m_d \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot r_s}{R_{sh}} \quad (1.14)$$

όπου: m_d ο συντελεστής ιδεατότητας της διόδου για το φαινόμενο της διάχυσης
 I_d το ρεύμα σκότους για το φαινόμενο της διάχυσης

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο μίας διόδου είναι το απλούστερο και δίνει καλές προσεγγίσεις της I-V σε συνθήκες συνθήκες ακτινοβολίας όπου το φαινόμενο του επανασυνδυασμού ηλεκτρονίων οπών δεν είναι ισχυρό.



Σχήμα 1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μιας διόδου συνδεδεμένο με φορτίο R_L

Εάν ληφθούν υπόψιν τα φαινόμενα του επανασυνδυασμού και της θερμιοτικής εκπομπής, τότε προκύπτει το ηλεκτρικό ισοδύναμο δύο και τριών διόδων αντίστοιχα, Σχ. 1.5.

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο δύο διόδων είναι:

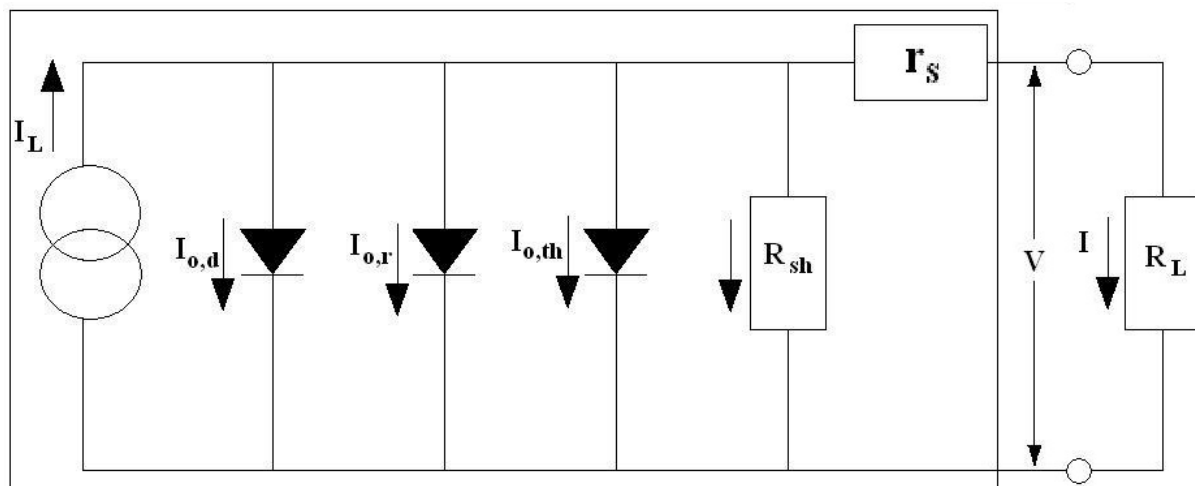
$$I = I_{ph} - I_d \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot r_s}{\frac{m_d \cdot k \cdot T}{q}} \right) - 1 \right) - I_r \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot r_s}{\frac{m_r \cdot k \cdot T}{q}} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot r_s}{R_{sh}} \quad (1.15)$$

όπου: m_r και I_r ο συντελεστής ιδεατότητας και το ρεύμα σκότους της διόδου αντίστοιχα για το φαινόμενο του επανασυνδυασμού

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο τριών διόδων είναι:

$$I = I_{ph} - I_d \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot r_s}{\frac{m_d \cdot k \cdot T}{q}} \right) - 1 \right) - I_r \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot r_s}{\frac{m_r \cdot k \cdot T}{q}} \right) - 1 \right) - I_{th} \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot r_s}{\frac{m_{th} \cdot k \cdot T}{q}} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot r_s}{R_{sh}} \quad (1.16)$$

όπου: m_{th} και I_{th} ο συντελεστής ιδεατότητας και το ρεύμα σκότους της διόδου αντίστοιχα για το φαινόμενο της θερμιοτικής εκπομπής



Σχήμα 1.5 Ισοδύναμο κύκλωμα τριών διόδων συνδεδεμένο με φορτίο R_L

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τον προσδιορισμό της ενεργειακής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού υπό συνθήκες αυξημένης ακτινοβολίας σχεδιάστηκε διάταξη μέσω της οποίας δόθηκε η δυνατότητα καταγραφής της χαρακτηριστικής I-V της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος καθώς και η δυνατότητα ελέγχου των επιπέδων της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η διεξαγωγή των πειραμάτων σε εξωτερικό χώρο και με χρήση του ηλίου σαν πηγή φωτός δεν ήταν δυνατή διότι η ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης από αυτόν μεταβάλλεται με το χρόνο. Επίσης θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί και η επίδραση εξωτερικών παραγόντων όπως ο άνεμος ο οποίος θα επηρρέαζε το θερμικό ισοζύγιο του φωτοβολταϊκού με το περιβάλλον.

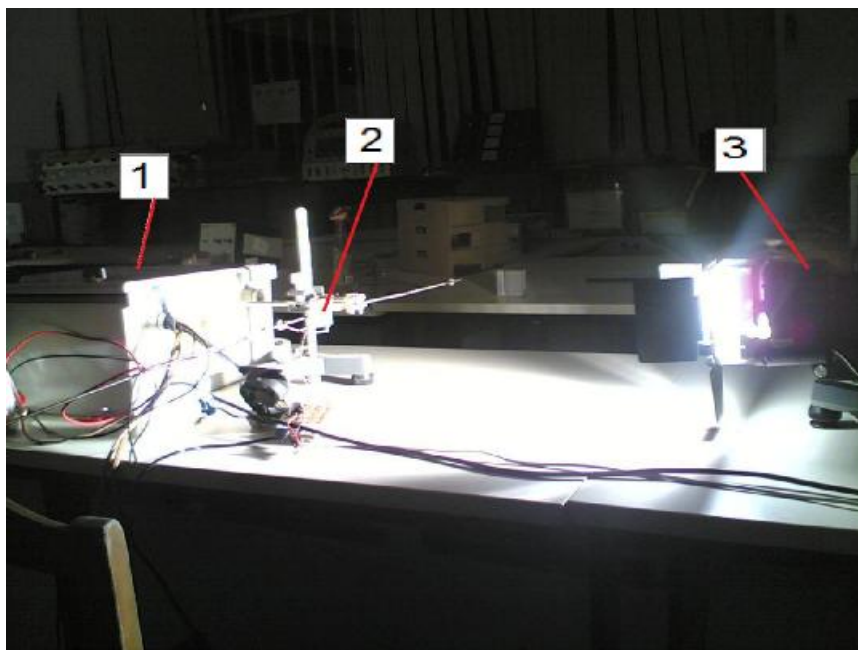


Εικόνα 2.1 Παραβολικό κάτοπτρο το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε προκαταρκτικές μετρήσεις



Εικόνα 2.2 Πειραματική διάταξη διερεύνησης της ενεργειακής συμπεριφοράς φωτοβολταϊκού υπό συνθήκες αυξημένης ακτινοβολίας

Μετά από προκαταρκτικές μετρήσεις που έγιναν με τη χρήση παραβολικού κατόπτρου συγκέντρωσης $C \approx 20$, Εικ. 2.1 με μέτρηση της τάσης και του ρεύματος του φωτοβολταϊκού μέσω κοινού βολτομέτρου και μέτρηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού με χρήση υπέρυθρου θερμομέτρου, προσδιορίστηκε το εύρος τιμών των προς διερεύνηση μεγεθών και σχεδιάστηκε η πειραματική διάταξη, Εικ. 2.2, Εικ 2.3, που αποτελείται από ένα datalogger CR1000 της Campbell Science για την καταγραφή των μεγεθών, ένα μεταβλητό φορτίο που ελέγχεται αυτόματα από τον datalogger, θερμοζεύγη χαλκού - κωνσταντάνης, Cu-Co με μικρή διάμετρο ώστε να ανταποκρίνονται γρήγορα στις θερμοκρασιακές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στο φωτοβολταϊκό. Ένας προβολέας αλογόνου με ονομαστική ισχύ 1000W χρησιμοποιήθηκε για το φωτισμό του φωτοβολταϊκού και ένας μεταλλικός κανόνας για τη μέτρηση της απόστασης του φωτοβολταϊκού με τον προβολέα. Το φωτοβολταϊκό που χρησιμοποιήθηκε είναι μονοκρυσταλλικού πυριτίου, της εταιρίας Solartec.



Εικόνα 2.3 Η πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια λειτουργίας για τη ρύθμιση του συστήματος καταγραφής. Διακρίνονται τον Datalogger CR1000 (1), το PV στοιχείο (2) και ο Προβολέας 1000W (3)

2.1.1 Περιγραφή του datalogger CR1000

Ο datalogger CR1000 της Campbell Scientific είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής δεδομένων με ικανότητα παροχής μετρήσεων ακρίβειας. Λειτουργεί με μπαταρίες και περιλαμβάνει επεξεργαστή, αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και εξόδους. Η γλώσσα για τον προγραμματισμό του παρουσιάζει ομοιότητες με τη BASIC, και περιλαμβάνει επιπλέον οδηγίες για την επεξεργασία δεδομένων καθώς και ρουτίνες ανάλυσης. Τα πακέτα λογισμικού PC200 3.0, PC400 1.2 και LoggerNet 3.0 μας παρέχουν τη δυνατότητα της επεξεργασίας δεδομένων και της σύνθεσης προγραμμάτων καθώς και παρακολούθηση των μετρούμενων μεγεθών σε πραγματικό χρόνο. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για τις ανάγκες του πειράματος είναι το PC200W.

Η αποθήκευση του λειτουργικού συστήματος γίνεται στην μνήμη του datalogger χωρητικότητας 2 MB τύπου Flash EEPROM, ενώ άλλα 128 kB μνήμης χρησιμοποιούνται για τις επιπλέον ρυθμίσεις που χρειάζονται. Η αποθήκευση του προγράμματος γίνεται σε 2 MB μνήμης τύπου SRAM η οποία χρησιμοποιείται επίσης από το λειτουργικό σύστημα καθώς και για την αποθήκευση των δεδομένων. Να σημειωθεί ότι ο datalogger έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης περισσότερων του ενός προγραμμάτων, εκ των οποίων μπορεί να επιλεγεί ποιο θα χρησιμοποιηθεί, μέσα από το PC200W.

Η ονομαστική τάση λειτουργίας του datalogger είναι τα 12 V συνεχούς. Κάτω από 9.6 V ή πάνω από 16 V δεν θα λειτουργεί κανονικά, ενώ με τάση που θα υπερβαίνει τα 18 V δεν αποκλείεται να καταστρέψουμε την παροχή ισχύος του. Η διάρκεια των μπαταριών μπορεί να καθοριστεί, διαιρώντας την χωρητικότητά τους σε αμπερώρια, με τη μέση απαιτούμενη παροχή ρεύματος του συστήματος. Τυπικές τιμές για το ρεύμα που χρειάζεται ο CR1000 είναι 0.5 mA σε αδρανή κατάσταση, 0.6 mA με συχνότητα δειγματοληψίας 1 Hz και πάνω από 10 mA για συχνότητα δειγματοληψίας 100 Hz.

Ο CR1000 μπορεί να αποθηκεύει μεμονωμένες μετρήσεις ή να χρησιμοποιεί τις εκτεταμένες υπολογιστικές του ικανότητες για υπολογισμό μέγιστων, ελάχιστων, μέσων τιμών και άλλων μαθηματικών πράξεων. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε πίνακες. Ο αριθμός των πινάκων καθώς και οι τιμές που εμφανίζονται σε καθέναν από αυτούς καθορίζονται στο πρόγραμμα του datalogger. Η αποθήκευση των μετρήσεων μπορεί να γίνει είτε στην εσωτερική μνήμη τύπου SRAM είτε, προαιρετικά, σε εξωτερική κάρτα αποθήκευσης.

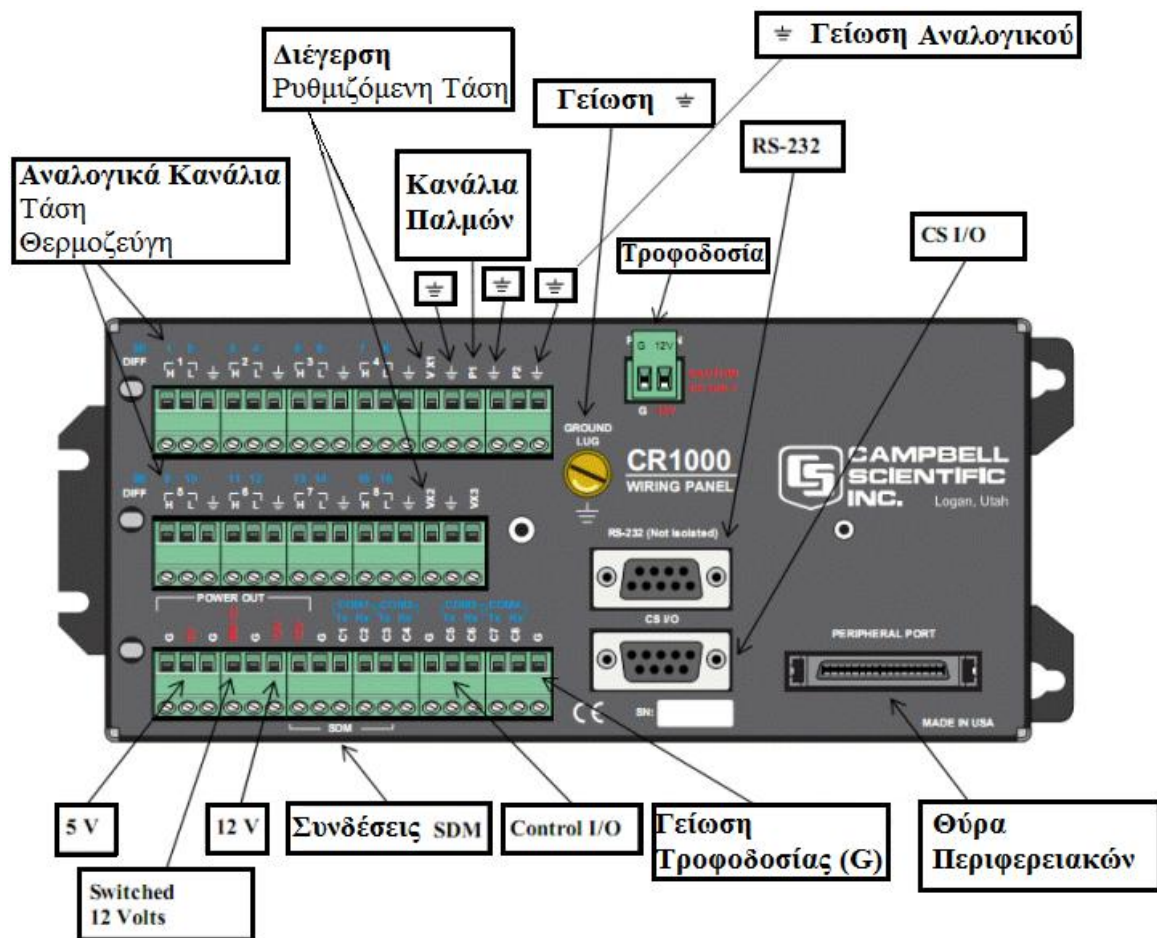
Τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν σε υπολογιστή μέσω σύνδεσης του datalogger με καλώδιο RS232 και χρήσης πακέτου λογισμικού της Campbell Scientific. Η μορφή των δεδομένων, η οποία προτιμήθηκε μεταξύ των παρεχόμενων λόγω της άμεσου αναγνωσιμότητας την οποία επιτρέπει, είναι η TOA5 ASCII, Πιν. 2.1. Με αυτή τη μορφή, τα δεδομένα αποθηκεύονται σε αρχείο τύπου DAT (ονομα.dat) το οποίο μπορούμε να επεξεργαστούμε εισάγοντάς το σε πρόγραμμα επεξεργασίας λογιστικών φύλλων όπως το MS Excel. Ακολουθεί παράδειγμα της δομής των δεδομένων όπως αυτά περιέχονται σε ένα τέτοιο αρχείο:

```
"TOA5","CR1000","CR1000","4647","CR1000.Std.08","CPU:IV_CURVE_1.
2V_b_r8_variable_step_final.CR1","46117","Output"
"TIMESTAMP","RECORD","Array_ID","Stn_Code","SolarPanel","Reyma","
Tasi","Counter","Tamb","SolRad","Batt_Volt_Min","TC_1_Avg","TC_2_Avg
","TC_3_Avg","TC_4_Avg","WP_Temp_Avg"
"TS","RN","","","","mAmber","mVolts","","Deg C","W/m2","Volts","","",
","","","Deg C"
","","","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Min","Avg","A
vg","Avg","Avg","Avg"
"2008-02-07 14:38:50.5",0,350,565,1,3.393328,464.8268,1,"NAN","NAN",
13.69,61.62,17.34,17.41,17.54,23.61
```

Πίνακας 2.1 Μορφή δεδομένων που ανακτήθηκαν από τον CR1000

Το σύστημα, Εικ. 2.4, διαθέτει 16 αναλογικά κανάλια στα οποία μπορούν να συνδεθούν απλοί αισθητήρες, ή 8 κανάλια διαφορικών αισθητήρων, Σχ. 2.1. Διαθέτει 8 κανάλια Digital I/O, τα οποία μπορούν να μετρήσουν παλμούς και συχνότητα. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψηφιακό έλεγχο και

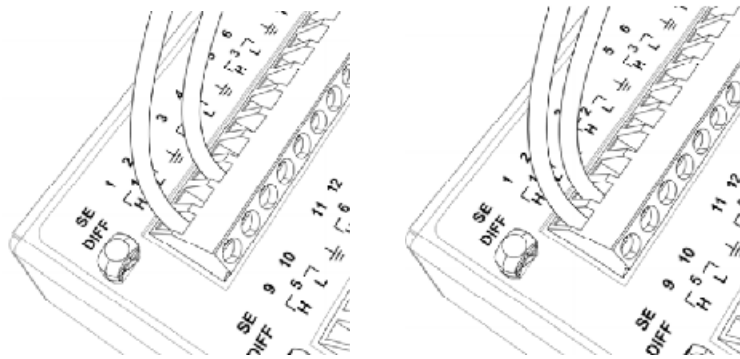
σκανδαλισμό άλλων συστημάτων. Τέσσερα από τα κανάλια σε συνδυασμό με την παρακείμενη παροχή 12 V και τον αντίστοιχο ακροδέκτη G μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση αισθητήρων και περιφερειακών SDM. Δύο κανάλια είναι διαθέσιμα για τη μέτρηση τετραγωνικών παλμών 5 V, κλεισίματος διακοπών ή χαμηλού επιπέδου εναλλασσόμενων σημάτων. Από τον datalogger μπορεί να γίνει τροφοδοσία τάσης 12 V (SW12) ενεργοποιούμενης ή απενεργοποιούμενης από το πρόγραμμα. Επίσης είναι διαθέσιμα 3 κανάλια για την διέγερση συστημάτων τα οποία έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν ρυθμιζόμενη με ακρίβεια, από το πρόγραμμα, τάση μεταξύ - 2.5 V και +2.5 V με ένταση ρεύματος έως 25 mA.



Εικόνα 2.4 Το σύστημα καταγραφής δεδομένων CR1000

Ο CR1000 μετρά αναλογικά τάσεις είτε ολοκληρώνοντας την μέτρηση και αποθηκεύοντας το αποτέλεσμα, είτε κάνοντας μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Η μετατροπή είναι 13 bit, δηλαδή διαθέτει ακρίβεια ένα μέρος στα 2^{13} ή 1/8192 και υπολογίζεται επί του συνολικού εύρους της τάσης. Ο μετατροπέας A/D (Analog/Digital) χρησιμοποιεί 9% μεγαλύτερο εύρος, ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει σε τάσεις έξω από το εύρος τιμών, με αποτέλεσμα η ακρίβεια να διαμορφώνεται σε 1/7500 επί του συνολικού εύρους. Είναι

προφανές από τα προηγούμενα ότι όσο μικρότερο εύρος τιμών αντιστοιχιστεί σε έναν αισθητήρα, με τόσο περισσότερη ακρίβεια θα γίνεται η μέτρηση.



Σχήμα 2.1 Σύνδεση αναλογικού αισθητήρα σε απλό κανάλι στα αριστερά και αναλογικού αισθητήρα σε διαφορικό κανάλι στα δεξιά

Ο datalogger διαθέτει επίσης ενσωματωμένο θερμίστορ για την μέτρηση της θερμοκρασίας των ακροδεκτών σύνδεσης. Η χρησιμότητά του έγκειται στις μετρήσεις θερμοκρασίας με θερμοζεύγη, καθώς η θερμοκρασία των ακροδεκτών στους οποίους συνδέεται το θερμοζεύγος επηρεάζει το αποτέλεσμα της μέτρησης.

Οι εργασίες που εκτελεί ο CR1000 ελέγχονται από το πρόγραμμα το οποίο έχει συνθέσει ο χρήστης του συστήματος. Όπως προαναφέραμε, η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται παρουσιάζει ομοιότητες με την Basic, διαθέτει όμως επιπρόσθετες οδηγίες για την εκτέλεση των μετρήσεων, την αποθήκευση των δεδομένων και τον έλεγχο των ιδιαίτερων δυνατοτήτων του συστήματος όπως για παράδειγμα του ελέγχου της τάσης διέγερσης που παρέχεται από το κανάλι EX1. Ενδεικτικά αναφέρουμε την εντολή για μέτρηση της θερμοκρασίας του πίνακα συνδέσεων του datalogger κάθε 250 msec και αποθήκευσή της με όνομα μεταβλητής RefTemp: PanelTemp(RefTemp,250).

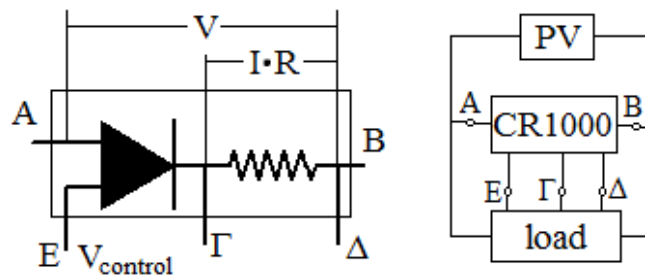
Ένα πρόγραμμα για τον CR1000 αποτελείται από 3 επιμέρους τμήματα: μέτρηση/έλεγχος, επικοινωνία SDM και επεξεργασία αποτελεσμάτων. Η εκτέλεση του προγράμματος μπορεί να γίνει με 2 διαφορετικούς τρόπους: με ταυτόχρονη (Pipelined mode) εκτέλεση των τριών τμημάτων είτε με εκτέλεση των τριών τμημάτων με τη σειρά που αναφέρονται στο πρόγραμμα (Sequential mode). Ο πρώτος τρόπος προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στον έλεγχο όσον αφορά τον χρόνο στον οποίο λαμβάνει χώρα κάθε μέτρηση. Επίσης απαιτεί μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα. Μειονέκτημά του είναι ότι δεν ακολουθεί την ακριβή σειρά των εργασιών όπως αναφέρονται στο πρόγραμμα κάνοντας αδύνατη τη χρήση βρόγχων που περιλαμβάνουν έλεγχο προϋποθέσεων. Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει εκτέλεση κάθε τμήματος ξεχωριστά και με τη σειρά που αναφέρονται στο πρόγραμμα. Μειονέκτημά του είναι ότι είναι πιο αργός καθώς και ότι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διακοπεί προσωρινά η λήψη μετρήσεων ώστε να πραγματοποιηθεί η επικοινωνία με

άλλες συσκευές. Ο μεταγωγτιστής του CR1000 είναι δυνατόν να επιλέξει αυτόματα τον ένα ή τον άλλον τρόπο ανάλογα με τη φύση του προγράμματος.

2.1.2 Περιγραφή του ηλεκτρονικού φορτίου

Το ηλεκτρονικό φορτίο που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη της χαρακτηριστικής I-V του φωτοβολταϊκού, Σχ. 2.2, αποτελείται από ένα transistor, του οποίου η αγωγιμότητα μεταβάλλεται μέσω της εφαρμογής μίας τάσης ελέγχου $V_{control}$ στο άκρο E. Αυτό μας επιτρέπει να μεταβάλλουμε την τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού, V_{AB} . Σε σειρά με το transistor είναι συνδεδεμένη μικρού μεγέθους αντίσταση η οποία επιτρέπει τη μέτρηση του ρεύματος μέσω της πτώσης τάσεως στα άκρα της, $V_{\Gamma\Delta} = I \cdot R_{\Gamma\Delta}$. Η τιμή της αντίστασης $R_{\Gamma\Delta}$ προτείνεται να είναι 1Ω ώστε η πτώση τάσεως στα άκρα της να είναι αριθμητικά ίση με την ένταση του ρεύματος. Η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού καταγράφεται στα σημεία AB.

Η τάση ελέγχου εφαρμόζεται στο ηλεκτρονικό φορτίο από το datalogger με αυτόματο τρόπο. Αυτό δίνει τη δυνατότητα καταγραφής της χαρακτηριστικής I-V του φωτοβολταϊκού τάχιστα και χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

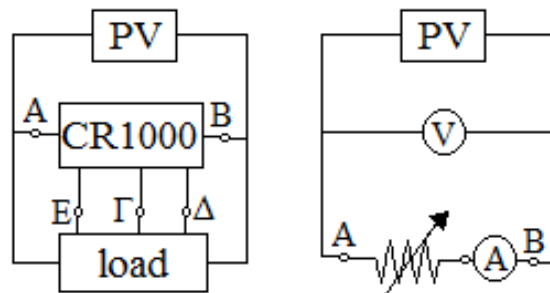


Σχήμα 2.2 Το ηλεκτρονικό φορτίο και η συνδεσμολογία του datalogger με το φορτίο και το φωτοβολταϊκό



Εικόνα 2.5 Το ηλεκτρονικό φορτίο

Το σύστημα καταγραφής της χαρακτηριστικής I-V του φωτοβολταϊκού βασίστηκε στα απλά συστήματα λήψης της που χρησιμοποιούνται στην διδασκαλία των Ηπίων Μορφών Ενέργειας, Σχ. 2.3. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από μία ρυθμιστική αντίσταση, ένα βολτόμετρο και ένα αμπερόμετρο. Κατ' αντιστοιχία, ο datalogger αντικαθιστά το βολτόμετρο και, σε συνδυασμό με την αντίσταση ΓΔ, το αμπερόμετρο. Το ηλεκτρονικό φορτίο αντικαθιστά τη ρυθμιστική αντίσταση.



Σχήμα 2.3 Σύγκριση της πειραματικής διάταξης με συμβατική διάταξη χάραξης της χαρακτηριστικής I – V

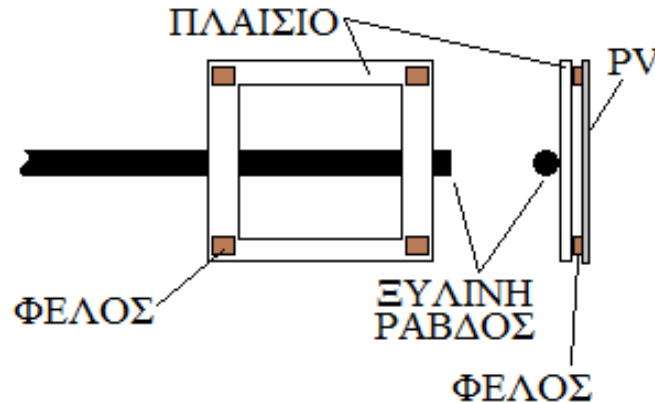
2.1.3 Φωτοβολταϊκό και διάταξη στήριξης

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε τμήμα φωτοβολταϊκού στοιχείου από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο της εταιρίας Solartec, διαστάσεων 5 cm επί 5cm, Εικ. 2.6. Η κοπή του φωτοβολταϊκού έγινε με LASER και επιλέχθηκε τμήμα του από το οποίο διέρχεται ένας από τους κύριους αγωγούς του.



Εικόνα 2.6 Το φωτοβολταϊκό που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη στήριξή του, Σχ. 2.4, αποτελείται από έναν τρίποδα στον οποίο προσαρμόστηκε ξύλινη ράβδος κυλινδρικής διατομής διαμέτρου 5 mm ώστε να υποστηρίζει τα καλώδια της μετρητικής διάταξης.



Σχήμα 2.4 Η διάταξη στήριξης του φωτοβολταϊκού

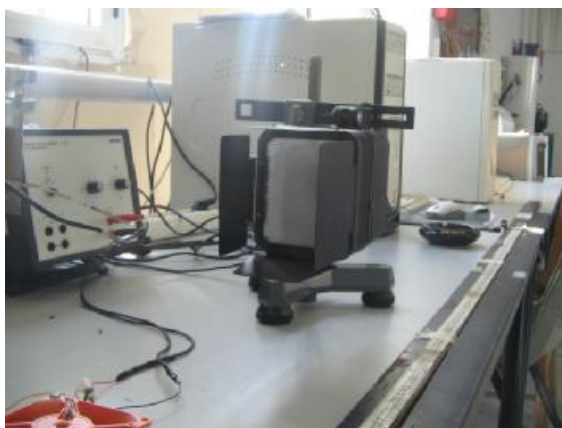
Στη ράβδο στηρίχθηκε πλαίσιο από λεπτό πλαστικό πάχους 1 mm με διαστάσεις όμοιες με αυτές του φωτοβολταϊκού. Για την προσαρμογή του φωτοβολταϊκού στο πλαίσιο χρησιμοποιήθηκαν κομμάτια φελλού 2x2 mm τα οποία κρατούν σε απόσταση το φωτοβολταϊκό από το πλαίσιο ώστε να είναι δυνατή η ελεύθερη κυκλοφορία αέρα στο πίσω μέρος του.

2.1.4 Περιγραφή της διάταξης φωτισμού και ελέγχου της έντασης της ακτινοβολίας

Ο φωτισμός του φωτοβολταϊκού έγινε μέσω προβολέα αλογόνου ισχύος 1000W, Εικ. 2.7. Ο προβολέας μετά από διαστασιολόγηση που έγινε στο εργαστήριο των Ηπίων Μορφών Ενέργειας βρέθηκε ότι δίνει ακτινοβολία έντασης 1000 W/m² σε απόσταση 70 cm. Η ένταση της ακτινοβολίας σημειακής πηγής είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή. Αυτό συνεπάγεται ότι με γνωστή την απόσταση του προβολέα από το φωτοβολταϊκό, και με απόσταση αναφοράς τα 70 cm, είναι δυνατό να υπολογιστεί η συγκέντρωση της ακτινοβολίας, C. Θα ισχύει:

$$C = \frac{70^2}{d^2} \quad (2.1)$$

όπου: d η απόσταση του φωτοβολταϊκού από τον προβολέα



Εικόνα 2.7 Ο προβολέας 1kW που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα

Κατά συνέπεια, η ένταση της ακτινοβολίας για απόσταση d cm είναι:

$$I_T = \frac{70^2}{d^2} * 1000 \text{ W/m}^2 \quad (2.2)$$

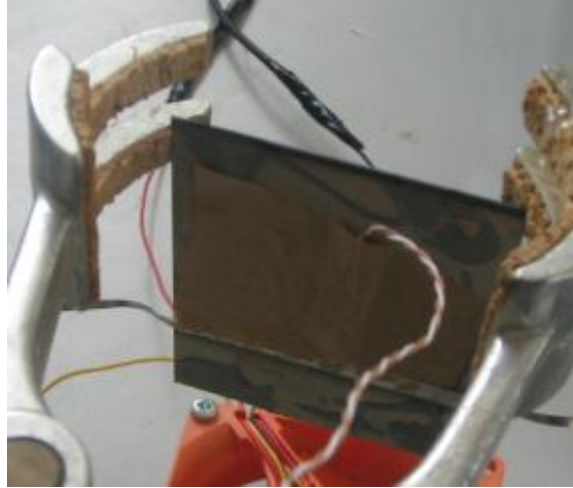
Για τον προσδιορισμό της απόστασης του προβολέα από το φωτοβολταϊκό, προσαρμόστηκε επί του πάγκου εργασίας μετρητική ταινία με την αρχή της στο σημείο που προβάλλεται η εμπρόσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού.

2.1.5 Περιγραφή της διάταξης ελέγχου και μέτρησης της θερμοκρασίας

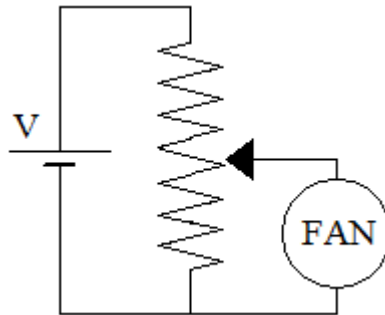
Στο μέσον της οπίσθιας επιφάνειας του φωτοβολταϊκού προσαρμόστηκε θερμοζεύγος χαλκού – κωνσταντάνης για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του, Εικ. 2.8. Λόγω της φύσης του πειράματος και της μικρής μάζας του φωτοβολταϊκού, οι μεταβολές της θερμοκρασίας λαμβάνουν χώρα με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Γι' αυτό επιλέχθηκε θερμοζεύγος πολύ μικρής διαμέτρου, περίπου 1 mm, ώστε να ακολουθεί τις μεταβολές στη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού, με την ελάχιστη χρονική υστέρηση λόγω της μάζας του. Σε φαινόμενα μεταβολής της θερμοκρασίας είναι γνωστό ότι η σταθερά χρόνου του φαινομένου είναι ανάλογη της μάζας του αντικειμένου. Όμοιο θερμοζεύγος χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Προκειμένου να επαληθευτεί η εξάρτηση του ρεύματος και της τάσης από τη θερμοκρασία, επιχειρήθηκε η λήψη μετρήσεων σε θερμοκρασίες που αντιστοιχούν σε επίπεδα έντασης ακτινοβολίας χαμηλότερα από το τρέχον επίπεδο. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε ένα απλό σύστημα ψύξης εξαναγκασμένης ροής αέρα. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε ανεμιστήρας διαμέτρου 6 cm, με ονομαστική παροχή $0,014 \text{ m}^3/\text{s}$ για τάση τροφοδοσίας 12 V. Ο έλεγχος της παροχής έγινε μέσω μεταβολών της τάσης τροφοδοσίας και κατά

συνέπεια της ταχύτητας περιστροφής του ανεμιστήρα έτσι ώστε η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού να προσεγγίζει κάθε φορά θερμοκρασία λειτουργίας σε χαμηλότερη ένταση ακτινοβολίας. Οι μεταβολές της τάσης πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση διαιρέτη τάσης με τη διάταξη που απεικονίζεται στο σχήμα 2.5.



Εικόνα 2.8 Θερμοζεύγος τοποθετημένο στο φωτοβολταϊκό. Διακρίνεται ο ανεμιστήρας που χρησιμοποιήθηκε για την ψύξη του.



Σχήμα 2.5 Διάταξη τροφοδοσίας του ανεμιστήρα και ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του

2.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Διεξήχθη μία σειρά πειραμάτων, για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας. Για κάθε επίπεδο έντασης ρυθμίζεται η επιθυμητή απόσταση του φωτοβολταϊκού από τον προβολέα και ακολουθούν οι παρακάτω σειρές μετρήσεων.

Η πρώτη σειρά μετρήσεων ξεκινά τη στιγμή που ο προβολέας ανάβει, όπου το φωτοβολταϊκό μας δίνει τη μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος και την ελάχιστη ένταση του ρεύματος βραχυκυκλώματος για την συγκεκριμένη ακτινοβολία. Τότε, η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού αρχίζει να αυξάνεται

μέχρι μία μέγιστη τιμή, επηρεάζοντας την τάση και το ρεύμα. Στο πρώτο στάδιο του πειράματος, γίνεται καταγραφή της θερμοκρασίας, της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκυκλώματος συναρτήσει του χρόνου. Όταν το φωτοβολταϊκό φτάσει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, γίνεται ανάκτηση των δεδομένων από το datalogger.

Το δεύτερο στάδιο του πειράματος ξεκινά με ενεργοποίηση του προγράμματος του datalogger το οποίο επιτρέπει τη λήψη τιμών ρεύματος συναρτήσει της τάσης, μέσω μεταβολής της αγωγιμότητας του ηλεκτρονικού φορτίου, ώστε να είναι δυνατή η χάραξη της χαρακτηριστικής I-V του φωτοβολταϊκού. Ταυτοχρόνως, καταγράφεται η θερμοκρασία του. Ειδικά το δεύτερο στάδιο του πειράματος, πραγματοποιήθηκε και για δύο ακόμα, κοντινά στα βασικά, επίπεδα ακτινοβολίας, ώστε να δημιουργηθούν τριάδες χαρακτηριστικών I-V, οι οποίες δύναται να αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό της r_s του φωτοβολταϊκού.

Το τρίτο στάδιο του πειράματος περιλαμβάνει την καταγραφή της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού συναρτήσει του χρόνου, από τη στιγμή που παύει να προσπίπτει σε αυτό ακτινοβολία έως ώτου η θερμοκρασία του εξισωθεί με αυτή του περιβάλλοντος. Χρησιμοποιείται το ίδιο πρόγραμμα με το πρώτο βήμα.

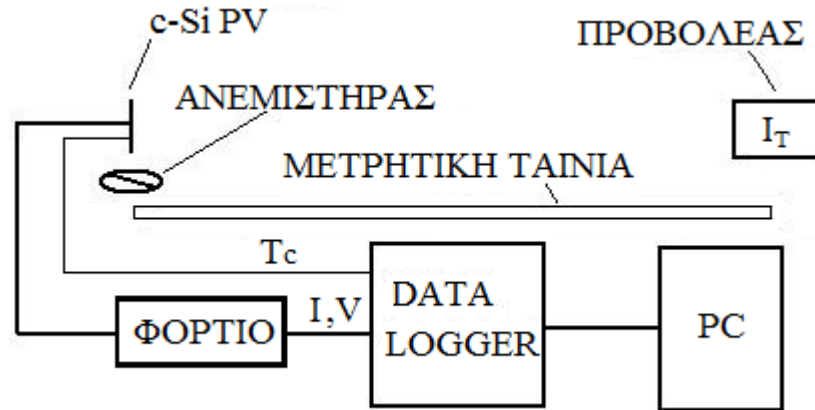
Πραγματοποιήθηκαν επιπλέον μετρήσεις και για τα τρία τμήματα, κατά τη διάρκεια των οποίων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ψύξης ώστε να γίνει επαναφορά της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στις τιμές θερμοκρασίας χαμηλότερων εντάσεων.

Για να υπάρχει συγκρισιμότητα μεταξύ των μετρήσεων, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στον έλεγχο της ακτινοβολίας. Για αυτό το σκοπό, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν μετά τη δύση του ηλίου, εφόσον δεν ήταν δυνατό να απομονωθεί η πειραματική διάταξη από το περιβάλλον σε αυτόν τον τομέα. Επίσης σημαντικός για την σωστή διεξαγωγή του πειράματος ήταν ο αποκλεισμός ύπαρξης ανακλώμενης ακτινοβολίας, έστω και αν η πηγή της ήταν ο προβολέας, και επιτεύχθηκε με τη χρήση υφάσματος μαύρου χρώματος με το οποίο καλύφθηκε ο πάγκος εργασίας καθώς και οι παρακείμενες στην πειραματική διάταξη επιφάνειες.

Για τη λήψη συγκρίσιμων αποτελεσμάτων, έπρεπε να λάβουμε υπόψη ότι το φωτοβολταϊκό εκμεταλλεύεται εξ' ολοκλήρου μόνο την ακτινοβολία η οποία προσπίπτει κάθετα στην επιφάνειά του. Συνεπώς, μετά από κάθε μετακίνηση του προβολέα, διορθώθηκε η θέση του εξασφαλίζοντας ότι η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού είναι παράλληλη με την επιφάνεια του προβολέα. Προς τούτο χρησιμοποιήθηκε νήμα της στάθμης, για τον κάθετο άξονα, και γνώμονας με ευθεία αναφοράς τη μετρητική ταινία, για τον οριζόντιο άξονα.

Πέρα από τον έλεγχο της ακτινοβολίας, έπρεπε να αποκλειστεί η ύπαρξη ακόμα και ασθενών ρευμάτων αέρα στο χώρο του πειράματος, τα οποία θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα πειραματικά δεδομένα ψύχοντας το εξαιρετικά μικρής μάζας φωτοβολταϊκό.

Η παρακολούθηση της εξέλιξης των φαινομένων κατά τη διάρκεια του πειράματος, έγινε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, στον οποίο ήταν συνδεδεμένος ο datalogger με καλώδιο RS232, και του λογισμικού PC200W. Στο Σχ. 2.6 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη, σε διάγραμμα.



Σχήμα 2.6 Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που διεξήχθη καθώς και τα μεγέθη τα οποία υπολογίσθηκαν από την περαιτέρω επεξεργασία τους.

Για την περιγραφή του φαινομένου, κρίθηκε απαραίτητος ο σχεδιασμός διαγραμμάτων των υπολογισθέντων μεγεθών συναρτήσει της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας, όπως υπολογίζεται στην παράγραφο 2.1.4, και της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού, ανάλογα με την περίπτωση.

3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1.1 Αποτελέσματα πρώτης σειράς μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, η πρώτη σειρά μετρήσεων που ελήφθη περιλαμβάνει τις μεταβολές της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}), του ρεύματος βραχυκυκλώματος (I_{sc}), και της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού (T_c), από την έναρξη φωτισμού του, έως την επίτευξη της κατάστασης ισορροπίας. Έχει επίσης γίνει καταγραφή της ελάττωσης της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, από τη στιγμή που το φωτοβολταϊκό παύει να φωτίζεται, έως ότου η θερμοκρασία του προσεγγίσει την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Παρακάτω, στους πίνακες 3.1 έως 3.26, παρατίθενται τμήματα των πινάκων μετρήσεων κατά τρόπο ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να έχει εικόνα της εξέλιξης του φαινομένου.

Πίνακας 3.1: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής 70 cm
(C=1) χωρίς ψύξη

Αύξηση			Μείωση						
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	4,70	21,06	32	546,11	30,89	0	37,97	30	28,95
1	570,96	21,15	33	545,43	31,05	1	37,89	31	28,7
2	569,62	21,4	35	544,76	31,46	2	37,73	32	28,54
3	568,27	21,65	36	544,09	31,62	3	37,49	33	28,29
4	566,93	22,06	38	543,42	32,03	4	37,17	34	28,13
5	565,59	22,48	40	542,75	32,36	5	36,76	35	27,96
6	564,91	22,89	42	542,08	32,68	6	36,44	36	27,8
7	563,57	23,31	44	541,40	32,93	7	36,03	37	27,63
8	562,23	23,72	46	540,73	33,17	8	35,63	38	27,47
9	561,56	24,06	48	540,06	33,49	9	35,23	39	27,3
10	560,21	24,47	50	539,39	33,74	10	34,82	40	27,14
11	559,54	24,8	53	538,72	34,14	11	34,41	41	26,97
12	558,20	25,21	56	538,05	34,5	12	34,01	42	26,81
13	557,53	25,55	59	537,37	34,71	13	33,68	44	26,56
14	556,85	25,88	62	536,70	34,98	14	33,28	46	26,32
15	556,18	26,21	66	536,03	35,31	15	32,95	48	26,15
16	555,51	26,54	70	535,36	35,52	16	32,63	50	25,9
17	554,84	26,87	76	534,69	35,93	17	32,3	52	25,65
18	554,17	27,28	79	534,02	36,09	18	32,06	54	25,41
19	553,49	27,52	85	533,34	36,44	19	31,73	58	24,99
20	552,82	27,85	93	532,67	36,76	20	31,4	62	24,66
21	552,15	28,1	105	532,00	37	21	31,16	68	24,25
22	551,48	28,43	114	532,00	37,25	22	30,83	73	23,92
23	550,81	28,76	124	531,33	37,33	23	30,59	79	23,59
24	550,14	29	139	530,66	37,65	24	30,26	85	23,25
25	549,46	29,25				25	30,01	92	22,92
26	548,79	29,58				26	29,77	101	22,59
28	548,12	30,07				27	29,52	112	22,26
29	547,45	30,23				28	29,36	124	21,92
30	546,78	30,48				29	29,11	137	21,59

Πίνακας 3.2: Μεταβολή του ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 70 cm (C=1) χωρίς ψύξη

Αύξηση			Μείωση					
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	20,98	0	37,97	34	28,21	82	23,42
1	256,24	21,06	1	37,89	36	27,88	85	23,25
2	263,03	21,31	3	37,65	38	27,55	88	23,09
3	264,73	21,56	4	37,33	40	27,22	92	22,92
8	266,42	23,56	5	37	42	26,89	97	22,75
11	268,12	24,64	6	36,6	44	26,65	102	22,59
25	269,82	29,09	7	36,2	46	26,4	107	22,42
28	271,51	29,91	8	35,79	48	26,15	112	22,26
45	273,21	33,01	9	35,47	50	25,9	118	22,09
47	273,21	33,25	10	34,98	52	25,74	125	21,92
49	273,21	33,52	11	34,66	54	25,49	130	21,76
53	273,21	33,98	12	34,25	56	25,24	137	21,59
59	273,21	34,63	14	33,52	58	25,08		
60	274,91	34,79	16	32,79	60	24,91		
62	274,91	34,98	18	32,14	62	24,75		
74	274,91	35,77	20	31,57	64	24,58		
78	274,91	36,03	22	31	66	24,41		
82	274,91	36,28	24	30,42	68	24,25		
87	274,91	36,49	26	29,93	71	24,08		
94	274,91	36,84	28	29,44	73	23,92		
105	276,60	37	30	29,03	77	23,75		
156	278,29	37,97	32	28,62	79	23,59		

Πίνακας 3.3: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής 70 cm (C=1) με ψύξη

Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	79,28	20,34	30	557,62	25,41	0	27,20	25	22,34
1	573,07	20,42	31	557,62	25,49	1	27,22	26	22,26
2	571,72	20,51	32	557,62	25,58	2	27,11	27	22,17
3	571,05	20,76	33	557,62	25,66	3	26,89	28	22,09
4	569,71	21,01	34	557,62	25,66	4	26,65	29	22,01
5	569,04	21,26	35	556,94	25,66	5	26,32	31	21,84
6	567,69	21,59	36	556,94	25,74	6	26,07	33	21,76
7	567,02	21,84	37	556,94	25,82	7	25,74	34	21,67
8	566,35	22,18	38	556,94	25,82	8	25,49	36	21,59
9	565,68	22,34	39	556,94	25,82	9	25,16	38	21,51
10	565,01	22,51	40	556,94	25,91	10	24,91	41	21,42
11	564,33	22,76	41	556,94	25,91	11	24,66	44	21,34
12	563,66	23,01	42	556,94	25,99	12	24,42	47	21,26
13	562,99	23,26	43	556,94	25,99	13	24,08	51	21,17
14	562,99	23,42	44	556,27	25,99	14	23,92	55	21,09
15	562,32	23,59	45	556,94	25,99	15	23,67	60	21,01
16	561,65	23,75	46	556,94	26,07	16	23,5	66	20,92
17	561,65	24,00	47	556,94	26,07	17	23,34	75	20,84
18	560,97	24,09	48	556,27	26,07	18	23,17	86	20,78
19	560,97	24,25	49	556,94	26,07	19	23,09	97	20,70
20	560,30	24,33	50	556,94	26,07	20	22,92	117	20,62
21	560,30	24,42	51	556,94	26,07	21	22,76	148	20,53
22	559,63	24,58	52	556,94	26,07	22	22,67	168	20,45
23	559,63	24,67	53	556,94	26,07	23	22,51		
24	558,96	24,75	54	556,94	26,15				
25	558,96	24,91	55	556,94	26,15				
26	558,29	25,16	56	556,27	26,15				
27	558,29	25,24	89	555,60	26,43				
28	558,29	25,33	114	554,93	26,51				
29	558,29	25,33	133	554,26	26,76				

Πίνακας 3.4: Μεταβολή του ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 70 cm (C=1) με ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0,00	20,34	0	27,22	22	22,51
1	269,86	20,42	1	27,03	23	22,42
2	271,55	20,59	2	26,81	24	22,34
4	273,25	21,09	3	26,48	25	22,17
6	274,95	21,68	4	26,23	27	22,09
9	276,64	22,43	5	25,9	28	22,01
13	276,64	23,34	6	25,66	29	21,92
15	276,64	23,67	7	25,33	30	21,84
16	278,34	23,84	8	24,99	32	21,76
19	278,34	24,25	9	24,75	33	21,67
32	276,64	25,58	10	24,5	35	21,59
35	276,64	25,74	11	24,25	37	21,51
40	276,64	25,91	12	24	40	21,42
41	278,34	25,91	13	23,75	42	21,34
43	278,34	25,99	14	23,59	46	21,26
45	280,04	25,99	15	23,42	49	21,17
47	280,04	26,07	16	23,25	53	21,09
51	280,04	26,15	17	23,09	59	21,01
58	280,04	26,24	18	23	65	20,92
66	280,04	26,4	19	22,84	72	20,84
70	280,04	26,43	20	22,67	85	20,78
84	281,74	26,43	21	22,59	95	20,7

Πίνακας 3.5: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής
60 cm (C=1,36) χωρίς ψύξη

Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	4,03	20,67	33	546,78	35,06	0	44,93	33	31,08
1	582,38	20,84	34	546,10	35,31	1	44,61	34	30,75
2	580,36	21,17	35	545,43	35,63	2	44,13	35	30,59
3	579,02	21,59	37	544,76	36,03	3	43,5	36	30,34
4	577,00	22,09	38	544,09	36,28	4	42,94	37	30,1
5	574,99	22,67	39	543,42	36,52	5	42,3	38	29,85
6	573,64	23,25	41	542,75	36,92	6	41,74	39	29,69
7	572,30	23,92	42	542,07	37,08	7	41,1	40	29,44
8	570,29	24,41	44	541,40	37,57	8	40,46	41	29,28
9	568,94	24,99	45	540,73	37,73	9	39,82	42	29,11
10	567,60	25,57	47	540,06	38,05	10	39,26	43	28,95
11	566,26	26,15	49	539,39	38,37	11	38,7	44	28,78
12	564,91	26,65	51	538,72	38,7	12	38,29	45	28,62
13	563,57	27,22	53	538,04	39,02	13	37,81	46	28,46
14	562,90	27,8	55	537,37	39,26	14	37,41	47	28,29
15	561,55	28,29	57	536,70	39,58	15	36,92	48	28,13
16	560,88	28,78	59	536,03	39,82	16	36,52	49	27,96
17	559,54	29,28	62	535,36	40,06	17	36,12	50	27,8
18	558,20	29,77	65	534,69	40,46	18	35,71	52	27,47
19	557,52	30,18	68	534,01	40,7	19	35,31	55	27,14
20	556,85	30,59	72	533,34	41,02	20	34,98	58	26,73
21	555,51	31	76	532,6701	41,34	21	34,66	61	26,4
22	554,84	31,4	81	532,00	41,66	22	34,25	65	25,9
23	553,49	31,81	84	531,33	41,82	23	33,93	69	25,57
24	552,82	32,22	92	530,66	42,22	24	33,6	73	25,24
25	552,15	32,63	98	529,98	42,54	25	33,28	80	24,83
26	551,48	32,95	105	529,3115	42,78	26	33,03	88	24,33
27	550,81	33,28	111	528,64	43,1	27	32,71	97	23,92
28	550,13	33,6	124	527,97	43,18	28	32,38	109	23,42
29	549,46	33,93	136	527,30	43,66	29	32,06	120	23
30	548,79	34,25	152	526,62	43,89	30	31,81	131	22,67
31	548,12	34,5	170	525,953	44,29	31	31,57	146	22,26
32	547,4478	34,82	183	525,2813	44,53	32	31,24	160	21,92

Πίνακας 3.6: Μεταβολή του ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 60 cm (C=1,36) χωρίς ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	20,67	0	44,93	30	31,97
1	375,03	21,01	1	44,77	31	31,73
2	375,03	21,34	2	44,37	32	31,4
3	376,72	21,84	3	43,89	33	31,16
5	376,72	23	4	43,18	34	30,91
6	376,72	23,59	5	42,62	35	30,67
7	376,72	24,17	6	42,06	36	30,42
8	376,72	24,66	7	41,42	37	30,18
10	378,42	25,82	8	40,7	38	29,93
11	378,42	26,48	9	40,06	41	29,44
12	380,12	26,98	10	39,58	42	29,19
13	380,12	27,47	11	39,02	44	28,87
14	381,81	27,96	12	38,53	47	28,37
15	381,81	28,46	13	38,05	49	28,04
16	383,51	29,03	14	37,57	52	27,63
19	385,21	30,42	15	37,25	55	27,14
29	386,91	34,09	16	36,76	59	26,65
31	388,60	34,66	17	36,36	62	26,32
41	390,30	37,08	18	35,95	65	25,99
55	392,00	39,34	19	35,55	70	25,49
67	393,69	40,62	20	35,14	75	25,16
91	395,39	42,22	21	34,82	80	24,83
108	397,09	43,02	22	34,41	86	24,5
			23	34,09	92	24,17
			24	33,77	101	23,83
			25	33,44	108	23,5
			26	33,2	118	23,09
			27	32,87	128	22,75
			28	32,55	139	22,42
			29	32,22		

Πίνακας 3.7: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής
60 cm (C=1,36) με ψύξη

Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	48,37	19,75	28	565,68	25,82	0	27,8	22	22,25
1	584,49	19,84	29	565,68	25,9	1	27,8	23	22,17
2	582,47	20	30	565,68	25,98	2	27,63	24	22,01
3	581,13	20,34	31	565,01	26,07	3	27,3	25	21,92
4	579,79	20,59	32	565,01	26,15	4	26,97	26	21,84
5	578,44	21,01	33	565,01	26,23	5	26,64	27	21,76
6	577,10	21,34	34	565,01	26,23	6	26,23	28	21,67
7	575,75	21,76	35	565,01	26,31	7	25,82	29	21,59
8	575,08	22,17	36	564,33	26,4	8	25,49	30	21,51
9	573,74	22,5	42	563,66	26,56	9	25,08	32	21,42
10	573,07	22,75	51	563,66	26,73	10	24,74	33	21,34
11	572,40	23	61	562,99	26,89	11	24,41	35	21,26
12	571,72	23,34	75	562,32	27,22	12	24,08	36	21,17
13	571,05	23,58	82	562,32	27,39	13	23,83	38	21,09
14	570,38	23,92	101	562,32	27,3	14	23,58	39	21,01
15	569,71	24,08	116	562,30	27,22	15	23,42	42	20,92
16	569,04	24,25	131	561,63	27,47	16	23,17	44	20,84
18	568,36	24,66	147	560,96	27,72	17	23	47	20,75
20	567,69	24,91	167	560,28	27,96	18	22,75	50	20,7
22	567,02	25,24	195	560,28	27,96	19	22,67	51	20,67
24	566,35	25,41	235	560,27	28,04	20	22,59	54	20,59
27	565,68	25,74				21	22,42	90	20,28

Πίνακας 3.8: Μεταβολή του ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 60 cm (C=1,36) με ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	19,92	0	27,8	23	22,09
1	364,91	20,17	1	27,72	24	22,01
2	366,60	20,42	2	27,47	25	21,92
3	366,60	20,84	3	27,22	26	21,84
4	366,60	21,17	4	26,81	27	21,67
5	366,60	21,59	5	26,4	29	21,59
6	366,60	22,01	6	25,98	30	21,51
7	366,60	22,34	7	25,65	31	21,42
8	366,60	22,67	8	25,24	32	21,34
9	366,60	22,92	9	24,91	34	21,26
10	366,60	23,17	10	24,58	35	21,17
11	366,60	23,42	11	24,25	37	21,09
12	368,30	23,75	12	24	39	21,01
15	368,30	24,41	13	23,75	41	20,92
17	368,30	24,74	14	23,5	43	20,84
18	368,30	24,91	15	23,25	46	20,75
19	368,30	24,99	16	23,09	49	20,67
20	368,30	25,16	17	22,92	53	20,59
98	370,00	27,3	18	22,75	60	20,5
133	371,69	27,55	19	22,67	65	20,42
148	373,39	27,72	20	22,5	70	20,36
150	375,09	27,72	21	22,34	90	20,25
153	376,79	27,72	22	22,17		

Πίνακας 3.9: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής
50 cm (C=1,96) χωρίς ψύξη

Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	593,08	20,45	37	540,69	40,86	0	53,6	38	34,19
1	591,74	20,7	38	540,02	41,18	1	53,14	39	33,87
2	589,05	21,2	39	539,35	41,42	2	52,51	40	33,62
3	586,37	21,79	40	538,68	41,66	3	51,73	41	33,38
4	584,35	22,45	41	538,01	41,98	4	51,02	42	33,22
5	581,67	23,12	43	537,34	42,3	5	50,16	43	32,89
6	579,65	23,86	46	535,99	42,78	6	49,37	44	32,65
7	577,64	24,69	47	535,32	43,09	7	48,59	45	32,4
8	575,62	25,44	48	534,65	43,33	8	47,88	46	32,24
9	573,61	26,18	50	533,98	43,73	9	47,09	48	31,91
10	571,59	26,92	51	533,31	43,89	10	46,45	49	31,67
11	569,58	27,66	53	532,63	44,29	11	45,82	50	31,51
12	568,23	28,4	54	531,96	44,53	12	45,11	51	31,26
13	566,22	29,22	56	531,29	44,92	13	44,47	52	31,1
14	564,87	29,88	58	530,62	45,16	14	43,91	53	30,94
15	562,86	30,53	59	529,95	45,24	15	43,36	54	30,77
16	561,52	31,24	62	529,28	45,64	16	42,8	55	30,61
17	560,17	31,97	64	528,6042	45,95	17	42,24	56	30,36
18	558,83	32,62	67	527,93	46,35	18	41,76	58	30,12
19	557,49	33,3	69	527,26	46,67	19	41,2	59	29,95
20	556,14	33,76	72	526,59	46,9	20	40,72	60	29,79
21	554,80	34,25	74	525,92	47,14	21	40,24	61	29,63
22	554,13	34,77	78	525,25	47,38	23	39,36	63	29,38
23	552,78	35,3	83	524,57	47,85	24	38,88	65	29,05
24	551,44	35,87	87	523,90	48,09	25	38,39	67	28,81
25	550,77	36,38	91	523,23	48,33	26	38,07	70	28,48
26	549,43	36,87	96	522,56	48,64	27	37,59	74	27,99
27	548,75	37,32	102	521,89	48,96	28	37,27	80	27,33
28	548,08	37,76	107	521,22	49,27	29	36,86	87	26,67
29	546,74	38,13	125	519,88	49,9	30	36,54	96	26,01
30	546,07	38,53	134	519,2079	50,14	31	36,14	109	25,18
31	545,40	38,93	146	518,54	50,84	32	35,81	119	24,77
32	544,05	39,26	153	517,86	51,16	33	35,49	131	24,27
33	543,38	39,66	181	516,52	51,44	34	35,17	148	23,77
34	542,71	39,98	206	515,85	52,46	35	34,92	167	23,28
35	542,04	40,3	224	515,1779	52,69	36	34,68	190	22,75
36	541,37	40,54	242	514,4945	52,77	37	34,44	219	22,5

Πίνακας 3.10: Μεταβολή ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 50 cm (C=1,96) χωρίς ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	20,54	0	53,76	37	34,52
1	534,42	20,95	1	53,37	38	34,35
2	536,12	21,45	2	52,82	39	34,03
3	537,82	22,12	3	52,12	40	33,71
4	539,51	22,78	4	51,41	41	33,54
5	539,51	23,53	5	50,63	42	33,22
10	541,21	27,25	6	49,77	43	33,06
13	542,91	29,55	7	48,9	44	32,81
14	542,91	30,2	8	48,19	45	32,57
15	546,30	30,94	9	47,48	46	32,32
16	546,30	31,68	10	46,77	47	32,08
17	547,99	32,33	11	46,14	49	31,75
18	547,99	32,98	12	45,5	51	31,43
19	547,99	33,55	13	44,79	53	31,02
20	551,39	34,09	14	44,15	54	30,77
21	551,39	34,6	15	43,6	57	30,28
29	553,08	38,29	16	43,04	62	29,63
30	554,78	38,77	17	42,56	65	29,13
32	554,78	39,42	18	41,92	69	28,64
33	556,48	39,82	19	41,44	73	28,15
35	558,17	40,46	20	40,96	76	27,82
44	558,17	42,46	21	40,48	80	27,41
45	559,87	42,62	22	40	84	27
46	561,57	42,94	23	39,52	87	26,67
62	561,57	45,72	24	39,12	94	26,17
63	563,26	45,8	25	38,64	103	25,51
66	564,96	46,27	26	38,23	110	25,18
80	564,96	47,54	27	37,83	123	24,69
83	564,96	47,93	28	37,43	135	24,19
93	566,66	48,4	29	37,11	152	23,69
119	575,13	49,59	30	36,7	168	23,28
124	576,82	49,9	31	36,38	185	22,92
129	578,52	49,98	32	35,97	199	22,67
137	578,52	50,37	33	35,65	221	22,42
139	580,22	50,61	34	35,33	245	22,17
179	581,91	51,39	35	35	265	21,92
359	583,61	53,84	36	34,84	291	21,67

Πίνακας 3.11: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής 50 cm (C=1,96) με ψύξη

Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	6,72	19,97	21	571,63	27,57	0	31,61	26	22,8
1	594,47	20,14	23	570,96	27,9	1	31,45	27	22,64
2	591,78	20,47	25	570,29	28,23	2	31,04	28	22,55
3	589,77	20,97	28	569,61	28,59	3	30,47	29	22,47
4	587,75	21,56	32	568,94	28,89	4	29,9	30	22,39
5	585,74	22,14	37	568,27	29,21	5	29,24	31	22,3
6	584,39	22,64	45	567,60	29,46	6	28,67	33	22,22
7	583,05	23,14	55	566,93	29,79	7	28,09	34	22,14
8	581,71	23,64	75	566,26	30,03	8	27,6	35	22,05
9	580,36	24,19	88	565,58	30,28	9	27,1	37	21,97
10	579,02	24,63	131	564,91	30,42	10	26,69	38	21,89
11	578,35	24,96	171	564,24	30,66	11	26,2	39	21,8
12	577,00	25,34	224	563,57	30,91	12	25,87	40	21,72
13	576,33	25,79	315	562,90	31,4	13	25,45	42	21,64
14	575,66	26,12	327	562,23	31,56	14	25,12	44	21,55
15	574,99	26,45				15	24,79	48	21,47
16	574,32	26,69				16	24,63	50	21,39
17	573,64	26,91				17	24,38	56	21,3
18	572,97	27,08				18	24,13	59	21,22
20	572,30	27,49				19	23,88	63	21,11
						20	23,72	66	21,05
						21	23,47	67	21,02
						22	23,3	70	20,97
						23	23,13	73	20,89
						24	22,97	76	20,86
						25	22,89	86	20,8

Πίνακας 3.12: Μεταβολή του ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 50 cm (C=1,96) με ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	19,97	0	31,53	28	22,97
1	536,13	20,31	5	31,29	29	22,8
2	537,82	20,72	6	30,8	30	22,72
3	539,52	21,31	7	30,14	31	22,64
4	542,91	21,81	8	29,57	32	22,47
6	544,61	22,89	9	28,99	33	22,39
10	546,31	24,71	10	28,42	34	22,3
16	546,31	26,78	11	27,84	36	22,22
18	548,00	27,27	12	27,35	37	22,14
21	549,70	27,68	13	26,86	39	22,05
33	549,70	29,05	14	26,44	40	21,97
34	551,40	29,05	15	26,03	41	21,89
63	551,40	29,95	16	25,62	43	21,8
67	553,09	29,95	17	25,21	44	21,72
130	553,10	30,74	18	24,96	46	21,64
			19	24,71	48	21,55
			20	24,46	53	21,39
			21	24,21	59	21,3
			22	24,05	62	21,22
			23	23,8	66	21,14
			24	23,63	69	21,02
			25	23,38	74	20,94
			26	23,22	76	20,89
			27	23,05	78	20,86

Πίνακας 3.13: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής
40 cm (C=3,06) χωρίς ψύξη

Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	603,18	21,43	37	527,27	50,77	0	64,8	36	39,45
1	599,82	21,85	38	526,60	51,32	1	64,49	37	39,04
2	595,79	22,51	39	525,93	51,71	2	63,96	38	38,64
3	592,43	23,43	40	524,59	52,02	3	63,27	39	38,32
4	588,40	24,42	41	523,92	52,41	4	62,35	40	38
5	585,04	25,5	42	523,24	52,81	5	61,35	41	37,68
6	582,35	26,57	43	522,57	53,12	6	60,28	42	37,35
7	578,99	27,72	44	521,90	53,43	7	59,12	44	36,79
8	576,31	28,79	45	521,23	53,74	8	58,11	46	36,22
9	572,95	29,94	47	519,89	54,29	9	57,19	47	35,9
10	570,26	31,08	48	519,21	54,52	10	56,1	48	35,58
11	568,25	32,23	50	517,87	55,14	11	55,17	49	35,25
12	565,56	33,36	52	517,20	55,69	12	54,15	51	34,77
13	563,55	34,34	53	516,53	55,92	13	53,3	53	34,36
14	560,86	35,39	55	515,86	56,39	14	52,52	55	33,96
15	558,84	36,36	56	515,18	56,62	15	51,73	57	33,55
16	556,83	37,33	58	514,51	57,01	16	50,87	59	33,14
17	554,81	38,22	59	513,84	57,16	17	50,09	61	32,82
18	552,80	39,18	62	513,17	57,7	18	49,3	63	32,41
19	550,78	39,98	66	511,83	57,94	19	48,59	65	32,09
20	549,44	40,79	68	511,15	58,4	20	47,88	67	31,68
21	547,43	41,59	70	510,48	58,63	21	47,17	70	31,35
22	546,08	42,38	76	508,47	59,02	22	46,54	73	30,86
23	544,07	43,1	79	507,80	59,64	23	45,98	76	30,53
24	542,72	43,82	83	507,12	60,25	24	45,35	78	30,13
25	541,38	44,45	89	506,45	60,64	25	44,72	84	29,55
26	540,04	45,09	97	505,11	61,02	26	44,16	90	28,9
27	538,69	45,72	106	504,44	61,48	27	43,68	98	28,24
28	537,35	46,36	111	503,75	61,94	28	43,12	107	27,58
29	536,01	46,83	117	503,08	62,17	29	42,65	116	26,92
30	534,66	47,38	126	502,41	62,56	30	42,17	128	26,26
31	533,99	47,94	136	501,74	62,91	31	41,69	141	25,6
32	532,65	48,41	161	501,07	63,3	32	41,21	158	24,94
33	531,30	49,04	210	499,05	63,76	33	40,57	176	24,25
34	530,63	49,51	252	498,39	64,6	34	40,17	204	23,59
35	529,29	49,91	311	497,04	64,83	35	39,77	242	22,92
36	528,62	50,38	340	496,37	65,28				

Πίνακας 3.14: Μεταβολή του ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 40 cm (C=3,06) χωρίς ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	21,6	0	64,88	61	32,82
1	802,39	22,18	1	64,65	63	32,49
2	804,09	23,01	2	64,26	65	32,17
3	807,48	23,93	3	63,58	67	31,84
4	810,88	24,92	4	62,81	69	31,51
6	814,27	27,15	5	61,89	71	31,19
10	817,66	31,74	6	60,81	73	31,03
13	819,36	34,83	7	59,66	75	30,7
15	822,75	36,93	8	58,66	77	30,37
17	824,45	38,7	9	57,73	79	30,04
18	831,23	39,58	10	56,64	82	29,8
19	832,93	40,38	11	55,63	84	29,55
21	836,32	41,98	13	53,76	86	29,31
22	838,02	42,7	15	52,12	88	29,14
24	839,71	44,14	17	50,48	90	28,98
33	839,71	49,2	19	48,98	92	28,81
35	844,80	50,14	21	47,49	94	28,57
38	848,20	51,55	23	46,22	97	28,4
40	849,89	52,26	25	45,03	99	28,24
42	851,59	52,96	27	43,92	101	28,08
44	853,29	53,59	29	42,89	103	27,88
56	853,29	56,7	31	41,93	108	27,47
58	856,68	57,09	33	40,89	113	27,17
60	858,37	57,4	35	39,93	115	27,01
75	858,37	59,02	37	39,29	118	26,84
77	860,07	59,33	39	38,48	121	26,68
79	861,77	59,79	41	37,84	124	26,51
80	863,46	59,94	43	37,27	127	26,35
82	865,16	60,18	45	36,71	130	26,18
97	865,16	61,1	47	36,06	134	26,02
119	866,85	62,3	49	35,42	137	25,85
171	870,25	63,37	51	34,93	140	25,69
248	871,94	64,44	53	34,44	143	25,52
279	873,64	64,83	55	34,04	151	25,27
			57	33,63	155	25,11
			59	33,23	162	24,78

Πίνακας 3.15: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής 40 cm (C=3,06) με ψύξη

Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	4,70	21,56	41	558,86	38,1	0	41,69	33	24,69
1	601,18	21,73	42	558,86	38,18	1	41,45	34	24,53
2	599,84	22,23	43	558,19	38,26	2	40,97	35	24,36
3	596,48	22,89	45	558,19	38,37	3	40,09	36	24,28
4	593,12	23,81	47	557,52	38,59	4	39,12	37	24,2
5	589,76	24,64	49	557,52	38,77	5	38	38	24,03
6	587,74	25,55	51	556,85	38,86	6	37,03	39	23,87
7	585,06	26,37	54	556,85	38,91	7	36,06	40	23,78
8	583,04	27,28	59	556,17	39,07	8	35,25	41	23,7
9	581,03	28,02	61	556,17	39,23	9	34,44	42	23,53
10	579,01	28,84	64	555,50	39,58	10	33,63	44	23,37
11	577,00	29,66	69	554,83	39,74	11	32,82	46	23,2
12	575,65	30,31	70	554,83	39,79	12	32,17	49	23,12
13	574,31	30,97	109	554,16	40,06	13	31,52	50	23,04
14	572,97	31,62	110	554,16	40,14	14	31,03	51	22,95
15	571,62	32,11	111	553,49	40,22	15	30,45	53	22,87
16	570,95	32,6	128	554,16	40,38	16	29,88	54	22,79
17	569,61	33,09	131	553,4888	40,46	17	29,47	55	22,7
18	568,94	33,41	132	553,49	40,62	18	28,98	56	22,62
19	568,27	33,82	138	552,82	40,7	19	28,49	59	22,54
20	567,59	34,14	139	552,82	40,78	20	28,16	60	22,46
21	566,25	34,47	177	552,15	40,94	21	27,75	63	22,37
23	564,91	35,03	178	552,82	41,02	22	27,42	64	22,29
25	563,56	35,68	179	552,15	41,1	23	27,17	67	22,21
27	562,89	36,33	209	552,15	41,18	24	26,84	69	22,12
28	562,22	36,49	210	551,47	41,26	25	26,51	73	22,04
29	561,55	36,65	211	551,47	41,34	26	26,26	75	21,96
31	560,88	37,06	214	550,80	41,42	27	25,93	82	21,87
35	560,20	37,46	223	550,13	41,74	28	25,77	84	21,79
36	559,53	37,54	273	550,11	41,93	29	25,52	90	21,74
						30	25,36	91	21,71
						31	25,11	92	21,62
						32	24,94		

Πίνακας 3.16: Μεταβολή ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 40 cm (C=3,06) με ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	21,9	0	41,69	36	24,2
1	800,70	22,56	1	41,21	37	24,11
2	802,39	23,31	2	40,57	38	23,95
3	807,48	24,22	3	39,61	39	23,87
4	807,48	25,13	4	38,64	40	23,7
5	809,18	25,96	5	37,52	41	23,62
6	809,18	26,87	6	36,55	42	23,53
7	810,87	27,69	7	35,66	43	23,45
8	812,57	28,51	8	34,85	44	23,37
9	812,57	29,25	9	34,12	45	23,29
10	815,96	29,99	10	33,23	46	23,2
11	815,96	30,64	11	32,49	48	23,12
12	819,36	31,29	12	31,84	50	23,04
13	821,05	31,86	13	31,27	51	22,95
21	822,75	34,87	14	30,7	52	22,87
29	824,44	36,97	15	30,21	53	22,79
31	824,44	37,25	16	29,72	55	22,7
33	827,84	37,46	17	29,22	56	22,62
36	827,84	37,7	18	28,73	58	22,54
37	827,84	37,78	19	28,32	60	22,46
38	829,53	37,97	20	27,91	62	22,37
42	829,53	38,26	21	27,58	63	22,29
44	829,53	38,42	22	27,25	67	22,21
45	831,23	38,51	23	27,09	68	22,12
57	831,23	39,02	24	26,68	72	22,04
61	832,93	39,31	25	26,43	74	21,96
62	832,93	39,55	26	26,1	81	21,9
63	834,62	39,63	27	25,85	82	21,87
68	834,62	39,74	28	25,6	83	21,79
176	836,32	41,02	29	25,44	90	21,71
208	838,01	41,26	30	25,19	92	21,62
222	843,10	41,74	31	25,03	97	21,54
			32	24,86	100	21,49
			33	24,69	103	21,46
			34	24,53	107	21,4
			35	24,36	110	21,32

Πίνακας 3.17: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής
30 cm (C=5,44) χωρίς ψύξη

Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	67,17	22,68	37	500,43	65,27	0	84	39	46,5
1	609,25	23,09	38	499,09	65,88	1	83,7	40	45,94
2	603,20	24,09	39	498,42	66,34	2	82,7	41	45,31
3	597,16	25,25	40	497,07	66,87	3	81,7	42	44,83
4	591,78	26,73	41	495,73	67,48	4	80,7	44	44,04
5	586,41	28,38	42	495,06	68,01	5	79,14	45	43,56
6	581,04	30,02	43	493,71	68,62	6	77,72	46	43,16
7	576,34	31,82	44	493,04	69,07	7	76,15	47	42,76
8	572,30	33,61	45	491,70	69,53	8	74,65	48	42,36
9	567,60	35,31	47	490,36	70,29	9	73,15	50	41,56
10	563,57	37,01	49	488,34	70,97	10	71,65	52	40,92
11	559,54	38,62	50	487,67	71,34	11	70,39	54	40,36
12	555,51	40,23	51	487,00	71,72	12	69,1	55	40,04
13	552,15	41,83	53	485,65	72,25	13	67,71	57	39,4
14	548,79	43,42	55	484,31	72,85	14	66,44	58	39,08
15	545,44	44,85	57	482,97	73,38	15	65,15	60	38,44
16	542,08	46,28	59	482,29	73,9	16	63,82	64	37,63
17	539,39	47,55	62	480,951	74,35	17	62,77	65	37,31
18	536,03	48,81	63	480,28	74,66	18	61,47	69	36,5
19	533,35	50,07	65	479,61	75,33	19	60,47	73	35,69
20	530,66	51,17	68	478,26	75,78	20	59,39	77	35,13
21	528,64	52,34	70	477,59	76,15	21	58,62	82	34,23
22	525,96	53,51	76	475,58	76,83	22	57,84	85	33,91
23	523,94	54,45	77	474,91	77,13	23	56,91	89	33,26
24	521,93	55,46	82	473,56	77,87	24	56,06	95	32,61
25	519,91	56,55	85	472,89	78,39	25	55,21	99	32,28
26	517,22	57,56	89	472,22	78,77	26	54,27	105	31,63
27	515,88	58,36	101	470,88	79,29	27	53,49	108	31,33
28	513,87	59,1	112	469,53	79,73	28	52,71	116	30,68
29	511,85	60,06	125	468,86	80,3	30	51,46	124	30,02
30	510,51	60,83	148	467,52	81	32	50,2	132	29,29
31	508,49	61,6	156	466,17	81,5	33	49,65	140	28,96
32	507,15	62,36	164	465,50	82,1	34	49,1	151	28,3
33	505,80	63,05	215	463,49	83,8	35	48,55	160	27,64
34	503,79	63,82	219	462,81	84	36	48	187	26,93
35	502,45	64,43	241	461,47	84,7	37	47,52	213	26,27
36	501,7743	64,89	264	460,798	84,9	38	46,97	236	25,61

Πίνακας 3.18: Μεταβολή ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 30 cm (C=5,44) χωρίς ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	22,68	0	84,2	36	48,31
1	1238,78	22,84	1	84	37	47,68
2	1264,24	23,51	2	83,3	38	47,21
3	1269,33	24,59	3	82,3	39	46,73
4	1277,81	25,99	4	81,3	40	46,26
5	1279,51	27,56	5	79,88	41	45,62
6	1286,30	29,2	6	78,47	42	45,07
7	1289,69	31	7	76,98	43	44,67
8	1293,09	32,63	8	75,4	45	43,8
9	1299,87	34,42	9	73,9	46	43,32
11	1303,27	37,82	10	72,4	47	42,92
12	1311,75	39,42	11	71,04	49	42,12
13	1313,45	41,03	12	69,76	50	41,8
14	1315,15	42,63	13	68,39	52	41,08
15	1321,93	44,06	14	67,13	54	40,52
17	1325,33	46,92	15	65,76	56	39,96
18	1327,03	48,18	16	64,54	58	39,24
19	1330,42	49,44	17	63,28	60	38,6
21	1333,81	51,79	18	62,01	63	37,87
23	1337,21	53,98	19	60,93	66	37,23
24	1338,90	55	20	59,93	70	36,34
25	1340,60	56,01	21	59	75	35,37
27	1344,00	57,94	22	58,15	80	34,72
28	1347,39	58,82	23	57,3	84	34,07
31	1349,09	61,13	24	56,45	91	33,1
33	1354,18	62,75	25	55,67	99	32,28
38	1357,57	65,58	26	54,74	107	31,47
41	1360,96	67,18	27	53,88	114	30,84
44	1364,36	68,77	28	53,1	124	30,1
50	1366,06	71,19	29	52,4	128	29,7
52	1367,75	71,8	30	51,77	137	29,04
59	1371,15	73,75	31	51,14	151	28,38
74	1377,93	76,75	32	50,52	159	27,73
101	1389,81	79,29	33	49,97	180	27,1
221	1399,95	84,2	34	49,42	208	26,44
259	1405,00	85	35	48,86	263	25,31

Πίνακας 3.19: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής 30 cm (C=5,44) με ψύξη

Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	59,79	22,17	33	544,17	46,77	0	51,53	37	26,48
1	612,02	22,42	34	543,50	46,93	1	51,08	38	26,43
2	606,65	23,34	35	542,83	47,17	2	50,11	39	26,26
3	601,28	24,41	36	542,16	47,49	3	48,96	40	25,99
4	596,57	25,74	37	542,16	47,88	4	47,7	41	25,93
5	591,87	27,08	38	541,48	48,27	5	46,28	42	25,77
6	587,84	28,48	39	540,14	48,51	6	45,09	43	25,6
7	583,81	29,85	40	539,47	48,67	7	43,98	44	25,44
8	580,45	31,02	41	539,47	48,91	8	42,78	45	25,35
9	577,09	32,33	42	538,80	49,38	9	41,74	46	25,27
10	574,40	33,47	43	538,12	49,46	10	40,7	47	25,19
11	572,39	34,52	44	538,12	49,54	11	39,66	48	25,11
12	569,70	35,57	45	538,12	49,61	12	38,7	49	25,02
13	567,68	36,54	46	537,45	49,69	13	37,73	50	24,94
14	565,67	37,27	47	537,45	49,93	14	36,76	51	24,86
15	564,33	38	48	536,78	50,16	15	35,87	52	24,77
16	562,31	38,8	51	537,45	50,48	16	35,06	54	24,69
17	560,97	39,52	53	537,4527	50,64	17	34,25	55	24,61
18	559,62	40,25	54	537,45	50,74	18	33,52	56	24,53
19	558,28	40,89	55	537,45	50,82	19	32,87	58	24,44
20	556,94	41,37	63	537,45	50,9	20	32,22	61	24,28
21	555,59	41,69	64	537,45	51,06	21	31,65	66	24,11
22	554,92	42,17	65	537,45	51,21	22	31,08	69	24,03
23	554,25	42,96	68	536,11	51,37	23	30,67	75	23,86
24	552,90	43,44	69	535,44	51,53	24	30,18	79	23,78
25	551,56	43,92	70	535,44	51,76	25	29,69	81	23,7
26	550,89	44,4	72	534,77	51,92	26	29,36	84	23,62
27	550,22	44,87	73	534,77	52,15	27	28,95	91	23,48
28	548,87	45,27	75	534,77	52,23	28	28,62	92	23,4
29	548,20	45,67	108	533,41	52,26	29	28,29	95	23,31
30	547,53	45,98	109	533,41	52,33	30	28,05	99	23,23
31	546,19	46,3	110	532,73	52,57	31	27,72	103	23,15
32	544,84	46,54	114	532,06	52,8	32	27,55	107	23,06
						33	27,31	112	22,98
						34	27,06	116	22,9
						35	26,92	150	22,59
						36	26,67	172	22,34

Πίνακας 3.20: Μεταβολή ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 30 cm (C=5,44) με ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	22,17	0	51,53	36	26,81
1	1262,53	22,84	1	51,29	37	26,59
2	1269,32	23,83	2	50,66	38	26,4
3	1274,41	25,08	3	49,67	39	26,26
4	1277,80	26,4	4	48,33	40	26,1
6	1281,20	29,19	5	46,99	41	25,93
7	1284,59	30,53	6	45,72	42	25,77
8	1286,29	31,76	7	44,53	43	25,6
9	1289,68	32,9	8	43,34	44	25,52
11	1291,38	35,09	9	42,22	46	25,27
12	1296,47	36,06	10	41,18	48	25,11
13	1298,17	36,87	11	40,14	49	25,02
15	1301,56	38,48	12	39,1	50	24,94
16	1303,26	39,2	13	38,21	52	24,86
17	1304,96	39,84	14	37,25	53	24,77
18	1310,05	40,57	15	36,36	55	24,69
19	1313,44	41,05	16	35,47	56	24,61
21	1315,14	41,93	17	34,58	57	24,53
22	1318,53	42,48	18	33,93	58	24,44
24	1320,23	43,68	19	33,2	60	24,36
27	1323,62	45,03	20	32,55	62	24,28
28	1325,32	45,51	21	31,98	67	24,11
33	1325,32	46,85	22	31,41	69	24,03
41	1325,32	49,14	23	30,83	75	23,86
44	1328,71	49,61	24	30,34	79	23,78
48	1330,41	50,24	25	29,93	85	23,62
50	1333,80	50,4	26	29,52	91	23,48
51	1335,50	50,48	27	29,11	96	23,31
70	1335,50	51,68	28	28,79	100	23,23
72	1338,89	52	29	28,46	108	23,06
			30	28,13	116	22,9
			31	27,88	121	22,81
			32	27,64	139	22,68
			33	27,39	150	22,59
			34	27,22	156	22,51
			35	27,06	158	22,43

Πίνακας 3.21: Αύξηση τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής
20 cm (C=12,25) χωρίς ψύξη

t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C
0	16,12	25,82	33	439,23	101,4	66	398,93	120,3
1	615,86	26,81	34	437,21	102,2	67	398,26	120,6
2	605,12	29,03	35	435,87	103,2	68	397,59	120,9
3	594,37	31,86	36	433,18	104,2	69	396,92	121,2
4	583,62	34,98	37	431,17	105,1	71	396,25	121,7
5	574,22	38,37	38	429,83	105,8	73	395,57	122,1
6	565,49	41,73	39	427,81	106,7	74	394,90	122,4
7	556,76	45,21	40	426,47	107,6	75	394,23	122,6
8	548,70	48,56	41	425,13	108,4	77	393,56	123,1
9	541,31	51,86	42	423,11	109,1	79	392,89	123,4
10	533,93	54,95	43	421,77	109,7	81	392,22	123,7
11	526,54	58,24	44	420,42	110,4	83	391,55	124
12	519,82	61,14	45	419,08	111,1	85	390,87	124,4
13	513,78	64,08	46	417,74	111,8	87	390,20	124,7
14	507,73	66,9	47	416,39	112,4	89	389,53	125
15	501,69	69,53	48	415,05	113	91	388,86	125,3
16	496,32	72,13	49	413,71	113,6	93	388,19	125,6
17	491,61	74,69	50	412,37	114,1	95	387,52	125,8
18	486,91	77,08	51	411,69	114,7	97	386,84	125,9
19	482,21	79,32	52	410,35	115	99	386,17	126
20	478,18	81,5	53	409,01	115,5	102	385,50	126,5
21	474,15	83,5	54	408,34	115,9	106	384,83	126,9
22	470,12	85,4	55	406,9922	116,3	109	384,16	127,1
23	466,77	87,2	56	406,32	116,7	111	383,4745	127,4
24	463,41	88,9	57	405,65	117,1	115	382,80	127,8
25	460,05	90,6	58	404,98	117,4	119	382,13	128,1
26	456,69	92,2	59	403,63	117,8	122	381,46	128,5
27	454,00	93,7	60	402,96	118,2	133	380,12	128,9
28	451,32	95,2	61	402,29	118,6	142	379,45	129,4
29	448,63	96,5	62	401,62	119,1	150	378,77	129,8
30	445,95	97,9	63	400,95	119,4	152	378,10	130
31	443,93	99,2	64	400,28	119,7	169	376,76	130,7
32	441,24	100,4	65	399,60	120	182	376,09	131,1

Πίνακας 3.22: Μείωση θερμοκρασίας για απόσταση φωτεινής πηγής
20 cm (C=12,25) χωρίς ψύξη

t sec	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	131,1	35	62,7	71	42,85
1	130,4	36	61,86	73	42,37
2	128,6	37	61,09	75	41,81
3	126	38	60,24	76	41,49
4	123,2	39	59,55	78	40,94
5	120	40	58,7	80	40,45
6	116,8	41	57,85	81	40,21
7	113,7	42	57	83	39,81
8	110,7	43	56,07	85	39,41
9	107,9	44	55,29	86	39,17
10	105	45	54,51	88	38,77
11	102,4	46	53,73	91	38,21
12	99,7	47	53,03	94	37,64
13	97,1	48	52,41	98	37
14	94,6	49	51,78	101	36,43
15	92,3	50	51,15	105	35,87
16	90,2	51	50,37	109	35,22
17	88	52	49,82	113	34,65
18	86	53	49,19	119	34
19	83,9	54	48,72	124	33,52
20	82,1	55	48,24	132	32,87
21	80,4	56	47,85	139	32,3
22	78,8	57	47,45	144	31,89
23	77,23	58	47,06	149	31,48
24	75,81	59	46,74	154	31,15
25	74,38	60	46,43	159	30,74
26	73,03	61	46,03	166	30,34
27	71,75	62	45,71	176	29,76
28	70,47	63	45,32	188	29,11
29	69,18	64	45	202	28,45
30	68,04	65	44,68	217	27,79
31	66,9	66	44,36	235	27,14
32	65,69	68	43,81	263	26,48
33	64,62	69	43,49	286	25,82
34	63,62	70	43,17		

Πίνακας 3.23: Αύξηση ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής
20 cm (C=12,25) χωρίς ψύξη

t sec	Isc (mA)	θ °C	t sec	Isc (mA)	θ °C	t sec	Isc (mA)	θ °C
0	0,00	25,82	36	2320,65	103,7	73	2144,23	122,1
1	2525,91	26,23	37	2312,17	104,7	74	2142,53	122,3
2	2547,97	27,76	38	2301,99	105,5	75	2140,83	122,5
3	2576,80	30,42	39	2290,12	106,2	76	2135,74	122,7
5	2593,77	36,76	40	2285,03	107,2	79	2134,05	123,3
6	2583,59	40,02	41	2278,24	108	80	2130,66	123,5
7	2592,07	43,49	42	2271,46	108,7	81	2128,96	123,7
8	2588,68	46,82	43	2262,97	109,5	83	2127,26	124
9	2590,38	50,1	44	2254,49	110,1	84	2125,57	124,1
10	2592,07	53,42	45	2246,01	110,8	85	2123,87	124,4
11	2585,29	56,69	46	2242,62	111,5	87	2118,78	124,7
12	2580,20	59,78	47	2234,14	112,1	89	2115,39	124,9
13	2570,02	62,7	48	2227,35	112,8	90	2113,69	125,1
14	2561,54	65,46	49	2223,96	113,3	92	2112,00	125,3
15	2542,88	68,32	50	2217,17	113,8	93	2108,60	125,5
16	2537,79	70,89	51	2213,78	114,4	98	2103,51	126
17	2524,22	73,48	52	2206,99	114,9	101	2098,42	126,2
18	2514,04	75,86	53	2205,30	115,3	103	2096,73	126,6
19	2500,47	78,25	54	2200,21	115,7	104	2095,03	126,7
20	2485,20	80,5	55	2195,12	116,1	106	2095,03	126,9
21	2469,93	82,6	56	2193,42	116,5	109	2091,64	127
22	2456,36	84,6	57	2190,03	116,9	110	2089,94	127,1
23	2449,58	86,3	58	2184,939	117,3	111	2088,18	127,3
24	2436,00	88	59	2181,55	117,6	114	2084,79	127,6
25	2427,52	89,8	60	2179,85	118	116	2084,79	127,9
26	2417,34	91,4	61	2176,46	118,4	118	2083,09	128
27	2405,47	92,9	62	2174,76	118,8	120	2078,01	128,2
28	2390,20	94,4	63	2171,37	119,2	121	2076,31	128,3
29	2381,72	95,9	64	2166,28	119,6	131	2066,13	128,7
30	2373,24	97,2	65	2164,58	119,8	148	2066,13	129,8
31	2364,76	98,5	66	2159,49	120,2	152	2062,74	130
32	2354,58	99,8	67	2157,80	120,5	161	2054,26	130,1
33	2344,40	100,9	69	2152,71	121,1	165	2054,26	130,4
34	2335,92	101,8	71	2151,01	121,6	167	2052,56	130,6
35	2330,83	102,8	72	2147,62	121,9	181	2049,17	131,1

Πίνακας 3.24: Μείωση θερμοκρασίας για απόσταση φωτεινής πηγής
20 cm (C=12,25) χωρίς ψύξη

t sec	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	131	36	63,16	71	43,33
2	130,9	37	62,32	72	43,01
3	129,6	38	61,48	73	42,77
4	127,2	39	60,71	75	42,21
5	124,6	40	59,94	77	41,65
6	121,7	41	59,09	79	41,1
7	118,4	42	58,24	80	40,85
8	115,2	43	57,46	82	40,29
9	112,3	44	56,53	85	39,65
10	109,3	45	55,68	88	39,09
11	106,5	46	54,98	89	38,85
12	103,7	47	54,05	92	38,29
13	101	48	53,42	95	37,72
14	98,4	49	52,72	99	37,08
15	95,8	50	52,09	101	36,67
16	93,4	51	51,54	103	36,43
17	91,2	52	50,76	107	35,79
18	89,1	53	49,98	111	35,14
19	87	54	49,5	116	34,49
20	84,9	55	48,87	122	33,84
21	83	56	48,4	128	33,35
22	81,1	57	48,01	135	32,7
23	79,54	58	47,61	141	32,3
24	77,98	59	47,3	145	31,97
25	76,48	60	46,9	149	31,56
26	75,14	61	46,58	154	31,23
27	73,71	62	46,19	163	30,58
28	72,35	63	45,87	175	29,93
29	71,07	64	45,56	183	29,44
30	69,86	65	45,16	193	29,03
31	68,58	66	44,92	203	28,53
32	67,44	67	44,6	210	28,2
33	66,3	68	44,28	221	27,71
34	65,15	69	43,97	240	27,05
35	64,08	70	43,65	289	25,73

Πίνακας 3.25: Μεταβολή της τάσης για απόσταση φωτεινής πηγής 20 cm (C=12,25) με ψύξη

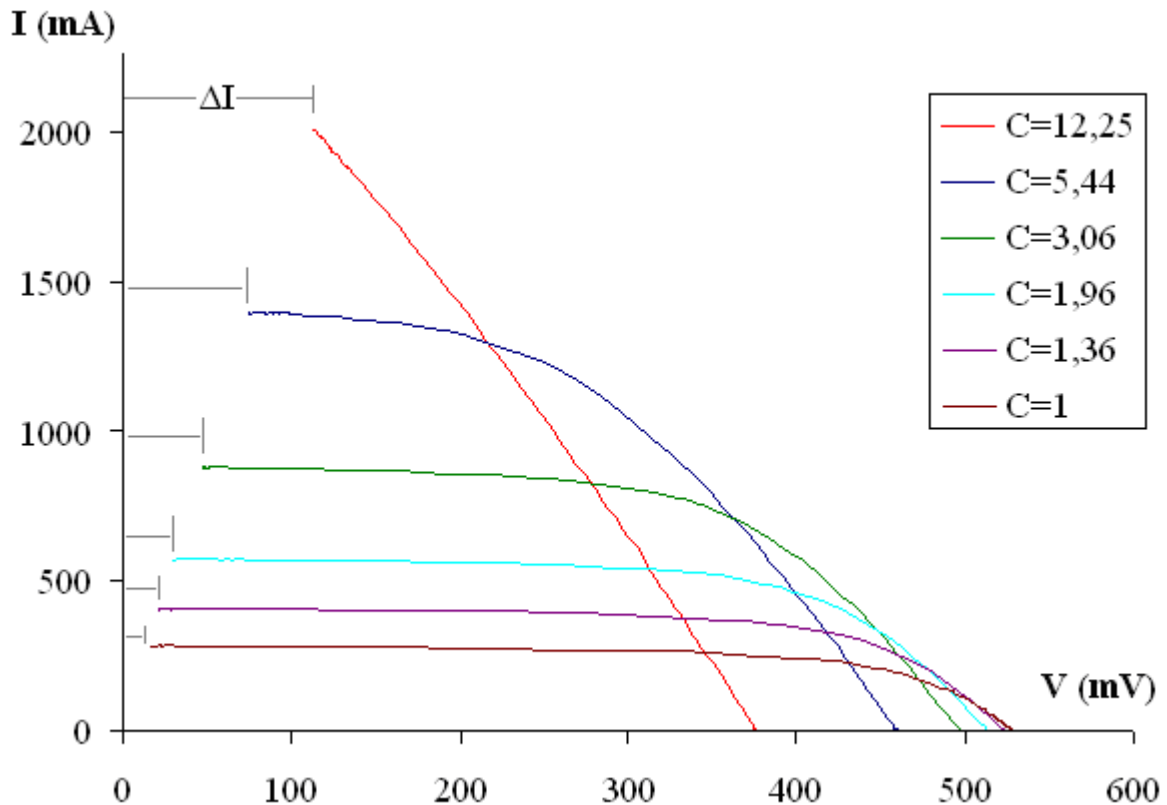
Αύξηση						Μείωση			
t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	V _{oc} (mV)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	28,88	22,79	34	523,85	63,48	0	73,28	35	30,52
1	625,26	23,04	35	523,18	63,79	1	73,12	36	30,36
2	619,21	24,53	37	522,50	64,25	2	72,04	37	30,11
3	609,14	26,71	38	521,83	64,48	3	69,96	38	29,87
4	600,41	29,23	40	521,16	64,86	4	67,38	39	29,7
5	593,02	31,71	41	520,49	65,09	5	64,84	40	29,54
6	585,63	34,36	43	519,82	65,47	6	62,49	41	29,37
7	579,59	36,95	44	519,15	65,62	7	59,95	42	29,21
8	574,22	39,32	48	518,47	65,7	8	57,46	43	29,05
9	568,84	41,59	49	517,80	66	9	55	44	28,88
10	564,14	43,6	52	517,13	66,69	10	52,5	45	28,72
11	560,11	45,65	54	516,46	66,84	11	50,31	46	28,64
12	556,08	47,31	59	515,79	67,14	12	48,39	47	28,55
13	552,73	49,04	68	515,12	67,25	13	46,66	48	28,39
14	550,04	50,38	83	514,45	67,83	14	44,99	49	28,31
15	547,35	51,71	96	513,77	68,08	15	43,51	50	28,23
16	544,67	52,96	106	513,10	68,54	16	42,15	51	28,06
17	541,98	54,06	110	513,09	68,54	17	40,96	53	27,9
18	539,97	55,15	115	512,41	68,61	18	39,91	54	27,73
19	537,95	56,08	122	511,74	69,14	19	38,95	55	27,65
20	536,61	56,86	125	511,07	69,22	20	37,99	56	27,57
21	534,59	57,63	134	510,3989	69,45	21	37,1	57	27,49
22	533,25	58,4	138	509,73	69,6	22	36,37	58	27,4
23	531,91	59,02	154	509,06	69,98	23	35,64	59	27,32
24	530,56	59,79	159	508,38	70,35	24	35	60	27,24
25	529,89	60,41	161	507,71	70,81	25	34,43	61	27,16
26	528,55	60,95	162	507,04	70,88	26	33,94	62	27,07
27	527,88	61,56	163	506,37	70,96	27	33,46	64	26,99
28	527,21	62,02	164	505,70	71,11	28	32,97	65	26,91
29	526,53	62,41	165	505,03	71,41	29	32,48	67	26,83
31	525,86	62,71	172	504,35	72,17	30	32,15	68	26,74
32	525,19	63,1	174	503,68	72,24	31	31,83	69	26,66
33	524,52	63,33	193	503,01	72,72	32	31,5	70	26,58
						33	31,17	73	26,5
						34	30,85		

Πίνακας 3.26: Μεταβολή του ρεύματος για απόσταση φωτεινής πηγής 20 cm (C=12,25) με ψύξη

Αύξηση			Μείωση			
t sec	I _{sc} (mA)	θ °C	t sec	θ °C	t sec	θ °C
0	0	22,79	0	73,28	36	30,19
1	2503,84	23,62	1	72,75	37	30,03
2	2524,20	25,61	2	70,99	38	29,78
3	2537,77	27,94	3	68,67	39	29,62
4	2542,86	30,54	4	66,16	40	29,37
5	2551,34	33,01	5	63,72	41	29,29
6	2554,73	35,77	6	61,24	42	29,13
7	2556,43	38,19	7	58,62	43	28,96
8	2561,52	40,44	8	56,24	44	28,88
9	2564,91	42,71	9	53,72	45	28,72
10	2566,61	44,67	10	51,38	46	28,55
13	2568,30	49,67	11	49,37	47	28,47
17	2570,00	54,68	12	47,55	48	28,39
18	2573,39	55,61	13	45,81	49	28,23
19	2575,09	56,47	14	44,3	51	28,06
29	2578,48	62,48	15	42,79	52	27,9
30	2575,09	62,56	16	41,52	53	27,81
31	2576,79	62,94	17	40,39	54	27,73
32	2573,39	63,17	18	39,35	55	27,57
33	2570,00	63,48	19	38,47	57	27,4
34	2568,30	63,63	20	37,5	58	27,32
35	2571,70	63,94	21	36,7	59	27,24
36	2575,09	64,09	22	35,97	61	27,16
50	2561,52	66,38	23	35,24	62	27,07
69	2570,00	67,47	24	34,67	63	26,99
85	2573,39	67,93	25	34,11	64	26,91
100	2568,30	68,39	26	33,62	67	26,74
115	2561,52	68,69	27	33,13	69	26,58
132	2561,52	69,14	28	32,72	73	26,5
146	2563,22	69,83	29	32,32	75	26,41
168	2547,95	72,02	30	31,99	79	26,25
190	2542,86	72,04	31	31,66	80	26,17
			32	31,34	84	26
			33	31,01	88	25,92
			34	30,68	91	25,84
			35	30,52	96	25,67

3.1.2 Αποτελέσματα δεύτερης σειράς μετρήσεων – I-V

Στο δεύτερο μέρος του πειράματος, έγινε η χάραξη της χαρακτηριστικής καμπύλης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης του φωτοβολταϊκού, για τις ίδιες αποστάσεις φωτοβολταϊκού – προβολέα με το πρώτο μέρος του πειράματος, με τη διαφορά ότι οι μετρήσεις έγιναν μετά τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας. Ελήφθησαν επιπλέον μετρήσεις σε αποστάσεις ± 2 cm από τις κύριες του πειράματος που χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο μέρος.



Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστικές I-V για όλες τις συγκεντρώσεις

Κατά τη χάραξη της χαρακτηριστικής I-V του φωτοβολταϊκού παρατηρείται ότι αυτή δεν τέμνει τον άξονα του ρεύματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.18. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να έχουμε τιμές για το ρεύμα βραχυκυκλώματος. Η αιτία αυτής της συμπεριφοράς έγκειται στα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού φορτίου που χρησιμοποιήθηκε, το οποίο δεν μπορεί να εμφανίσει μηδενική αντίσταση αφενός γιατί η αγωγιμότητα του transistor δεν μπορεί να γίνει άπειρη, αφετέρου γιατί είναι απαραίτητη η ύπαρξη της αντίστασης ώστε να γίνεται μέτρηση της έντασης του ρεύματος μέσω της πτώσης τάσεως στα άκρα της. Για μικρές τιμές της έντασης της ακτινοβολίας, μπορεί να γίνει εκτίμηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ή ακόμα και να ληφθεί ίσο με την μεγαλύτερη τιμή ρεύματος που εμφανίζεται εφόσον το πλατώ της I-V είναι σχεδόν οριζόντιο. Για μεγάλες τιμές της έντασης της ακτινοβολίας κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί μόνο να γίνει

εκτίμηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος, θεωρώντας ότι το υπολοιπόμενο τμήμα της I-V έχει τη μορφή ευθείας η οποία διατηρεί την κλίση του τελευταίου διαθέσιμου τμήματος της χαρακτηριστικής. Ενδεικτικά για $C= 12,25$ η τελευταία τιμή την οποία λαμβάνουμε από την πειραματική διάταξη είναι περίπου το 66% της πραγματικής τιμής του ρεύματος βραχυκυκλώματος, όπως αυτή έχει εκτιμηθεί με τον τρόπο που περιγράφηκε.

Στους πίνακες 3.27 έως 3.56 περιλαμβάνονται οι μετρήσεις της χαρακτηριστικής I-V του Φ/Β.

Πίνακας 3.27: Τιμές της I-V για απόσταση 72 cm ($C= 0,95$) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=37,42$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,19$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
528,65	1,70	512,53	64,48	474,24	162,91
527,98	3,39	511,85	67,88	470,21	169,70
527,30	6,79	510,51	71,27	465,51	176,48
525,29	13,58	509,17	74,67	460,13	183,27
524,62	16,97	508,50	78,06	454,09	191,76
523,95	18,67	507,15	83,15	447,37	198,54
523,27	22,06	505,81	86,54	438,64	207,03
522,60	25,45	504,47	91,64	428,56	215,51
521,93	27,15	503,12	95,03	415,13	224,00
521,26	30,55	501,78	100,12	398,33	232,48
520,59	33,94	499,76	105,21	373,48	239,27
519,92	35,64	497,75	110,30	341,24	247,75
519,24	37,33	496,40	113,70	299,59	252,85
518,57	42,42	494,39	120,48	253,24	257,94
517,90	44,12	491,70	125,57	214,95	261,33
517,23	47,51	489,69	130,67	186,07	263,03
516,56	49,21	487,00	137,45	116,21	266,42
515,88	52,61	484,31	142,54	71,87	268,12
515,21	56,00	481,63	149,33	43,66	269,82
513,87	57,70	478,27	156,12	29,56	271,51
513,20	61,09				

Πίνακας 3.28: Τιμές της I-V για απόσταση 70 cm (C= 1) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=39,06$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,18$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
527,97	1,70	501,10	105,21
527,30	6,79	499,09	110,30
525,96	10,18	497,75	115,39
524,61	15,27	495,73	120,48
523,94	18,67	493,72	125,58
522,60	25,45	491,70	130,67
521,93	28,85	489,01	137,45
521,26	32,24	487,00	142,55
520,58	33,94	484,31	149,33
519,91	35,64	480,95	156,12
519,24	37,33	478,27	162,91
518,57	42,42	474,24	169,70
517,90	44,12	470,88	176,48
517,23	47,52	466,17	184,97
516,55	49,21	461,47	191,76
515,88	52,61	455,43	200,24
515,21	56,00	449,38	207,03
513,87	57,70	441,32	215,51
513,19	61,09	431,92	224,00
512,52	64,48	419,83	232,48
511,85	67,88	403,70	240,97
510,51	71,27	382,88	249,45
509,84	74,67	352,65	257,94
508,49	78,06	314,37	264,73
507,15	83,15	269,36	269,82
506,48	86,55	227,04	273,21
505,13	91,64	129,64	280,00
503,79	95,03	77,92	281,70
502,45	100,12	28,21	283,39

Πίνακας 3.29: Τιμές της I-V για απόσταση 70 cm (C= 1) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=37,46$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,18$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
529,98	3,39	500,43	117,09
528,64	6,79	498,41	120,48
526,63	16,97	496,40	125,57
525,95	18,67	494,38	130,67
525,28	22,06	492,37	137,45
524,61	27,15	489,68	144,24
523,94	28,85	486,99	149,33
522,60	35,64	484,31	156,12
521,92	42,42	480,95	162,91
520,58	44,12	476,92	169,70
519,91	49,21	473,56	176,48
517,89	56,00	468,86	184,97
517,22	57,70	464,16	191,76
516,55	61,09	458,11	201,94
515,88	64,48	451,39	207,03
514,53	67,88	442,66	215,51
513,86	71,27	432,59	225,70
512,52	74,67	420,49	232,48
511,85	78,06	403,70	240,97
510,50	83,15	379,52	249,45
509,16	86,54	347,28	257,94
507,82	91,64	306,30	266,42
506,47	95,03	259,95	271,51
505,13	100,12	220,32	273,21
503,79	105,21	127,63	280,00
502,44	110,30	76,58	281,69

Πίνακας 3.30: Τιμές της I-V για απόσταση 68 cm (C= 1,06) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=39,11$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,19$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
527,29	1,70	500,42	106,91
526,62	6,79	499,08	110,30
525,95	10,18	497,74	117,09
524,61	15,27	496,39	120,48
523,93	16,97	495,05	125,57
523,26	18,67	493,04	130,66
522,59	23,76	491,02	139,15
521,25	28,85	489,01	144,24
520,58	30,54	486,32	151,03
519,90	35,64	483,63	156,12
518,56	40,73	480,95	164,60
517,89	44,12	477,59	169,69
517,22	45,82	474,23	178,18
516,55	47,51	470,20	184,97
515,87	50,91	466,17	191,75
515,20	54,30	461,47	201,94
514,53	56,00	456,09	208,72
513,86	57,70	450,05	217,21
512,52	61,09	443,33	224,00
511,84	64,48	434,60	234,18
511,17	67,88	423,18	244,36
509,83	71,27	409,07	252,84
509,16	76,36	390,26	261,33
507,81	78,06	362,05	269,81
507,14	83,15	327,12	276,60
505,80	88,24	283,46	283,39
504,46	93,33	147,10	291,87
503,11	96,73	83,29	295,27
501,77	100,12	49,03	296,96

Πίνακας 3.31: Τιμές της I-V για απόσταση 68 cm (C= 1,06) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=37,11$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,20$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
530,66	1,70	504,46	110,30
529,98	5,09	502,44	115,39
529,31	6,79	501,10	122,18
526,63	18,67	499,09	127,27
525,28	27,15	497,07	132,36
524,61	30,55	495,06	139,15
523,94	32,24	493,04	144,24
523,27	35,64	490,35	151,03
522,60	37,33	488,34	159,51
521,92	40,73	484,98	164,60
521,25	45,82	482,29	173,09
520,58	47,51	478,93	178,18
519,91	50,91	474,90	184,97
519,24	52,61	470,87	193,45
518,57	56,00	466,17	200,24
517,89	59,39	460,80	208,73
517,22	61,09	454,08	217,21
516,55	64,48	446,69	225,70
515,88	69,58	437,96	234,18
515,21	71,27	425,87	244,36
513,86	74,67	411,09	252,85
513,19	79,76	390,27	261,33
512,52	83,15	362,06	269,82
511,18	86,54	323,77	280,00
509,83	91,64	277,42	283,39
508,49	96,73	145,09	291,88
507,82	100,12	82,62	295,27
505,80	105,21	61,13	296,97

Πίνακας 3.32: Τιμές της I-V για απόσταση 62 cm ($C= 1,27$) χωρίς ψύξη.
Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=43,62$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,52$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
524,58	1,70	486,30	171,35	318,38	356,27
523,91	8,48	480,25	191,71	220,31	368,14
521,90	16,97	474,21	212,07	171,28	371,54
519,21	30,54	465,48	235,82	139,04	373,23
515,18	54,29	456,07	254,48	106,80	374,93
507,12	88,22	441,29	281,62	81,95	376,63
495,03	139,11	422,49	305,37	64,48	378,32
491,00	156,08	386,22	335,91	28,88	380,02

Πίνακας 3.33: Τιμές της I-V για απόσταση 60 cm ($C= 1,36$) χωρίς ψύξη.
Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=45,25$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,55$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
522,59	1,70	486,31	173,04	379,51	361,35
521,24	8,48	480,94	191,70	300,25	388,49
519,90	16,96	475,57	212,06	219,65	398,67
517,21	30,54	468,18	234,11	168,60	402,06
513,18	54,29	460,12	256,17	109,49	403,76
506,47	88,22	449,37	281,61	92,02	405,46
495,05	139,11	435,94	307,06	74,56	407,15
491,02	156,07	413,77	335,90		

Πίνακας 3.34: Τιμές της I-V για απόσταση 60 cm ($C= 1,36$) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=43,64$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,59$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
525,27	1,70	483,63	191,69	210,24	391,86
524,60	8,48	478,25	212,05	162,55	393,56
522,59	16,96	470,19	234,10	138,37	395,26
519,90	30,53	462,13	256,15	107,47	396,95
515,87	54,28	450,04	281,60	90,01	398,65
508,48	88,21	436,61	307,04	66,50	400,34
497,06	139,10	412,43	335,88	49,03	402,04
493,03	156,07	373,47	361,33	46,35	403,74
489,00	173,03	286,15	383,38		

Πίνακας 3.35: Τιμές της I-V για απόσταση 58 cm ($C= 1,46$) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=46,70$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,57$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
520,56	1,70	481,60	191,69	282,78	413,92
519,89	8,48	476,23	212,05	204,19	422,40
517,88	16,96	469,51	234,10	165,24	425,79
515,86	30,53	462,80	256,15	122,92	427,49
511,16	54,28	453,39	281,60	109,49	429,18
504,44	88,21	442,65	307,04	56,42	430,88
493,69	139,10	425,85	335,88	28,21	432,58
490,34	156,07	404,36	363,03	24,18	434,27
486,31	173,03	358,01	395,26		

Πίνακας 3.36: Τιμές της I-V για απόσταση 58 cm ($C= 1,46$) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=43,67$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,59$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
526,60	3,39	492,34	173,04	409,73	364,74
525,93	5,09	486,97	195,09	360,69	395,28
525,25	8,48	482,27	212,06	283,45	417,33
523,91	16,96	475,55	234,11	203,52	425,81
521,22	30,54	468,83	256,17	165,91	429,21
517,19	54,29	458,76	283,31	92,02	430,90
510,48	88,22	448,01	307,06	80,60	432,60
499,73	139,11	431,89	337,60	32,24	434,29
495,70	156,07				

Πίνακας 3.37: Τιμές της I-V για απόσταση 52 cm ($C= 1,81$) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=51,69$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,58$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
515,19	1,70	480,93	193,39	380,85	468,22
514,52	6,79	476,90	212,05	337,19	498,75
513,85	8,48	472,20	235,80	261,96	519,11
512,50	16,96	466,83	256,16	207,55	525,90
510,49	32,23	460,78	283,31	169,27	527,59
506,46	54,29	454,06	308,75	148,44	530,98
500,41	89,91	445,33	339,29	132,32	532,68
491,01	142,50	435,93	366,43	120,90	534,38
488,32	157,77	422,50	400,36	96,72	536,07
484,96	173,04	407,05	430,90	54,41	537,77

Πίνακας 3.38: Τιμές της I-V για απόσταση 50 cm ($C= 1,96$) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=54,14$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,41$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
512,52	1,70	473,56	227,38	282,12	546,40
511,85	8,48	468,86	247,75	218,98	558,28
510,50	16,97	463,48	273,20	183,38	561,67
508,49	28,85	457,44	298,65	156,51	563,37
504,46	50,91	450,05	327,50	126,95	565,07
499,08	84,84	442,66	354,65	117,55	566,76
491,02	134,05	432,58	388,59	102,10	568,46
487,67	151,02	421,17	419,13	69,19	570,16
484,98	166,30	404,37	456,46	56,42	571,85
481,62	184,96	384,22	488,71	45,00	573,55
477,59	203,63	343,92	524,34		

Πίνακας 3.39: Τιμές της I-V για απόσταση 50 cm ($C= 1,96$) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=52,78$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,44$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
515,21	1,70	476,25	229,05	338,54	527,66
514,53	8,48	471,54	251,11	274,73	549,72
513,19	16,97	465,50	276,56	212,93	559,90
511,18	30,54	460,12	302,01	178,68	561,60
507,82	52,60	452,74	330,85	153,82	563,29
502,44	86,53	444,68	359,69	138,37	564,99
493,71	135,73	434,60	391,93	85,98	566,69
490,35	152,70	423,18	424,17	73,22	568,38
487,67	167,97	405,72	459,80	40,97	570,08
484,31	188,33	382,88	492,03	35,60	571,78
480,28	206,99				

Πίνακας 3.40: Τιμές της I-V για απόσταση 48 cm (C= 2,13) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=55,86\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,48\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
509,16	3,39	466,84	251,10	289,51	598,91
507,82	8,48	461,47	278,25	235,10	612,49
506,47	16,97	456,09	302,00	192,11	617,58
504,46	30,54	449,38	334,24	167,93	619,27
501,10	52,60	443,33	361,38	135,69	620,97
495,73	86,53	434,60	393,62	116,21	622,67
487,67	139,12	425,87	427,55	89,34	624,36
484,98	154,39	413,10	463,18	59,78	626,06
482,29	169,66	399,67	495,42	52,39	627,76
478,26	188,33	376,83	536,14	44,33	629,45
474,90	206,99	347,28	570,07	42,99	631,15
470,87	230,74				

Πίνακας 3.41: Τιμές της I-V για απόσταση 48 cm (C= 2,13) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=51,50\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,52\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
516,54	1,70	482,28	210,35	378,84	539,46
515,87	5,09	478,25	232,41	343,24	571,69
515,20	8,48	474,22	254,46	276,07	597,13
514,53	16,96	468,85	281,60	222,33	605,62
512,51	30,54	463,48	305,35	184,05	610,71
508,48	54,28	456,76	335,89	162,55	614,10
503,11	88,21	450,04	364,73	144,42	615,80
495,05	139,11	441,31	398,66	121,58	617,49
492,36	156,07	431,91	430,89	87,32	619,19
489,67	171,34	418,47	466,51	81,28	620,88
485,64	191,69	403,69	500,44	71,20	622,58

Πίνακας 3.42: Τιμές της I-V για απόσταση 42 cm (C= 2,78) χωρίς ψύξη.
Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=61,1\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,56\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
502,45	1,70	459,46	285,00	278,76	731,15
501,77	8,48	455,42	308,75	232,41	746,42
500,43	16,96	449,38	339,28	201,52	751,51
498,41	32,23	444,01	368,12	176,66	754,90
495,06	54,29	437,29	402,05	161,21	756,60
490,35	89,91	431,24	434,28	128,30	758,30
482,97	140,80	422,51	471,60	114,86	759,99
480,28	157,77	414,45	505,53	105,46	761,69
477,59	173,03	403,03	547,94	97,40	763,39
474,23	193,39	391,61	585,26	85,98	765,08
471,55	212,05	374,82	629,37	81,28	766,78
467,52	235,80	354,67	666,69	69,19	770,17
464,16	257,85	321,75	707,40		

Πίνακας 3.43: Τιμές της I-V για απόσταση 40 cm (C= 3,06) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=65,38\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,56\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
496,39	3,39	451,39	310,44	277,41	829,53
495,72	10,18	446,69	340,97	238,46	846,50
494,38	16,96	441,98	369,81	210,92	854,98
492,36	32,23	435,94	403,74	157,85	865,16
489,67	54,28	429,89	435,97	139,04	866,85
484,30	89,91	422,50	473,29	125,61	868,55
476,91	140,80	415,79	508,92	114,86	870,25
474,90	157,76	407,05	551,32	100,76	871,94
472,21	174,73	398,32	588,65	86,65	873,64
469,52	195,08	386,90	632,75	67,17	875,33
466,84	213,74	374,81	673,46	63,14	877,03
462,81	237,49	358,69	719,27	61,13	878,73
459,45	257,85	339,88	759,98	58,44	880,42
455,42	284,99	311,67	802,39	55,75	882,12

Πίνακας 3.44: Τιμές της I-V για απόσταση 40 cm (C= 3,06) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/B: $T_c=61,26$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,55$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
505,79	1,70	464,14	286,69	347,27	763,37
505,11	6,79	460,78	310,44	315,70	804,08
504,44	8,48	455,41	342,67	279,42	832,92
503,77	16,96	450,71	369,81	239,12	846,49
501,76	32,23	444,66	405,44	209,57	853,28
498,40	54,28	439,29	435,97	157,18	861,76
493,70	89,91	431,90	474,99	139,04	865,15
486,31	142,50	425,18	508,91	124,94	866,85
483,62	159,46	415,78	551,32	106,80	868,55
481,60	174,73	407,05	590,34	90,01	871,94
478,25	195,08	395,63	634,45	77,24	873,64
475,56	213,74	383,54	675,16	67,17	877,03
472,20	237,49	366,75	722,66	55,08	878,73
468,17	259,55				

Πίνακας 3.45: Τιμές της I-V για απόσταση 38 cm (C= 3,39) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/B: $T_c=69,93$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,56$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
488,33	3,39	445,34	313,83	323,09	860,06
487,66	10,18	440,64	342,67	298,24	900,78
486,31	18,66	436,61	373,20	272,04	929,61
484,30	32,23	431,23	407,13	196,14	966,93
481,61	55,98	425,86	439,36	167,93	973,72
476,91	89,91	419,14	476,68	149,12	977,11
469,52	142,50	413,10	512,31	135,68	980,51
467,51	159,46	405,71	553,02	124,94	982,20
465,49	176,42	398,32	592,04	116,88	983,90
462,13	195,08	388,92	636,14	110,16	985,59
459,45	215,44	379,51	678,55	99,41	987,29
456,09	237,49	367,42	724,35	94,71	988,99
453,40	259,55	356,00	768,46	82,62	990,68
449,37	286,69	339,88	817,65	78,59	992,38

Πίνακας 3.46: Τιμές της I-V για απόσταση 38 cm (C= 3,39) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=61,6\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,56\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
505,11	1,70	465,48	288,38	369,43	771,85
504,43	10,18	462,12	313,83	349,95	821,05
503,09	18,66	457,42	344,37	329,80	861,76
501,08	32,23	452,71	371,51	297,56	899,08
498,39	55,98	447,34	407,13	263,97	921,13
493,69	91,60	441,97	439,36	187,40	946,58
486,30	142,50	435,92	476,68	161,20	951,67
484,28	159,46	429,21	512,31	143,74	955,06
481,60	176,42	421,82	554,72	120,90	956,76
478,91	196,78	414,43	593,73	106,80	961,85
476,22	215,44	404,35	639,54	88,66	963,54
472,86	239,19	394,95	680,25	77,92	965,24
469,51	261,24	382,19	729,44	55,75	968,63

Πίνακας 3.47: Τιμές της I-V για απόσταση 32 cm (C= 4,79) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=79,52\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,70\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
468,93	3,39	425,27	332,66	290,23	1050,59
468,26	5,09	421,23	364,91	260,00	1126,96
466,92	13,58	416,53	393,76	227,75	1176,18
465,58	25,46	411,83	431,10	200,20	1201,64
462,89	45,83	406,45	463,35	179,38	1213,52
459,53	76,38	401,08	504,08	163,93	1222,01
453,48	122,20	395,03	539,72	151,83	1227,10
451,47	137,48	388,32	583,85	141,76	1228,80
449,45	152,75	382,27	622,89	133,02	1230,50
447,44	171,42	374,21	670,41	126,30	1235,59
444,75	188,39	366,82	712,84	111,52	1238,98
442,06	210,46	358,08	762,06	92,04	1240,68
439,37	229,13	349,35	807,88	83,31	1242,38
436,01	254,59	338,60	858,80	77,93	1245,77
433,33	278,35	329,19	904,63	75,24	1247,47
429,30	305,50				

Πίνακας 3.48: Τιμές της I-V για απόσταση 30 cm (C= 5,44) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=84,99\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,64\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
458,86	1,70	411,83	371,68	224,39	1283,07
458,19	8,49	407,80	402,23	204,24	1320,40
457,51	15,27	402,42	437,87	186,77	1342,47
456,17	27,15	397,72	471,82	172,66	1356,05
453,48	47,52	392,35	512,55	161,24	1364,53
449,45	79,77	386,97	548,19	151,83	1369,62
443,41	125,59	380,25	592,31	143,77	1376,41
441,39	142,56	374,21	633,05	131,68	1383,20
439,37	157,84	367,49	680,57	126,98	1386,59
437,36	174,81	360,77	723,00	111,52	1388,29
435,34	193,48	352,04	772,22	108,84	1389,99
432,66	215,54	344,65	818,04	104,13	1391,69
429,97	235,91	335,24	870,65	102,12	1395,08
426,61	259,67	327,18	916,48	97,41	1396,78
423,92	283,43	295,60	1067,53	86,67	1400,17
419,89	312,28	272,76	1157,48	83,98	1401,87
415,86	339,44	249,25	1232,15		

Πίνακας 3.49: Τιμές της I-V για απόσταση 30 cm (C= 5,44) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=80,04\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,67\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
470,95	1,70	431,31	315,63	346,66	879,02
470,28	8,48	427,28	342,78	337,26	926,53
469,61	15,27	423,25	375,03	305,68	1080,96
467,59	28,85	419,22	405,57	281,50	1172,59
465,58	49,21	413,84	442,90	255,97	1248,95
461,54	79,76	409,14	476,84	231,11	1303,26
455,50	128,97	403,77	517,57	207,59	1333,80
453,48	144,24	398,39	554,90	189,45	1354,16
451,47	159,51	391,67	599,02	175,35	1367,74
448,78	178,18	385,63	638,05	162,58	1374,53
446,76	195,15	378,24	687,26	153,85	1379,62
444,08	217,21	371,52	729,69	85,99	1381,32
441,39	237,57	363,46	780,60	76,59	1386,41
438,03	263,03	355,40	826,41	74,57	1391,50
434,67	286,78				

Πίνακας 3.50: Τιμές της I-V για απόσταση 28 cm (C= 6,25) χωρίς ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=91,57^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,79^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
447,36	1,70	334,51	843,28
446,69	8,48	325,78	895,88
446,02	16,97	318,39	943,39
444,00	30,54	291,52	1094,40
441,32	52,60	273,39	1189,42
437,29	86,53	254,58	1274,26
431,24	135,74	237,12	1345,52
429,23	152,71	220,32	1401,52
427,21	167,98	205,54	1443,93
425,20	186,64	192,78	1477,87
422,51	205,31	180,69	1499,93
419,82	227,36	171,29	1518,59
417,13	249,42	163,23	1528,77
413,78	274,87	155,17	1535,56
410,42	300,32	149,12	1547,44
406,39	329,17	143,75	1552,53
403,03	356,32	139,05	1557,62
399,00	390,25	134,34	1559,31
394,30	420,79	130,31	1566,10
389,59	458,12	124,27	1569,49
384,89	492,06	118,89	1572,89
379,52	534,48	116,88	1577,98
374,15	571,80	112,85	1583,07
368,10	615,92	99,41	1584,77
362,73	656,64	94,71	1589,86
355,34	704,15	92,02	1594,95
349,29	748,27	87,99	1596,64
341,23	799,17		

Πίνακας 3.51: Τιμές της I-V για απόσταση 28 cm (C= 6,25) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=79,23$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,80$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
474,23	3,39	375,49	758,41
473,56	10,18	367,43	811,01
472,89	16,97	360,71	858,51
470,87	32,24	351,98	912,81
468,19	52,60	344,59	962,01
464,16	86,53	316,38	1119,80
458,11	137,43	295,55	1221,60
456,09	154,40	273,39	1309,83
454,08	169,67	251,89	1386,18
451,39	190,03	231,74	1442,17
449,38	206,99	212,93	1482,89
446,02	230,75	197,48	1508,34
443,33	252,80	184,05	1523,61
439,97	278,25	173,30	1533,79
437,29	303,70	163,23	1540,57
433,26	332,55	155,17	1542,27
429,90	361,39	149,12	1550,75
425,20	395,32	137,70	1555,84
421,84	425,86	133,67	1557,54
417,14	463,19	129,64	1560,93
412,43	498,82	126,28	1564,33
407,06	539,54	104,12	1566,02
401,69	578,56	101,43	1567,72
394,97	622,68	98,07	1571,11
389,59	665,09	97,40	1574,51
382,21	715,99	94,04	1579,60

Πίνακας 3.52: Τιμές της I-V για απόσταση 22 cm (C= 10,12) χωρίς ψύξη.
Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=119,67$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,77$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
397,63	1,70	319,04	658,21	145,08	1854,17
396,96	6,79	313,00	704,01	143,07	1866,05
396,29	10,18	307,62	746,42	140,38	1877,92
395,61	18,66	301,58	795,61	138,36	1888,10
393,60	32,23	296,21	839,72	137,02	1896,58
390,91	54,28	289,49	888,92	135,01	1905,06
386,88	88,21	283,44	934,72	133,66	1913,55
380,84	139,11	263,97	1078,91	132,32	1922,03
378,82	156,07	251,88	1170,52	130,98	1925,42
376,81	171,34	239,79	1255,34	129,63	1930,51
374,79	191,69	229,04	1335,07	128,29	1935,60
372,78	210,35	218,29	1404,62	127,62	1940,69
370,09	232,41	208,89	1467,39	126,95	1945,78
367,40	254,46	200,83	1523,37	125,60	1947,47
364,05	279,91	192,77	1572,57	124,93	1952,56
361,36	305,35	186,05	1614,98	124,26	1954,26
358,00	334,19	180,01	1652,30	123,59	1959,35
354,64	361,33	173,96	1684,53	122,92	1961,04
350,61	395,26	169,26	1715,07	122,24	1962,74
347,25	425,80	165,23	1743,91	121,57	1969,53
342,55	463,12	160,53	1765,96	119,56	1971,22
338,52	497,05	157,17	1789,71	118,89	1983,10
333,82	537,76	153,81	1806,67	118,21	1986,49
329,12	575,08	150,45	1825,33	116,87	1994,97
323,74	617,49	147,77	1840,60	113,51	2011,94

Πίνακας 3.53: Τιμές της I-V για απόσταση 20 cm (C= 12,25) χωρίς ψύξη.
Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=130,39$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,77$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
376,15	1,70	293,53	700,62	136,35	1860,96
375,48	3,39	288,16	741,33	135,01	1872,83
375,48	6,79	282,11	790,52	133,00	1881,31
374,80	10,18	277,41	832,93	132,32	1888,10
374,13	18,66	270,69	880,43	130,31	1896,58
372,79	32,23	265,32	922,84	129,64	1905,06
370,10	54,28	247,85	1061,95	128,29	1911,85
366,07	89,91	236,44	1148,47	127,62	1920,33
360,03	140,80	226,36	1228,20	126,28	1923,72
358,01	157,77	216,28	1302,84	125,61	1928,81
356,67	173,03	207,55	1370,70	124,93	1933,90
353,98	191,69	198,82	1431,77	124,26	1935,60
351,97	210,35	191,43	1484,35	123,59	1942,38
349,28	234,10	184,72	1531,85	122,92	1947,47
346,59	256,16	178,67	1575,96	122,25	1949,17
343,23	281,60	173,30	1613,28	121,58	1952,56
340,55	307,05	168,59	1647,21	120,90	1957,65
337,19	334,19	164,56	1679,44	120,23	1964,44
333,83	363,03	159,86	1704,89	119,56	1969,53
329,80	396,96	156,50	1730,33	118,22	1978,01
326,44	425,80	153,15	1754,08	117,55	1979,71
321,74	464,82	149,79	1772,74	116,87	1986,49
317,71	495,35	147,10	1791,40	116,20	1988,19
313,01	536,06	144,41	1808,37	114,86	2001,76
308,98	571,69	142,40	1823,64	113,52	2003,45
304,28	617,49	140,38	1837,21	112,84	2006,85
298,90	656,51	138,37	1847,39	112,17	2010,24

Πίνακας 3.54: Τιμές της I-V για απόσταση 20 cm (C= 12,25) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=120\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,73\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
392,93	1,70	299,57	805,78	142,40	1962,71
392,26	18,66	294,20	849,89	140,38	1974,59
390,25	33,93	288,15	900,78	139,04	1984,77
387,56	55,98	282,11	946,58	137,70	1994,94
383,53	91,60	263,97	1092,47	136,35	2003,43
377,49	144,19	251,88	1184,07	135,68	2011,91
375,47	161,16	240,46	1270,59	135,01	2020,39
373,46	176,42	229,72	1350,32	133,66	2027,18
371,44	196,78	220,31	1424,96	132,99	2033,96
369,43	215,44	210,91	1489,42	132,32	2037,35
366,74	239,19	202,85	1547,10	130,98	2040,75
364,05	261,24	196,13	1597,99	130,31	2044,14
360,69	286,69	189,41	1643,79	129,63	2049,23
358,01	312,13	183,37	1686,20	128,96	2054,32
354,65	342,67	178,00	1720,13	128,29	2057,71
351,29	369,81	173,29	1754,06	126,95	2064,50
347,26	403,74	169,26	1784,59	126,28	2067,89
343,90	434,27	165,23	1811,74	125,60	2071,28
339,20	471,59	161,88	1837,18	124,93	2074,67
335,84	505,52	158,52	1859,23	124,26	2079,76
330,47	547,93	155,83	1877,89	122,25	2083,16
326,44	585,25	153,14	1898,25	121,57	2084,85
321,74	627,66	150,46	1913,52	120,23	2091,64
316,36	668,37	147,77	1927,09	118,22	2103,51
310,99	715,87	145,76	1940,66	115,53	2128,96
305,62	756,59	143,74	1952,54		

Πίνακας 3.55: Τιμές της I-V για απόσταση 18 cm (C= 15,12) χωρίς ψύξη.
Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=147\text{ }^\circ\text{C}$, Περιβάλλοντος: $T_a=18,86\text{ }^\circ\text{C}$

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
346,55	3,39	269,31	661,59	134,32	1728,61
345,88	6,79	263,94	705,69	132,31	1742,18
345,20	10,18	259,24	744,71	130,29	1755,75
343,86	20,36	253,87	790,51	128,95	1764,24
342,52	33,93	249,17	831,23	127,60	1777,81
339,83	59,37	243,79	877,03	126,26	1786,29
335,80	95,00	238,42	917,74	124,92	1794,77
329,09	147,59	222,97	1041,58	123,58	1801,56
327,07	164,55	213,57	1119,61	122,90	1811,74
325,73	181,51	204,84	1192,56	122,23	1816,82
323,04	200,17	196,11	1257,02	120,89	1821,91
320,36	220,53	188,72	1314,70	120,22	1828,70
317,67	242,58	182,00	1367,28	119,55	1835,48
315,65	264,64	175,96	1416,48	118,87	1837,18
312,30	291,78	169,92	1458,89	118,20	1843,97
309,61	315,53	165,21	1496,21	117,53	1847,36
306,25	346,06	160,51	1530,14	116,86	1850,75
302,89	373,20	156,48	1562,37	116,19	1854,14
298,86	407,13	152,45	1589,51	115,52	1857,54
295,51	437,67	149,10	1613,26	114,17	1867,72
291,48	473,29	145,74	1637,01	113,50	1872,80
287,45	507,22	143,05	1659,06	112,83	1879,59
282,75	546,23	140,37	1681,11	111,49	1884,68
278,72	581,86	138,35	1696,38	110,14	1894,86
273,34	624,27	136,34	1713,34	108,13	1906,73

Πίνακας 3.56: Τιμές της I-V για απόσταση 18 cm (C=15,12) με ψύξη. Μέση θερμοκρασία Φ/Β: $T_c=119,44$ °C, Περιβάλλοντος: $T_a=18,83$ °C

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
391,55	3,39	306,25	727,75	146,41	1950,84
390,87	6,79	300,88	768,46	145,07	1964,41
390,20	10,18	294,83	819,35	143,05	1976,29
388,86	20,36	289,46	861,76	141,71	1988,16
387,52	35,62	284,09	912,65	140,37	2000,04
384,16	59,37	278,04	956,76	139,02	2010,22
380,13	95,00	259,91	1100,95	138,35	2022,09
374,76	149,28	248,49	1194,26	137,01	2032,27
373,41	166,25	237,75	1279,07	136,34	2039,05
371,40	183,21	227,67	1358,80	134,99	2044,14
368,71	203,57	218,27	1430,05	134,32	2049,23
366,70	222,23	210,21	1494,52	133,65	2056,02
364,01	247,67	202,15	1552,19	132,31	2059,41
361,32	268,03	195,44	1604,78	131,63	2064,50
357,97	295,17	189,39	1650,58	130,96	2067,89
354,61	320,62	183,35	1691,30	130,29	2071,29
351,25	351,15	177,98	1726,92	129,62	2076,38
347,89	379,99	173,95	1760,85	128,28	2079,77
343,86	413,92	169,24	1791,38	127,61	2086,55
340,50	444,45	165,89	1820,22	126,93	2088,25
336,47	483,47	161,86	1843,97	126,26	2101,82
331,77	517,40	159,17	1866,02	125,59	2106,91
327,07	558,11	155,81	1886,38	124,92	2125,57
322,37	595,43	153,80	1905,04	124,25	2134,05
317,00	639,54	151,11	1920,31	120,89	2147,62
312,30	680,25	148,42	1935,58	120,22	2164,59

3.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.2.1 Μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας

Με εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας, κατέστη δυνατή η ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας του Φ/Β συναρτήσει του

χρόνου, με δεδομένη τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ένταση της ακτινοβολίας, το οποίο επαληθεύτηκε από τις μετρήσεις.

Θα ισχύει:

$$E_{\Phi/B} = E_{in} - E_{out} \quad (3.1)$$

όπου: $E_{\Phi/B}$ η θερμότητα που αποθηκεύεται στο Φ/B

E_{out} το άθροισμα της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και της ενέργειας που απορρίπτεται από το Φ/B λόγω μετάδοσης και ακτινοβολίας

E_{in} η ενέργεια που προσπίπτει στο Φ/B με τη μορφή ακτινοβολίας.

Είναι προφανές ότι η προσπίπτουσα στο Φ/B ενέργεια μπορεί να βρεθεί με δεδομένη την ισχύ της ακτινοβολίας και το εμβαδό του Φ/B :

$$E_{in} = P_{in} \cdot t = I_T \cdot A \cdot t \quad (3.2)$$

όπου: P_{in} η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο Φ/B

I_T η ένταση της ακτινοβολίας

A η επιφάνεια του Φ/B

t ο χρόνος

Η εξερχόμενη από το Φ/B ενέργεια αποτελείται από την ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από αυτό και από την ενέργεια που χάνεται στο περιβάλλον μέσω απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας και λόγω ακτινοβολίας του Φ/B :

$$E_{out} = E_{απωλειών} + E_{ηλεκτρική} \quad (3.3)$$

όπου: $E_{απωλειών}$ οι θερμικές απώλειες

$E_{ηλεκτρική}$ η αποδιδόμενη από το Φ/B ηλεκτρική ενέργεια

Η ισχύς των θερμικών απωλειών δίνεται από τη σχέση:

$$P_{απωλειών} = P_c + P_r = h_c \cdot 2A \cdot dT_c + h_r \cdot 2A \cdot dT_c = 2A \cdot [h_c + h_r] dT_c \quad (3.4)$$

όπου: P_c η ισχύς των θερμικών απωλειών λόγω μεταφοράς

P_r η ισχύς των θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας

dT_c η διαφορά θερμοκρασίας του Φ/B από το περιβάλλον

h_c ο συντελεστής θερμικών απωλειών λόγω μεταφοράς

h_r ο συντελεστής θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας

Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό, μπορεί να δοθεί συναρτήσει της ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό και του βαθμού απόδοσης του φωτοβολταϊκού. Προκύπτει:

$$P_{\text{ηλεκτρική}} = n_{\Phi B} \cdot P_{\text{in}} = n_{\Phi B} \cdot I_T \cdot A \quad (3.5)$$

όπου: $n_{\Phi B}$ ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού

Η θερμότητα η οποία αποθηκεύεται στο φωτοβολταϊκό και εκφράζεται μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\Phi B} = \rho \cdot c \cdot V \cdot dT_c \quad (3.6)$$

όπου: ρ η πυκνότητα του πυριτίου

c η θερμοχωρητικότητα του πυριτίου

V ο όγκος του φωτοβολταϊκού

dT_c η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του Φ/B και του περιβάλλοντος

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.1 έως 3.6 και έχοντας υπ' όψη ότι το φωτοβολταϊκό παρουσιάζει απώλειες στην εμπρός αλλά και την πίσω επιφάνεια πράγμα που σημαίνει ότι στον υπολογισμό των απωλειών η επιφάνεια που υπολογίζεται είναι το διπλάσιο της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού. Κατόπιν τούτου, θα ισχύει:

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{dT_c}{dt} = A \cdot I_T - n_{\Phi B} \cdot A \cdot I_T - 2 \cdot h_c \cdot A \cdot (T_c - T_a) - 2 \cdot h_r \cdot A \cdot (T_c - T_a)$$

και

$$T_c^v = T_c^{(v-1)} + (1 - n_{\Phi B}) \cdot \frac{A \cdot I_T}{\rho \cdot c \cdot V} \delta t - \frac{2 \cdot A}{\rho \cdot c \cdot V} \cdot (h_c + h_r) \cdot (T_c^{(v-1)} - T_a) \delta t \quad (3.7)$$

όπου: T_c^v η θερμοκρασία του Φ/B στο τέλος του διαστήματος δt

$T_c^{(v-1)}$ η θερμοκρασία του Φ/B στην αρχή του διαστήματος δt

Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας θα πρέπει να υπολογίζονται σε κάθε βήμα του υπολογισμού της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού εφ' όσον εξαρτώνται από αυτήν. Με αυτή τη μέθοδο απαιτείται ο υπολογισμός της

θερμοκρασίας για μικρά διαστήματα δt χωρίς να είναι δυνατός ο απευθείας υπολογισμός της θερμοκρασίας μετά από μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών λόγω μεταφοράς, h_c , προσδιορίζεται από τη θεωρία μετάδοσης θερμότητας (Incropera, DeWitt et al 2006) για ελεύθερη ροή και εφόσον, για τον αριθμό Rayleigh ισχύει η ανισότητα:

$$Ra = Gr \cdot Pr \leq 10^9 \quad (3.8)$$

όπου: Gr, είναι ο αριθμός Grashof

Pr είναι ο αριθμός Prandtl

Ο αριθμός Grashof υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_c - T_a) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (3.9)$$

όπου: g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

β είναι ο συντελεστής διαστολής του αέρα

ν είναι το κινηματικό ιξώδες

T_a , είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος

T_c , είναι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού

Ο συντελεστής διαστολής του αέρα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{(T_c + T_a) / 2}, T_c, T_a [^\circ K] \quad (3.10)$$

Ο αριθμός Prandtl υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (3.11)$$

όπου: μ , είναι το δυναμικό ιξώδες

C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα

k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας h_c προσδιορίζεται από τον αριθμό Nusselt μέσω της σχέσης:

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{k} \quad (3.12)$$

όπου: L το μήκος του φωτοβολταϊκού

Η σχέση για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt, για $Ra \leq 10^9$, είναι:

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670 \cdot (G_r \cdot P_r)^{1/4}}{[1 + (0.492/P_r)^{9/16}]^{4/9}} \quad (3.13)$$

Εφόσον το μήκος της ροής είναι μικρό, 0.005 m, δεν έχουμε πλήρη ανάπτυξη του οριακού στρώματος, χρειάζεται να διορθωθεί ο αριθμός Nusselt πολλαπλασιάζοντάς τον με 4/3.

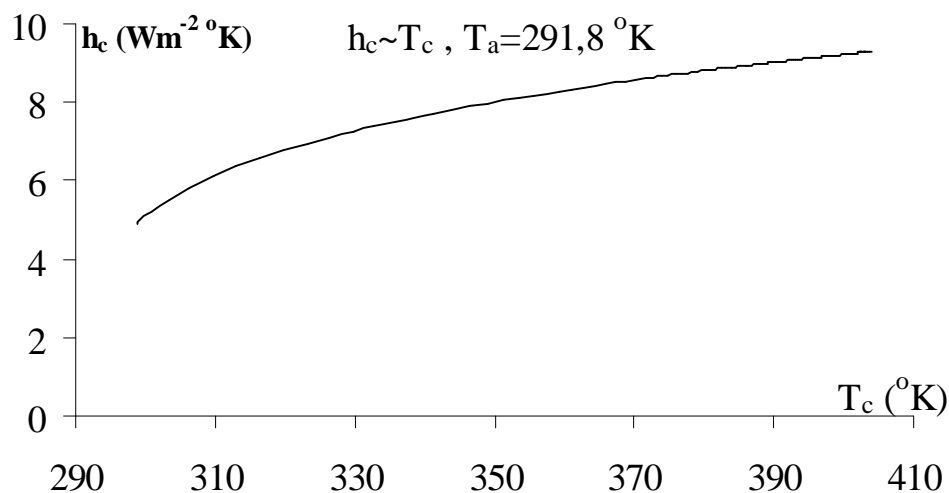
Ο συντελεστής θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας, h_r , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot [T_c + T_a] \cdot [T_c^2 + T_a^2] \quad (3.14)$$

όπου: ε , ο συντελεστής εκπομπής ή αφετικότητας του c-Si, $\varepsilon=0.8$

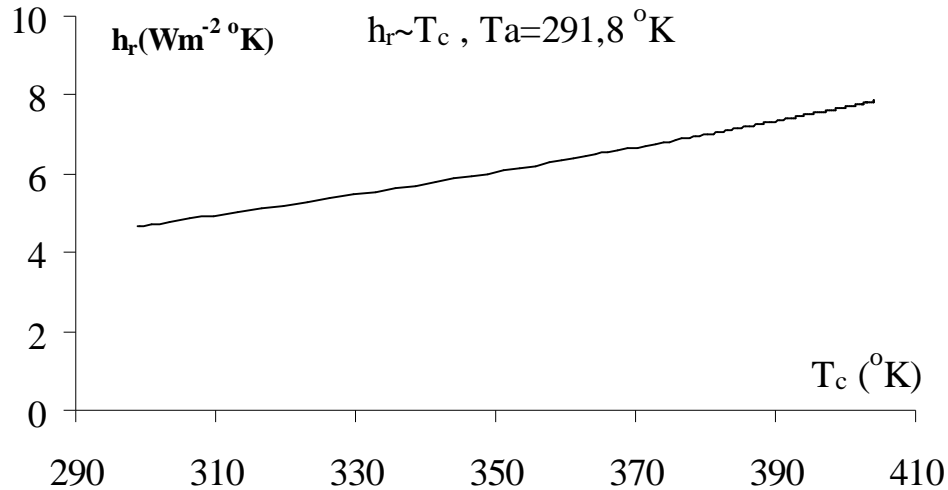
σ , η σταθερά Stefan - Boltzmann, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Από τα παραπάνω και με υπολογισμούς με βάση τις εμφανιζόμενες θερμοκρασίες σε απόσταση 20 cm του Φ/Β από τον προβολέα, συγκέντρωση ακτινοβολίας $C=12,25$ προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα (Σχ. 3.1) του συντελεστή θερμικών απωλειών λόγω μεταφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας:



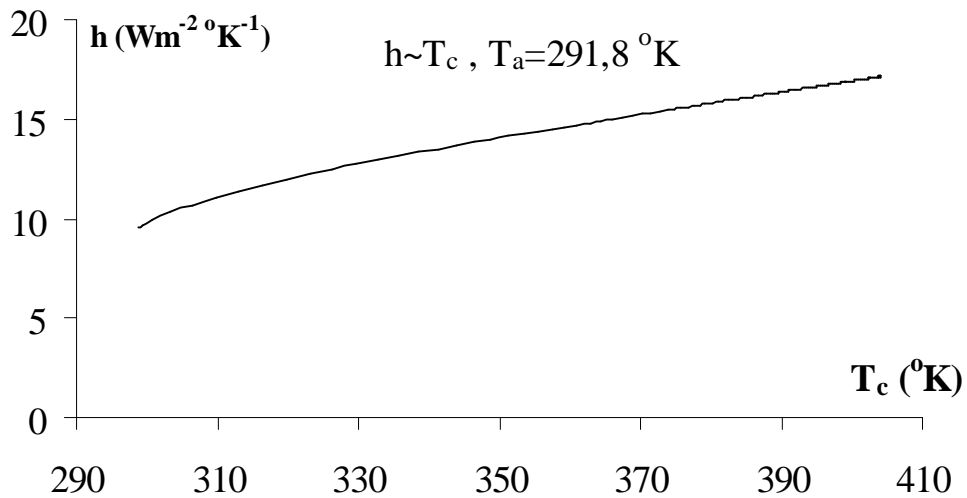
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα του h_c συναρτήσει της θερμοκρασίας του Φ/Β, με θερμοκρασία περιβάλλοντος 291,8 °K

Εν συνεχεία υπολογίστηκε ο συντελεστής θερμικών απωλειών λόγω ακτινοβολίας, h_r , του Φ/Β, για τις ίδιες θερμοκρασίες:



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα του h_r συναρτήσει της θερμοκρασίας του Φ/Β, με θερμοκρασία περιβάλλοντος $291,8 \text{ }^\circ\text{K}$

Τέλος υπολογίσθηκε ο συνολικός συντελεστής θερμικών απωλειών του Φ/Β και προέκυψε το διάγραμμα:

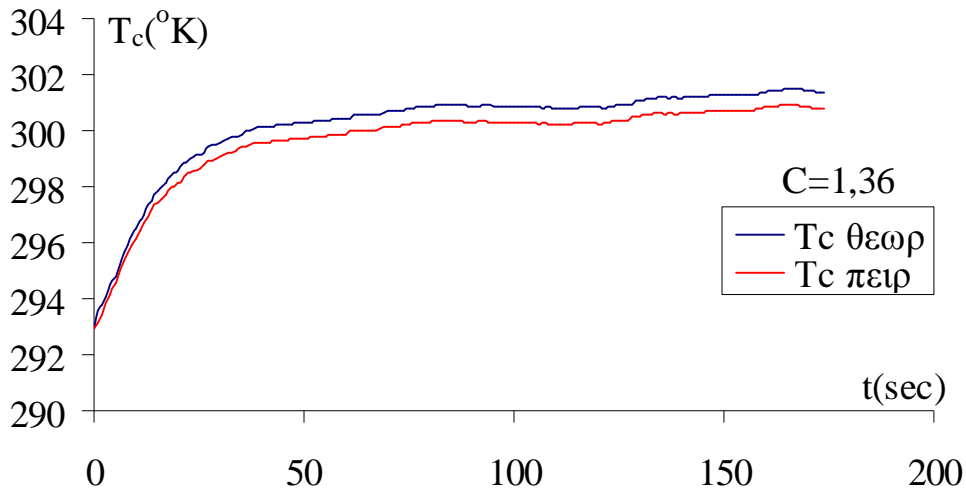


Σχήμα 3.4: Διάγραμμα του h συναρτήσει της θερμοκρασίας του Φ/Β, με θερμοκρασία περιβάλλοντος $291,8 \text{ }^\circ\text{K}$

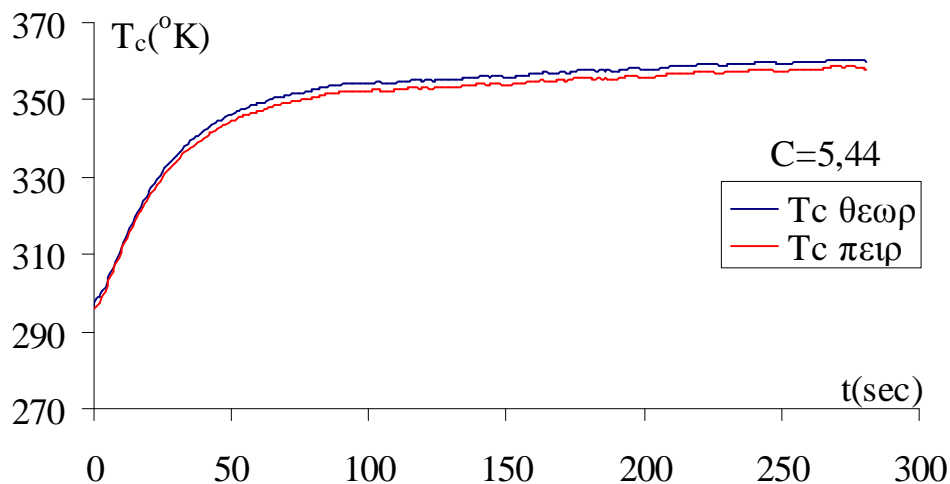
Ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού ελαττώνεται κατά 0.3% ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Για το φωτοβολταϊκό του πειράματος ο βαθμός απόδοσης σε συνθήκες STC είναι 18% και μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$n_{pv} = n_{pv}^{STC} - 0.3\%_{\text{K}} \cdot (T_c - T_c^{STC}) \quad , \quad T_c^{STC} = 25^\circ\text{C} \quad (3.15)$$

Για την χρήση του μοντέλου λαμβάνεται σαν αρχική συνθήκη για τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού, η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στα σχήματα 3.4 και 3.5 φαίνεται ότι υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση ανάμεσα στο θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας και τις πειραματικές μετρήσεις



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα της θερμοκρασίας του Φ/Β (T_c) για απόσταση 60 cm, όπως προκύπτει από το μοντέλο πρόβλεψης και από τις πειραματικές μετρήσεις, συναρτήσει του χρόνου, με θερμοκρασία περιβάλλοντος 291,8 °K



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα της θερμοκρασίας του Φ/Β (T_c) για απόσταση 30 cm, όπως προκύπτει από το μοντέλο πρόβλεψης και από τις πειραματικές μετρήσεις, συναρτήσει του χρόνου, με θερμοκρασία περιβάλλοντος 291,8 °K

Εξετάστηκε επίσης η θεωρητική σταθερά χρόνου του φαινομένου της αύξησης της θερμοκρασίας και έγινε σύγκρισή της με την πειραματικά υπολογιζόμενη. Για τον θεωρητικό υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 3.16 (Incropera, DeWitt et al 2006):

$$\tau_{T_c} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot V}{h \cdot A} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot L_{cr}}{h} \quad (3.16)$$

όπου: L_{cr} , το κρίσιμο για το φαινόμενο μήκος του φωτοβολταϊκού, ίσο με το μισό του πάχους του

Η σταθερά χρόνου του φαινομένου της αύξησης της θερμοκρασίας, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πυριτίου, δηλαδή την ειδική θερμοχωρητικότητα του, $r \cdot c_p$, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού, L_{cr} , και τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης θερμότητας ανάμεσα στο φωτοβολταϊκό και τον αέρα, δηλαδή τον συντελεστή θερμικών απωλειών h . Το L_{cr} λαμβάνεται ίσο με το μισό του πάχους του φωτοβολταϊκού, διότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται από την εμπρός αλλά και την πίσω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού.

Ο υπολογισμός της πειραματικής σταθεράς χρόνου έγινε με προσαρμογή της συνάρτησης $y(x) = a + b \cdot (1 - \exp(-x/t_{T_c}))$ στα πειραματικά δεδομένα. Στον πίνακα 3.57 παρατηρούμε αρκετά καλή προσέγγιση της υπολογιζόμενης θεωρητικά σταθεράς χρόνου με την πειραματική, επιβεβαιώνοντας την μέθοδο που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικών απωλειών h .

Πίνακας 3.57: Πειραματική και θεωρητική σταθερά χρόνου για διάφορες συγκεντρώσεις

C	τ_{T_c} πειραματικό	τ_{T_c} θεωρητικό
1	35.30	34.50
1,36	36.60	33.14
3,06	33.80	30.23
5,44	27.40	28.24
12,25	25.30	25.24

Προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση του μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας και επαλήθευσή του για περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

3.2.2 Εξάρτηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος από την θερμοκρασία

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.4.3, η τάση ανοιχτού κυκλώματος, για σταθερή ακτινοβολία, ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού, κατά την εξ. 1.16. Σε αυτή την παράγραφο διερευνήθηκε πειραματικά η ορθότητα της εξ. 1.16, με χρήση των μετρήσεων τάσης και θερμοκρασίας από την έναρξη φωτισμού του φωτοβολταϊκού έως την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας.

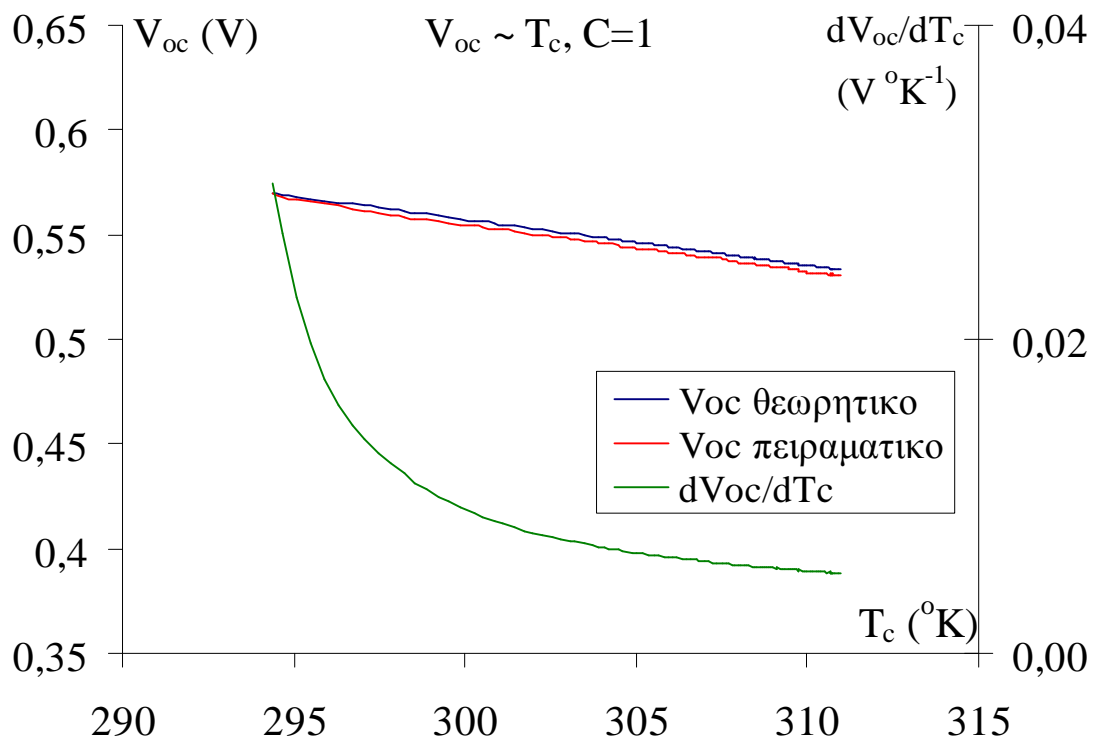
Για τον σκοπό αυτό, με τάση και θερμοκρασία αναφοράς τις τιμές κατά την έναρξη του πειράματος, για συγκέντρωση ακτινοβολίας $C=1$ (70 cm), υπολογίστηκε η θεωρητική τάση ανοιχτού κυκλώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας, ξεχωριστά σε κάθε συγκέντρωση ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο ρυθμός μεταβολής της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ανά μονάδα θερμοκρασιακής μεταβολής:

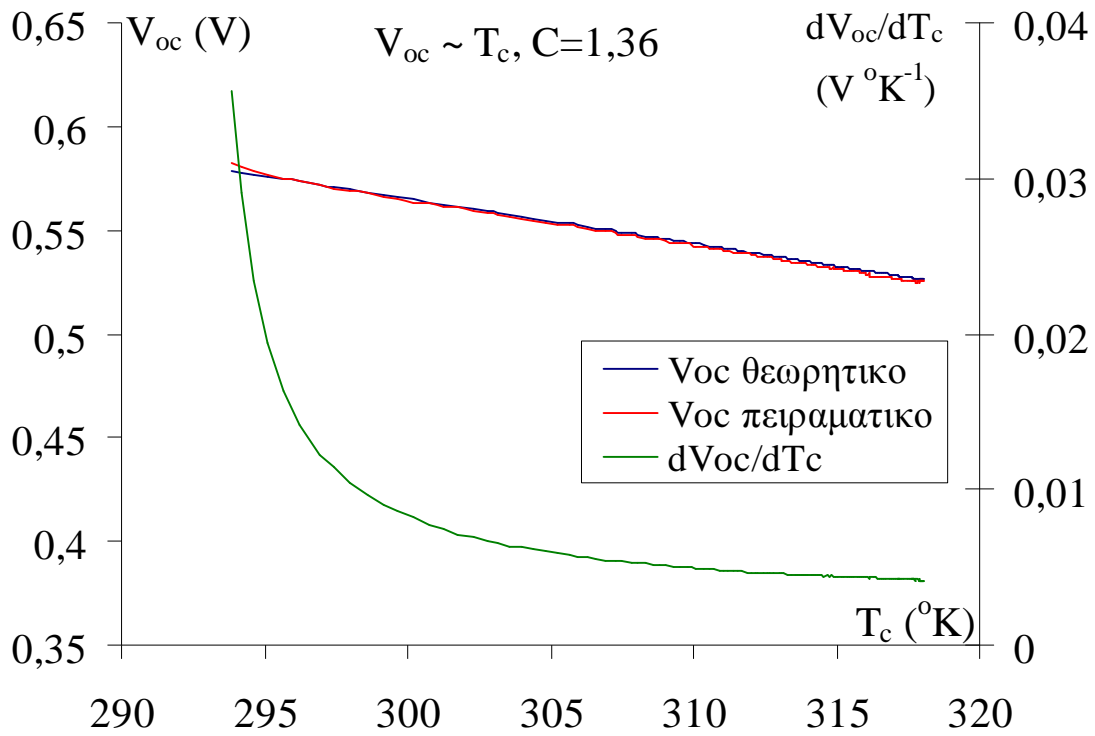
$$V_{oc}^C = V_{oc}^{C=1} + \frac{k \cdot T}{q} \ln C + \frac{dV_{oc}}{dT} \cdot (T_C - T_{C=1}) \Rightarrow$$

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{V_{oc}^C - V_{oc}^{C=1} - \frac{k \cdot T}{q} \ln C}{(T_C - T_{C=1})} \quad (3.17)$$

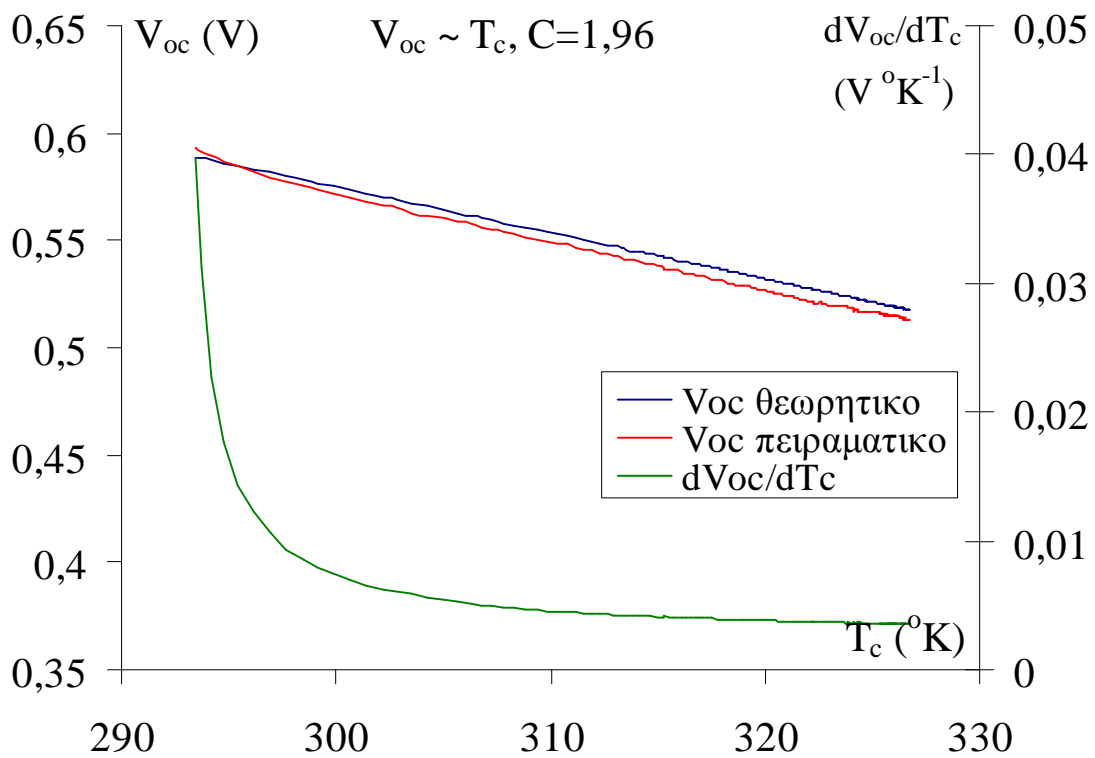
Στα διαγράμματα των σχημάτων 3.6 έως 3.11 παρατηρείται αρκετά καλή προσέγγιση ανάμεσα στην θεωρητικά υπολογιζόμενη τάση ανοιχτού κυκλώματος και στην μετρούμενη πειραματικά. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τον θεωρητικό υπολογισμό, ο ρυθμός μεταβολής της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ανά μονάδα θερμοκρασιακής μεταβολής ελήφθη $-2,2 \text{ mV}/^\circ\text{K}$.



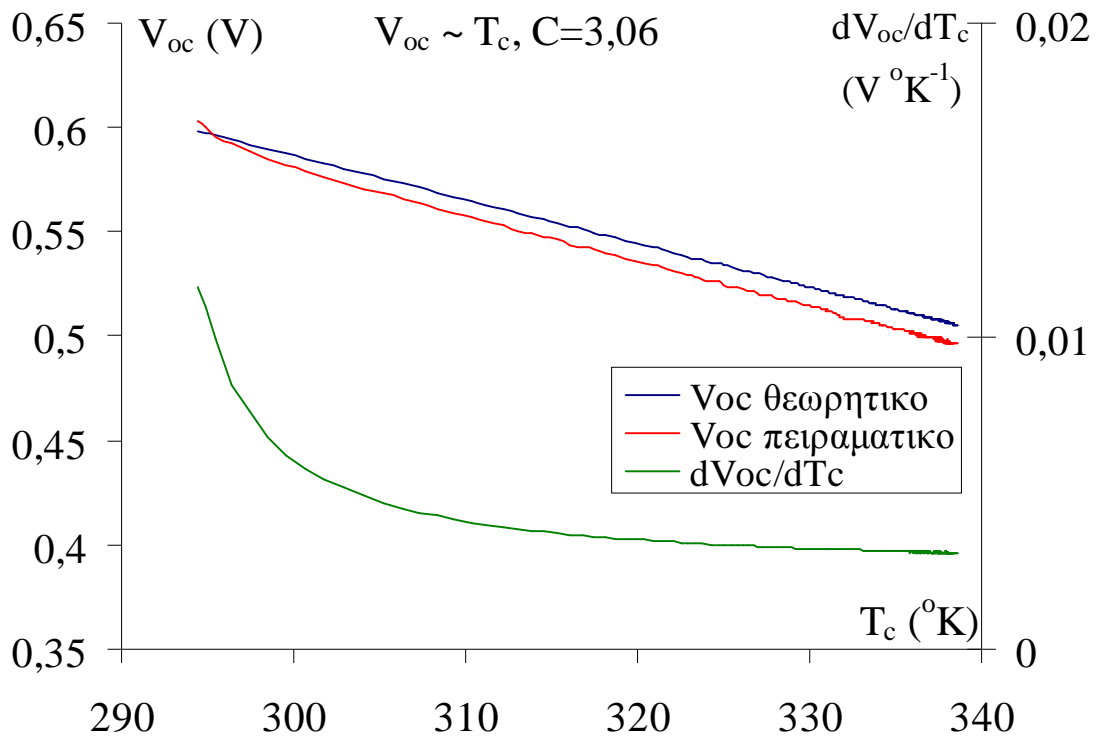
Σχήμα 3.7: Συγκέντρωση $C=1$



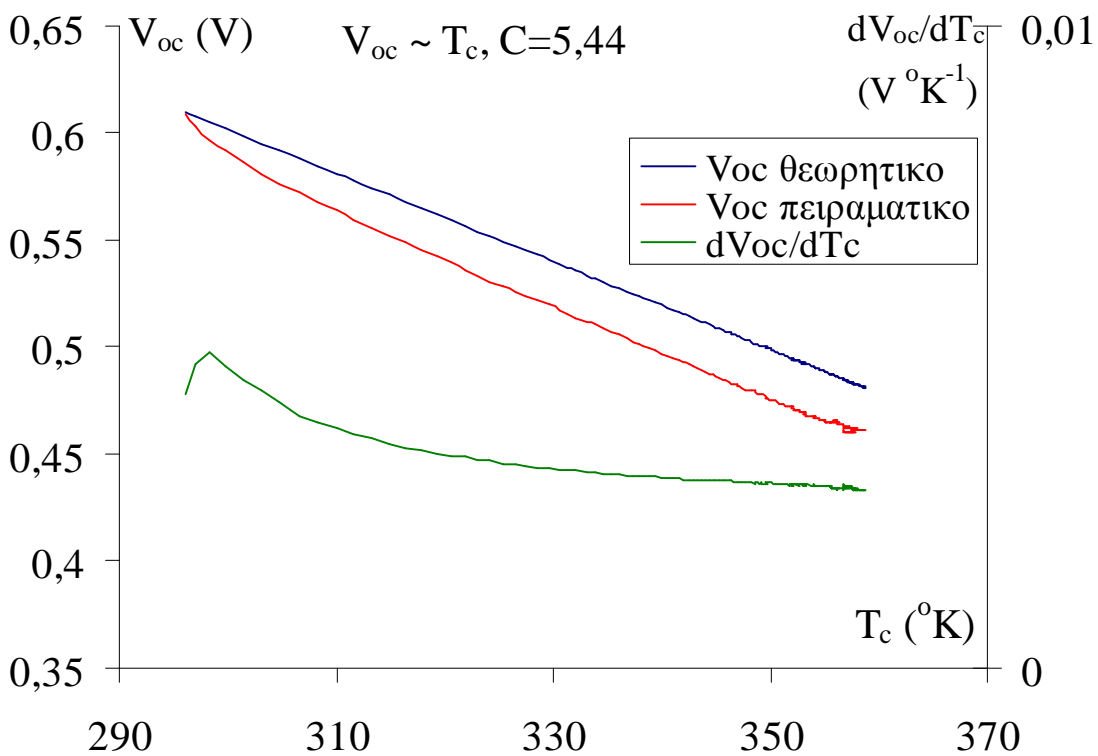
Σχήμα 3.8: Συγκέντρωση $C=1,36$



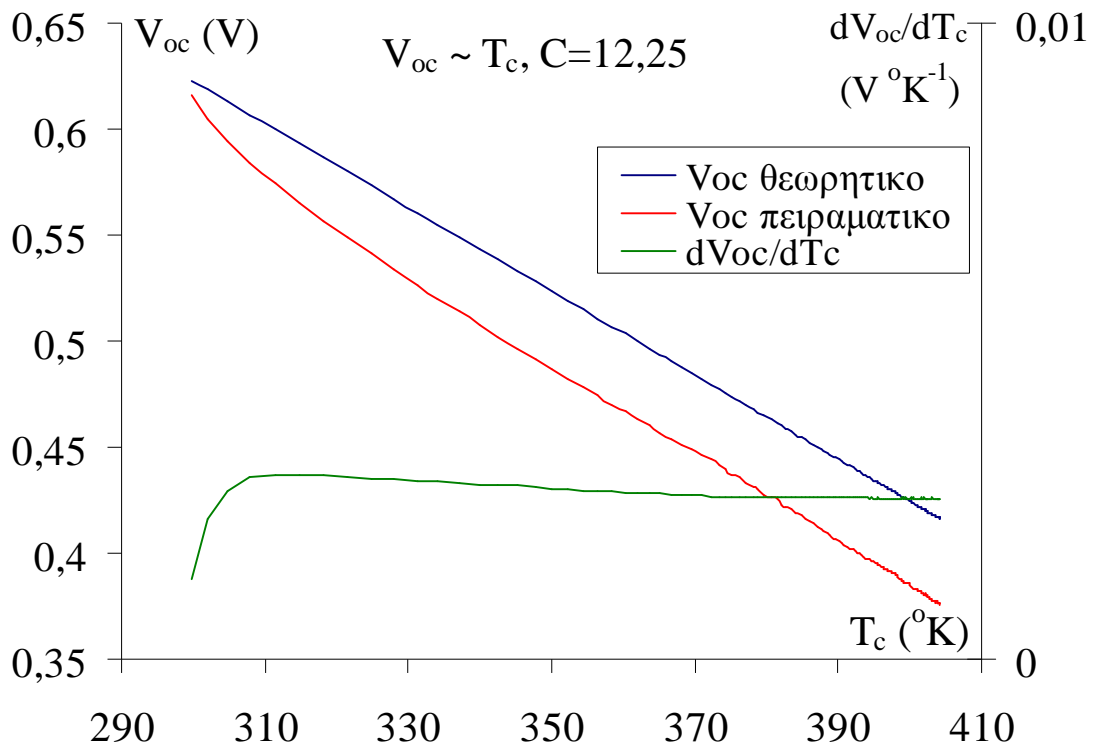
Σχήμα 3.9: Συγκέντρωση $C=1,96$



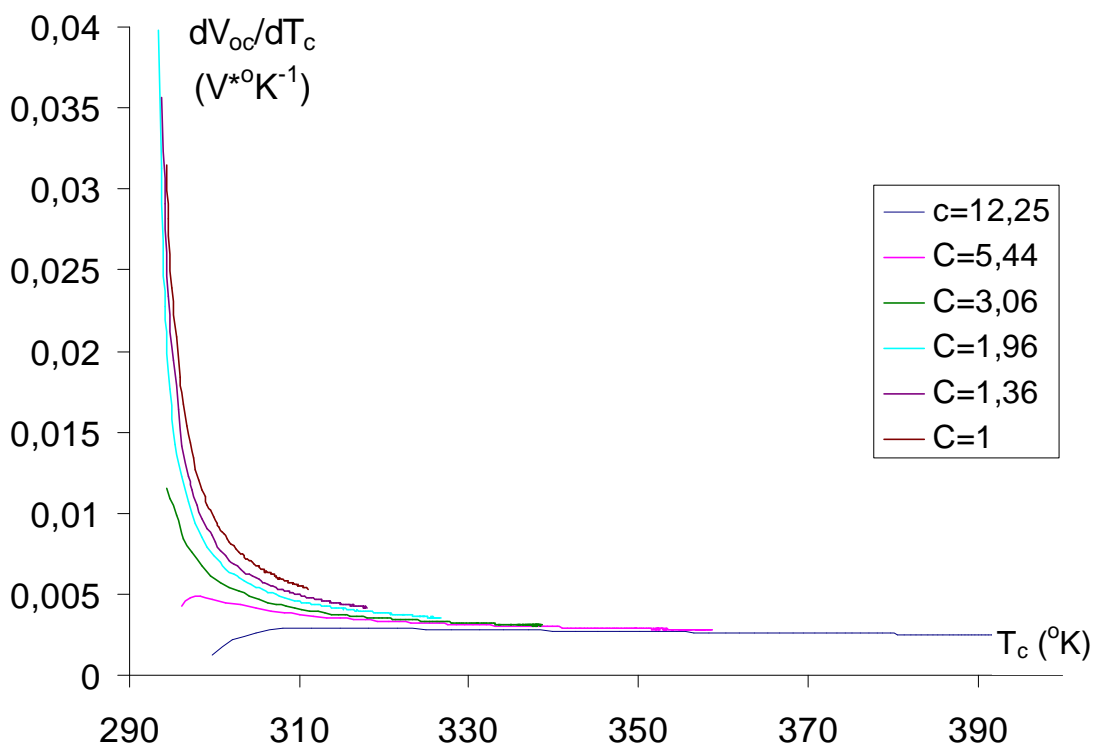
Σχήμα 3.10: Συγκέντρωση C=3.06



Σχήμα 3.11: Συγκέντρωση C=5.44



Σχήμα 3.12: Συγκέντρωση $C=12,25$



Σχήμα 3.13: Μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για όλες τις συγκεντρώσεις

Εξετάζοντας το διάγραμμα του ρυθμού μεταβολής της τάσης ανά βαθμό θερμοκρασιακής μεταβολής, παρατηρούμε ότι εμφανίζει σύγκλιση στην τιμή που χρησιμοποιήσαμε για τον θεωρητικό υπολογισμό της τάσης. Επίσης, από τα διαγράμματα της τάσης συναρτήσει της θερμοκρασίας, βλέπουμε ότι η απόκλιση ανάμεσα στη θεωρητικά υπολογισμένη τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και την πειραματική τιμή της, αυξάνει με την αύξηση της συγκέντρωσης. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η επίδραση της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας στην τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι ισχυρότερη από την περιγραφόμενη στην εξίσωση 1.16.

Μετά από υπολογισμό της σταθεράς χρόνου για το φαινόμενο της ελάττωσης της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού, με προσαρμογή της συνάρτησης $y(x) = a + b \cdot (1 - \exp(-x/\tau_{T_c}))$ στα πειραματικά δεδομένα, παρατηρήθηκε αρκετά καλή προσέγγιση ανάμεσα στη σταθερά χρόνου της θερμοκρασίας και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.58. Φαίνεται λοιπόν ότι με σταθερό επίπεδο έντασης ακτινοβολίας η τάση ανοιχτού κυκλώματος μεταβάλλεται λόγω της θερμοκρασίας.

Πίνακας 3.58: Πειραματικά υπολογισμένες σταθερές χρόνου θερμοκρασίας και τάσης ανοιχτού κυκλώματος

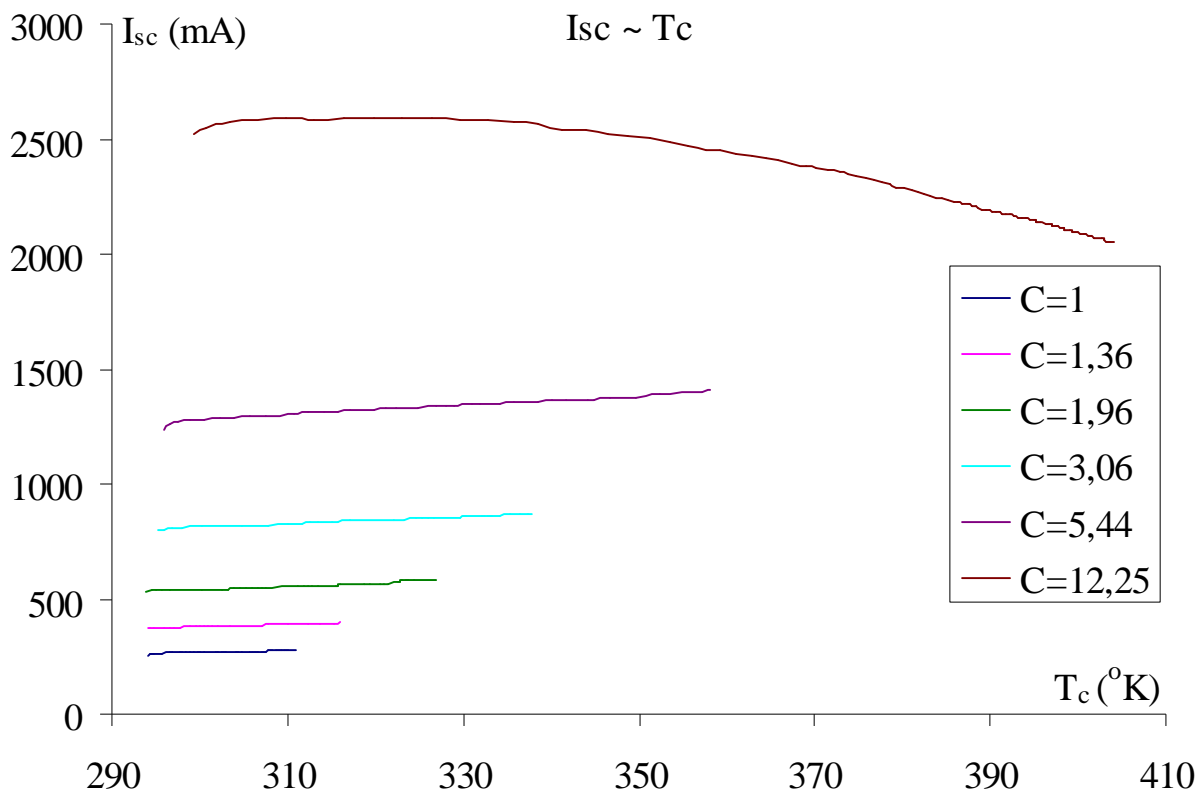
C	τ_{T_c} πειραματικό	$\tau_{V_{oc}}$ πειραματικό
1	35.30	33.4
1,36	36.60	37.5
3,06	33.80	31.6
5,44	27.40	28.1
12,25	25.30	24.3

Προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση της εξάρτησης της τάσης ανοιχτού κυκλώματος από την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού και την συγκέντρωση της ακτινοβολίας.

3.2.3 Εξάρτηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος από την θερμοκρασία

Όσον αφορά την μεταβολή του ρεύματος βραχυκυκλώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.13 παρατηρείται αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος με την αύξηση της θερμοκρασίας για χαμηλές συγκεντρώσεις ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά για υψηλή τιμή της συγκέντρωσης το ρεύμα βραχυκυκλώματος ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παρατηρείται δηλαδή ότι η αύξηση της συγκέντρωσης και της θερμοκρασίας

προκαλεί αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος έως μια μέγιστη τιμή, και κατόπιν ελάττωσή του.



Σχήμα 3.14: Μεταβολή του ρεύματος βραχυκυκλώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας για όλες τις συγκεντρώσεις

Εξετάζοντας το μοντέλο δύο διόδων του φωτοβολταϊκού, Εξ. 1.15, για τιμή $I=I_{sc}$, και σύμφωνα με τις παραπάνω διαπιστώσεις συμπεραίνουμε ότι από κάποιες τιμές συγκεντρώσεως και θερμοκρασίας και πάνω, η αύξηση στην ένταση του φαινομένου επανασυνδυασμού ηλεκτρονίων – οπών καθώς και του φαινομένου της διάχυσης φορέων φορτίου λόγω της θερμοκρασίας, ξεπερνά την αύξηση του φωτορεύματος λόγω αύξησης της συγκέντρωσης και της θερμοκρασίας.

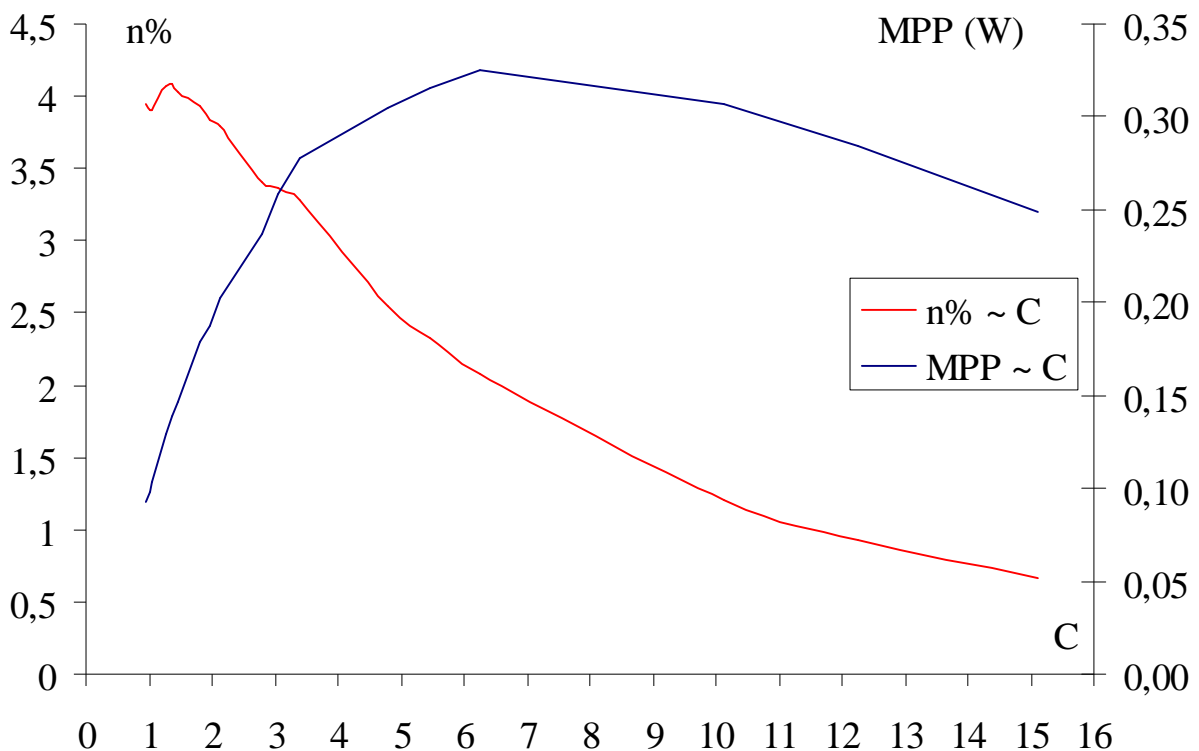
Αναλυτικότερα, αύξηση της θερμοκρασίας, προκαλεί ελάττωση του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού με αποτέλεσμα να αυξάνεται το ποσοστό φωτονίων που αλληλεπιδρούν με το υλικό. Συνέπεια αυτού είναι η αύξηση του αριθμού ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και η αύξηση του φωτορεύματος. Παράλληλα, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων φορτίου και κατά συνέπεια σε εντονότερα φαινόμενα επανασυνδυασμού ηλεκτρονίων – οπών και διάχυσης φορέων φορτίου. Από την αλλαγή στην συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκυκλώματος διαπιστώνεται ότι για χαμηλές εντάσεις ακτινοβολίας, επικρατεί η αύξηση του φωτορεύματος. Αντίθετα σε υψηλότερες εντάσεις, επικρατούν τα φαινόμενα επανασυνδυασμού ηλεκτρονίων – οπών και διάχυσης φορέων φορτίου.

3.2.4 Μέγιστη ισχύς και βαθμός ενεργειακής απόδοσης

Με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας αναμένεται αύξηση της μέγιστης ισχύος η οποία αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συγκεντρωτικού συστήματος είναι δεδομένο ότι είναι αυξημένος σε σχέση με ένα απλό φωτοβολταϊκό σύστημα, εφόσον για ηλιακή ακτινοβολία ίδιας έντασης παράγεται περισσότερη ενέργεια.

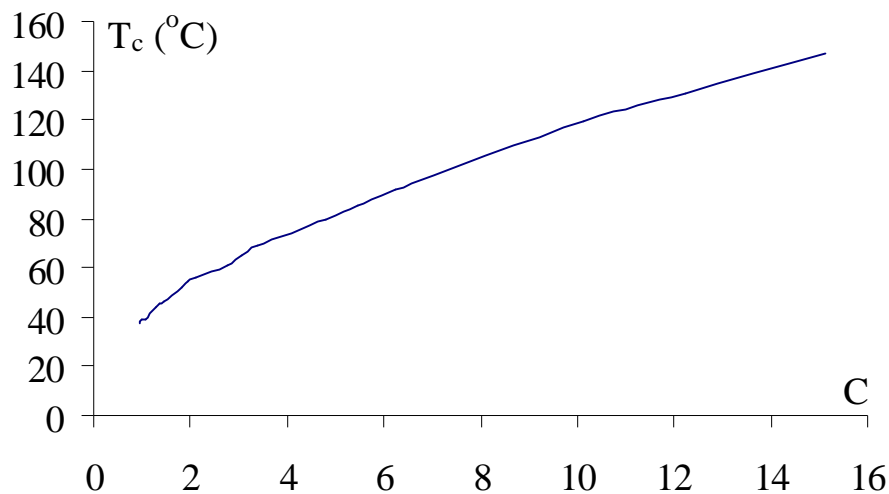
Όταν εξετάζουμε την ενεργειακή συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού μέσα στο συγκεντρωτικό σύστημα, λαμβάνοντας ως ένταση της ακτινοβολίας εκείνη που φτάνει από τον συγκεντρωτικό συλλέκτη (παραβολικό κάτοπτρο, φακός Fresnel κλπ), διαπιστώνουμε ότι πράγματι η μέγιστη ισχύς για δεδομένη ένταση ακτινοβολίας, αυξάνεται. Η μέγιστη τιμή της παρατηρείται σε συγκέντρωση ακτινοβολίας $C=6,25$.

Διαπιστώνεται επίσης ότι υπάρχει μία τιμή της έντασης της ακτινοβολίας πέρα από την οποία η μέγιστη ισχύς ελαττώνεται με την αύξησή της. Όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού παρατηρήθηκε μείωσή του με την αύξηση της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας. Στο Σχ 3.14 παρατηρείται σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ του βαθμού απόδοσης και της έντασης της ακτινοβολίας. Επίσης παρατηρείται αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά την αύξηση της συγκέντρωσης για τιμές αυτής μικρότερες του $C=1$.



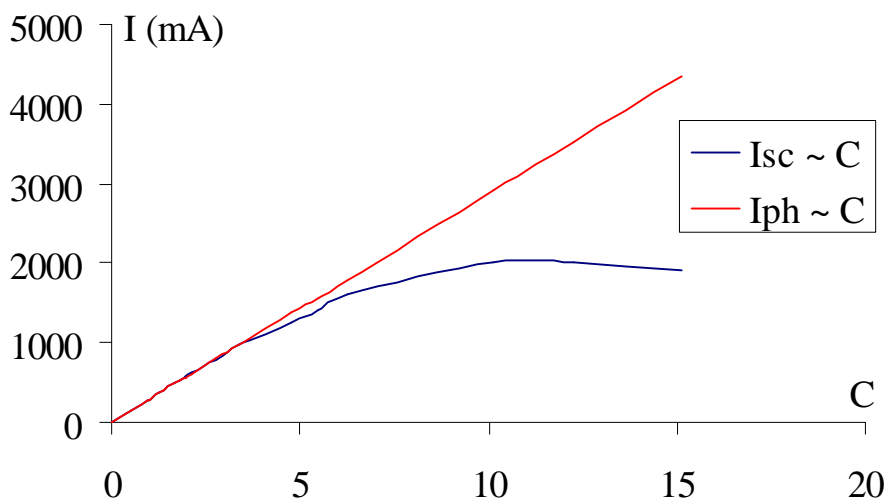
Σχήμα 3.15: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης και μέγιστης ισχύος συναρτήσει της ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία είναι εκπεφρασμένη σε όρους συγκέντρωσης με ακτινοβολία αναφοράς ($C=1$) εκείνη των 70 cm.

Η συμπεριφορά της μέγιστης ισχύος μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πέρα από κάποια τιμή της έντασης της ακτινοβολίας, οι απώλειες στο φωτοβολταϊκό αυξάνονται πάνω από ένα κρίσιμο σημείο σε σχέση με την αύξηση της παραγόμενης ισχύος, παρόλο που το φωτόρευμα συνεχίζει να αυξάνεται, Εξ. 1.2. Αυτό μας οδηγεί σε περαιτέρω διερεύνηση των παραγόντων οι οποίοι προκαλούν τις απώλειες, δηλαδή των αντιστάσεων εν σειρά (r_s) και διαρροής (R_{sh}) που αναφέρονται στο μοντέλο του φωτοβολταϊκού όπως περιγράφεται στην Εξ. 1.14. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αλλοίωση των χαρακτηριστικών του φωτοβολταϊκού και αυξάνει δραματικά με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας, Σχ. 3.15.



Σχήμα 3.16: Διάγραμμα της θερμοκρασίας συναρτήσει της συγκέντρωσης.

Η αύξηση των απωλειών λόγω της θερμοκρασίας επιβεβαιώνεται και πειραματικά. Όπως παρατηρείται στο Σχ. 3.16, η διαφορά ανάμεσα στο φωτόρευμα και το ρεύμα βραχυκυκλώματος αυξάνεται με μη γραμμικό τρόπο συναρτήσει της αύξησης της συγκέντρωσης.



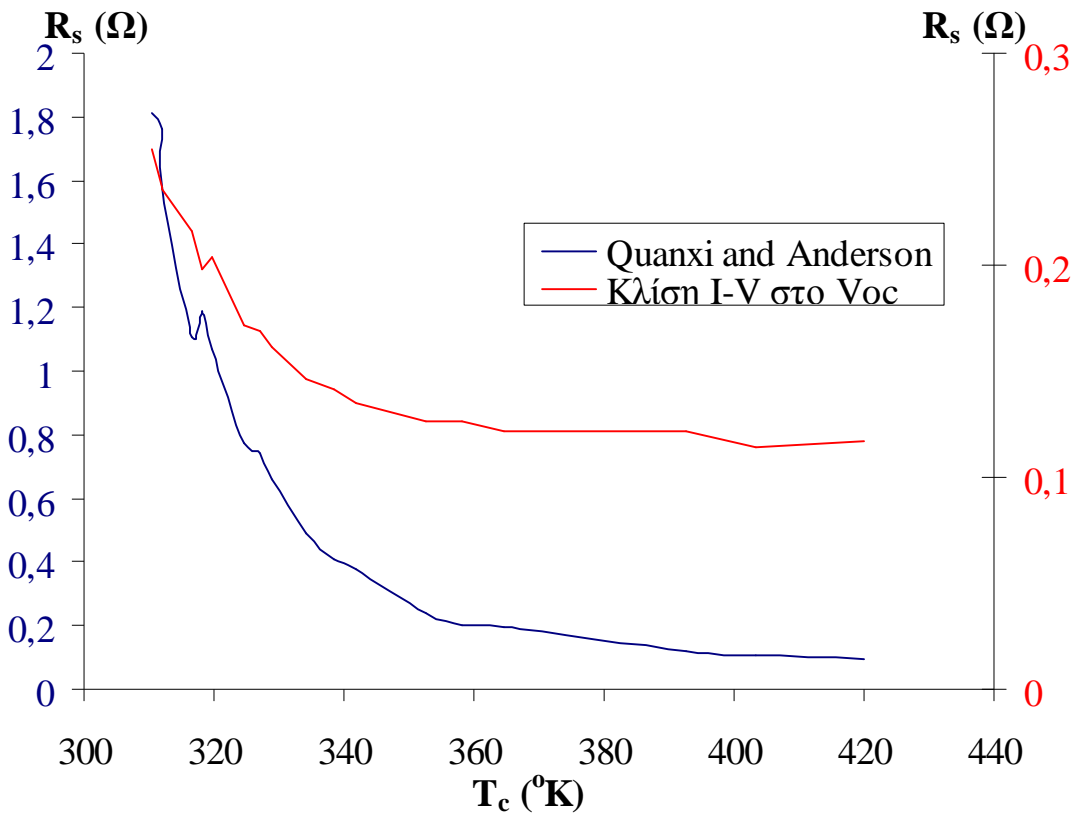
Σχήμα 3.17: Διάγραμμα φωτορεύματος και ρεύματος βραχυκυκλώματος συναρτήσει της συγκέντρωσης

3.2.5 Εξάρτηση αντίστασης εν σειρά, αντίστασης διαρροής και παράγοντα πλήρωσης από την θερμοκρασία

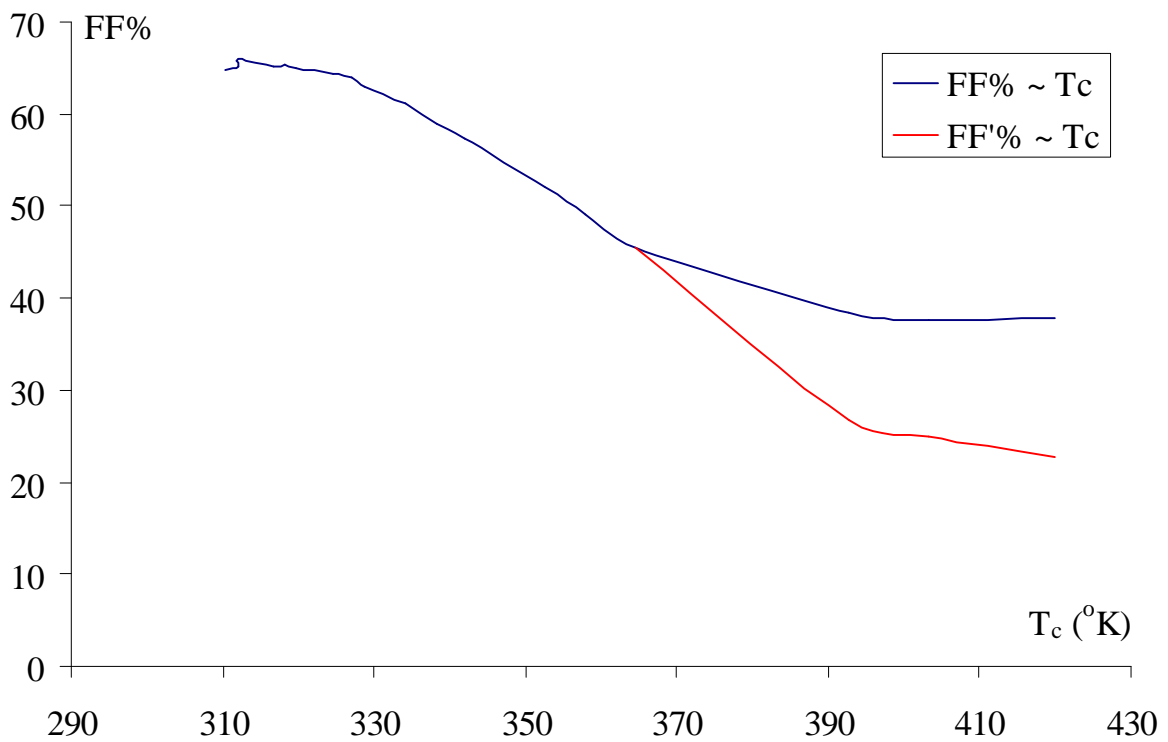
Κατά την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων επιλέξαμε να υπολογίσουμε την αντίσταση εν σειρά με δύο διαφορετικές μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό της κλίσης της χαρακτηριστικής I-V του φωτοβολταϊκού όταν η τιμή της τάσης προσεγγίζει την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Η δεύτερη μέθοδος είναι η μέθοδος Quaxi and Anderson, η οποία προτείνει τον υπολογισμό του r_s από την τάση και το ρεύμα που δίνουν το σημείο μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού, το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοιχτού κυκλώματος και τέλος την θερμοκρασία του. Οι τιμές που υπολογίστηκαν με τις δύο μεθόδους φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 3.59.

Πίνακας 3.59: Τιμές της εν σειρά αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας για τις δύο μεθόδους υπολογισμού		
T_c av (°K)	r_s (Ω) [Quaxi & Anderson]	r_s (Ω) [μέθοδος κλίσης I-V]
310,42	1,811321	0,2545
312,06	1,763205	0,2372
312,11	1,576307	0,2361
316,62	1,10991	0,2156
318,25	1,188743	0,198
319,7	1,071455	0,204
324,69	0,772676	0,172
327,13	0,744644	0,1692
328,86	0,661742	0,161
334,1	0,492471	0,1458
338,38	0,408643	0,1411
341,93	0,37623	0,135
352,52	0,240728	0,1264
358	0,201315	0,1261
364,57	0,194097	0,1215
392,67	0,121936	0,1216
403,39	0,106132	0,1138
420	0,091935	0,1168

Ο υπολογισμός της r_s με τις δύο μεθόδους δεν οδήγησε σε ταύτιση των τιμών της, Πιν. 3.59. Παρόλα αυτά, παρατηρείται ελάττωση της τιμής της εν σειρά αντίστασης και στις δύο μεθόδους, και μάλιστα με παρόμοια μορφή της καμπύλης $R_s \sim T_c$ όπως διαπιστώνεται στο σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.18: Μεταβολή r_s συναρτήσει θερμοκρασίας, όπως προκύπτει από τις δύο μεθόδους υπολογισμού



Σχήμα 3.19: Μεταβολή του παράγοντα πλήρωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας

Ο παράγοντας πλήρωσης συγκρίνει την συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού με εκείνη της ιδανικής πηγής ρεύματος. Είναι λοιπόν αναμενόμενο να μειώνεται η τιμή του όσο αυξάνονται τα μεγέθη των χαρακτηριστικών που προκαλούν απόκλιση από τη λειτουργία της ιδανικής πηγής.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού που εμφανίζεται κατά την αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, παρατηρείται ελάττωση του παράγοντα πλήρωσης του φωτοβολταϊκού, πίν. 3.60. Με δεδομένη την ελάττωση της εν σειρά αντίστασης, όπως υπολογίστηκε προηγουμένως, συμπεραίνουμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού οδηγεί σε ελάττωση της αντίστασης διαρροής του, καθώς και σε αύξηση των ρευμάτων διάχυσης, I_d , και επανασυνδυασμού ηλεκτρονίων - οπών, I_r .

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.19 έχει υπολογιστεί ο συντελεστής πλήρωσης από τα πειραματικά δεδομένα αλλά και μετά από εκτίμηση της πραγματικής τιμής του I_{sc} για μεγάλες εντάσεις ακτινοβολίας, η οποία δεν ήταν δυνατό να καταγραφεί εξαιτίας των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του ηλεκτρονικού φορτίου.

Πίνακας 3.60: Τιμές του παράγοντα πλήρωσης και της θερμοκρασίας για τις εντάσεις ακτινοβολίας του πειράματος

C	Tc av	FF%	C	Tc av	FF%
0,95	310,42	64,8	2,78	334,1	61,1
1,00	312,06	65,2	3,06	338,38	58,99
1,06	312,11	66,05	3,39	341,93	57,35
1,27	316,62	65,08	4,79	352,52	52,12
1,36	318,25	65,32	5,44	358	49,08
1,46	319,7	64,93	6,25	364,57	45,52
1,81	324,69	64,36	10,12	392,67	38,33
1,96	327,13	63,88	12,25	403,39	37,65
2,13	328,86	62,87	15,12	420	37,72

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Καπλάνη Σ. Ν., *Μηχανική Φωτοβολταϊκών Συστημάτων*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 2004.
2. Φραγκιαδάκη Ι. Ε., *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Αθήνα, 2009.
3. Campbell Scientific, Inc. *CR1000 Measurement and Control System Operator's Manual Rev. 10/10*, 2000-2010
4. Incropera, DeWitt, Bergmann, Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th edition, Wiley Publications, New York, 2007
5. Jenny Nelson, *The physics of solar cells – Textbook*, 2nd edition, Imperial College Press, 2003
6. Wehnam S.R., Green M.A., Watt M.E., Corkish R., *Applied Photovoltaics*, 2nd edition, Earthscan Publications, London 2009.
7. Bashahu M. and Habyarimana A., *REVIEW AND TEST OF METHODS FOR DETERMINATION OF THE SOLAR CELL SERIES RESISTANCE*, Renewable Energy, Vol. 6, No2, 129-138, Elsevier Science Ltd
8. King D.L., Kratochvil J.A., Boyson W.E. *Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement, Methods, Difficulties, and Results* Presented at the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29-October 3, 1997, Anaheim, California
9. Priyanka, Mohan Lal, S.N. Singh, *A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells*, Solar Energy Materials & Solar Cells 91, 2007, 137–142, Elsevier B.V.
10. Radziemska E., *Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes*, International Journal of energy research, 2006, 30:127-134, Wiley Publications

11. Radziemska E., *The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells*, Renewable Energy 28, 2003, 1-12, Elsevier Science Ltd
12. Wehnam S.R., Green M.A., *Silicon Solar Cells*, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS, VOL 4, 3-33 (1996)
13. Energy research Centre of the Netherlands (ECN), <http://www.ecn.nl/>
14. Photovoltaic Education Network, <http://www.pveducation.org/>
15. Wikipedia, <http://www.wikipedia.org>