

**ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη συστήματος λήψης και επεξεργασίας μετρήσεων από
εργαστηριακές διατάξεις για χρήση υπολογιστή εφαρμογή
εργαστηριακή διάταξη και μελέτη φωτοβολταϊκών στοιχείων**

Τρουγκάκος Νίκωνας

Εισηγητής: Κατερίνα Ζαχαριάδου, Καθηγήτρια

**ΑΘΗΝΑ
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2015**

(Κενό φύλλο)

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη συστήματος λήψης και επεξεργασίας μετρήσεων από εργαστηριακές διατάξεις για χρήση υπολογιστή εφαρμογή εργαστηριακή διάταξη και μελέτη φωτοβολταϊκών στοιχείων

**Τρουγκάκος Νίκωνας
Α.Μ. 32918**

Εισηγητής:

Κατερίνα Ζαχαριάδου, Καθηγήτρια

(Κενό φύλλο)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την υπεύθυνη καθηγήτρια, Κατερίνα Ζαχαριάδου και τον κ. Κυριάκο Γιασεμίδη για την τεράστια υποστήριξή τους. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου προσέφερε.

(Κενό φύλλο)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία που ολοκληρώθηκε μετά από πολλές προσπάθειες αφορά τον σχεδιασμό και την κατασκευή μίας πειραματικής διάταξης που σκοπός της είναι να βοηθήσει τους φοιτητές του εργαστηρίου φυσικής του ιδρύματος στην κατανόηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

ABSTRACT

The present thesis concerns the design and development of a laboratory device capable of characterizing photovoltaic cells in order to aid the student's comprehension of the material.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: ΦΥΣΙΚΗ

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: φυσική, φωτοβολταϊκά, μετρήσεις, πειραματική διάταξη

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Περίληψη	12
1.2 Ο σκοπός και οι απαιτήσεις της διάταξης	12
1.3 Τεχνικές προκλήσεις	15
1.4 STC.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	18
ΘΕΩΡΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	18
2.1 Εισαγωγή στην Φυσική των Φωτοβολταϊκών	18
2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	23
2.3 Ιστορική αναδρομή	24
2.4 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων	28
2.5 Οι κυρίαρχες τεχνολογίες κατασκευής	31
2.6 Βαθμός Απόδοσης και Παράγοντες Αυξομείωσής του	43
2.7 Τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα φ/β τεχνολογίας	45
2.8 Στοιχεία Ολοκληρωμένης Εγκατάστασης Φωτοβολταϊκών	47
2.9. Οι προοπτικές ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	55
ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ SOLARINSIGHT	55
3.1 Η Αρχιτεκτονική του Συστήματος.....	55
3.2 Μονάδα Αισθητήρων	59
3.3 Μονάδα τροφοδοσίας.....	65
3.4 Μονάδα Επεξεργασίας	69
3.5 Μονάδα Ελέγχου (Arduino).....	77
3.6 Μηχανικό μέρος	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	82
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	82
4.1 Γενική περιγραφή	82
4.2 Arduino Firmware	83

4.3 Η Διεπαφή Χρήστη (User Interface)	90
4.4 Το περιβάλλον ROOT	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	102
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΣΧΟΛΙΑ	102
5.1 Πειραματική Διαδικασία	102
Βιβλιογραφία	106

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1 Τιμή 1 βαρελιού πετρελαίου σε δολάρια από το 1996 μέχρι το 2015.....	13
Εικόνα 2 Δομή και ενεργειακές ζώνες μονωτών (α), ημιαγωγών (β) και μετάλλων (γ).....	19
Εικόνα 3: Κρυσταλλική Δομή ημιαγωγού τύπου P αποτελούμενου από πυρίτιο με προσμίξεις ινδίου.....	21
Εικόνα 4 Κρυσταλλική Δομή ημιαγωγού τύπου N αποτελούμενου από πυρίτιο με προσμίξεις ινδίου.....	21
Εικόνα 5: Δημιουργία επαφής τύπου P-N στο εσωτερικό ημιαγωγού.....	22
Εικόνα 6 Περιοχή απογύμνωσης σε ένωση τύπου P-N.....	23
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.....	24
Εικόνα 8: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στοιχείων για παροχή ενέργειας σε δορυφόρους των Η.Π.Α.....	26
Εικόνα 9: Γράφημα παραγωγής ηλιακής ενέργειας παγκοσμίως 1990-2008.....	28
Εικόνα 10 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα διόδου και χαρακτηριστική καμπύλη (I-V).....	29
Εικόνα 11 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκής κυψέλης.....	30
Εικόνα 12 Χαρακτηριστική Δομή Φωτοβολταϊκού Πλαισίου.....	31
Εικόνα 13 Σύγκριση μονοκρυσταλλικής, πολυκρυσταλλικής και άμορφης δομής πυριτίου.....	32
Εικόνα 14: Κρυσταλλική δομή τελλουριούχου καδμίου.....	33
Εικόνα 15: Δομές ημιαγωγών χαλκού-ινδίου-γαλλίου-δισεληνιδίου σε διάφορες εκδοχές.....	34
Εικόνα 16: Χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες κατασκευής φωτοβολταϊκών κυψελών.....	35
Εικόνα 17: Μεταβολή συντελεστή απορρόφησης (α) σε σχέση με το μήκος κύματος και την ενέργεια φωτονίων ηλιακής ακτινοβολίας ($h\nu$).....	37
Εικόνα 18: Δομή σε επίπεδα φωτοβολταϊκού στοιχείου DSSC.....	38
Εικόνα 19: Λειτουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου DSSC.....	39
Εικόνα 20 Δομή εύκαμπτου φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	41
Εικόνα 21: Δείγμα ευκαμψίας φωτοβολταϊκού στοιχείου έως και 5mm.....	42
Εικόνα 22 Απλή διάταξη για μέτρηση ηλεκτρικής συμπεριφοράς φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	44
Εικόνα 23: Καμπύλη ισχύος φωτοβολταϊκής διάταξης.....	45
Εικόνα 24: Χαρακτηριστική δομή φωτοβολταϊκής διάταξης.....	48
Εικόνα 25 Αντιστροφέας Τάσης (inverter).....	48
Εικόνα 26: Συστοιχίες συσσωρευτών για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε φωτοβολταϊκό πάρκο.....	50
Εικόνα 27 Μεγάλης κλίμακας συστοιχίες συσσωρευτών για μεγάλη παραγωγή ηλιακής ενέργειας.....	51
Εικόνα 28: Κατανομή μεριδίων πηγών ενέργειας 2013.....	52
Εικόνα 29: Εκτιμήσεις Συνολικής Παραγωγής Ηλιακής Ενέργειας Παγκοσμίως.....	54
Εικόνα 30 Η κατασκευή του συστήματος και το απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας ..	55
Εικόνα 31 Τα στάδια κατασκευής των πλακετών: 1. Σχεδίαση Σχηματικού, 2. Σχεδίαση Layout, 3. Εκτύπωση όψεως χαλκού (Bottom Copper), 4. Κατασκευή και Συναρμολόγηση.....	57
Εικόνα 32 Απλουστευμένο διάγραμμα Πλακέτας Αισθητήρων.....	59
Εικόνα 33 Σχεδιάγραμμα της πλακέτας αισθητήρων.....	60
Εικόνα 34 Μπλόκ διάγραμμα λειτουργίας του αισθητήρα θερμοκρασίας.....	61
Εικόνα 35 Το DS18B20 σε συσκευασία TO-92.....	62
Εικόνα 36 Φωτογραφία του αισθητήρα έντασης φωτός TSL230R-LF.....	62
Εικόνα 37 Συχνότητα εξόδου TS230R σε σχέση με την Ένταση Φωτεινής Ακτινοβολίας.....	64
Εικόνα 38 Γενικό Διάγραμμα της Πλακέτας Τροφοδοσίας.....	65

Εικόνα 39 Σχεδιάγραμμα της πλακέτας τροφοδοσίας	66
Εικόνα 40 Τυπικό σχεδιάγραμμα λειτουργίας του LM7805 ως σταθεροποιητή τάσης 5V	67
Εικόνα 41 Το LM317 ως ρυθμιστής ρεύματος.....	68
Εικόνα 42 Κύκλωμα ελέγχου φωτεινής πηγής	69
Εικόνα 43 Γενικό διάγραμμα της πλακέτας επεξεργασίας	69
Εικόνα 44 Σχεδιάγραμμα της πλακέτας επεξεργασίας	71
Εικόνα 45 Μετατροπείας ρεύματος σε τάση με χρήση του ολοκληρωμένου MCP602	72
Εικόνα 46 Σχεδιάγραμμα ενισχυτή τάσης	74
Εικόνα 47 Τοπολογία σύνδεσης του ψηφιακού ποτενσιόμετρου	75
Εικόνα 48 Διάγραμμα λειτουργίας του ψηφιακού ποτενσιόμετρου CAT5113	76
Εικόνα 49: Φωτογραφία του περιβάλλοντος ανάπτυξης Arduino Duemilanove.....	77
Εικόνα 50 Το Σχεδιάγραμμα της Πλακέτας Ελέγχου (J1: καλωδιωταινία σύνδεσης με την πλακέτα επεξεργασίας).....	78
Εικόνα 51 Τρισδιάστατη απεικόνιση του μηχανικού μέρους από το πρόγραμμα σχεδίασης SolidWorks	79
Εικόνα 52 Ο σερβοκινητήρας HXT900.....	80
Εικόνα 53 Επικοινωνία μεταξύ του Λογισμικού	82
Εικόνα 54 Το IDE του Arduino	84
Εικόνα 55 Μήνυμα της formatOutput() όταν ο χρήστης αυξήσει την Φωτεινότητα.....	87
Εικόνα 56 Διάγραμμα ροής του Arduino sketch	89
Εικόνα 57 I/V	91
Εικόνα 58 P/V.....	91
Εικόνα 59 Linear fit I/V.....	92
Εικόνα 60 Linear Fit I/V	92
Εικόνα 61 Polynomial Fit I/V	93
Εικόνα 62 Fit με μοντέλο Φωτοβολταϊκού	94
Εικόνα 63 Fit P/V σε διαφορετική ένταση ακτινοβολίας.....	95
Εικόνα 64 Fit P/V σε διαφορετική γωνία	95
Εικόνα 65 Fit P/V	95
Εικόνα 66 P/V για διαφορετικές γωνίες	96
Εικόνα 67 P/V για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας	97
Εικόνα 68 MPP/Γωνία φωτοβολταϊκού	97
Εικόνα 69 Pmax σε σχέση με την εκπεμπόμενη ακτινοβολία	98
Εικόνα 70 Simulation P/V για διαφορετικές θερμοκρασίες	98
Εικόνα 71 Plot Σημείων	99
Εικόνα 72 Γραμμικό fit σημείων	100
Εικόνα 73 Fit με πολυώνυμο 2ου βαθμού.....	100
Εικόνα 74 Fit με πολυώνυμο 3ου βαθμού.....	100
Εικόνα 75 Fit με εκθετική εξίσωση	101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Συγκριτικός πίνακας τεχνολογίας φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου	34
Πίνακας 2 Ρυθμίσεις ευαισθησίας του αισθητήρα έντασης φωτός	63
Πίνακας 3 Προγραμματισμός ακροδεκτών CAT5113	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τον έλεγχο λειτουργίας μιας πρωτότυπης πειραματικής διάταξης με στόχο κυρίως την εκπαιδευτική της χρήση για τη μελέτη των βασικών μεγεθών φωτοβολταϊκών στοιχείων στα πλαίσια των εργαστηρίων γενικής φυσικής που προσφέρονται στους σπουδαστές της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών (ΣΤΕΦ) του ΤΕΙ Πειραιώς. Η διάταξη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ως πλατφόρμα περαιτέρω ανάπτυξης εκπαιδευτικού υλικού στα πλαίσια πρακτικών/πτυχιακών εργασιών.

Δεδομένου ότι η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ένα ελκυστικό στους σπουδαστές θέμα, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μία αυτοσχέδια μονάδα μικρού μεγέθους, με ορατά τα λειτουργικά της μέρη και ελεγχόμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή για την εξοικείωση των σπουδαστών με τις αρχές λειτουργίας των φωτοβολταϊκών.

1.2 Ο σκοπός και οι απαιτήσεις της διάταξης

Τις τελευταίες δεκαετίες η ολοένα αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας έχει οδηγήσει σε σταδιακή μείωση των αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων (fossil fuels) και παράλληλα σε δραματική αύξηση της τιμής τους.



Εικόνα 1 Τιμή 1 βαρελιού πετρελαίου σε δολάρια από το 1996 μέχρι το 2015

Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκαλεί η χρήση των συμβατικών καυσίμων έχει οδηγήσει στη ραγδαία αύξηση του ενδιαφέροντος της επιστημονικής και τεχνολογικής κοινότητας για επιτάχυνση της ανάπτυξης των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, καύση βιομάζας κλπ.), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με φτηνό κόστος. Σε αυτές τις τεχνολογίες συγκαταλέγεται και η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Εξ' άλλου στον τομέα της εκπαίδευσης, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων ακριβώς λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος που παρουσιάζει μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα ελκυστικό για τους σπουδαστές θέμα προκειμένου την εξοικειώσή τους με βασικές έννοιες της φυσικής επιστήμης και της τεχνολογίας.

Με βάση όσα προαναφέρθηκαν, η παρούσα πτυχιακή εργασία στόχευσε στον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία μιας πρωτότυπης εργαστηριακής διάταξης με σκοπό κυρίως την εξοικείωση των σπουδαστών των τμημάτων της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών (ΣΤΕΦ) του ΑΤΕΙ Πειραιώς με γενικές έννοιες φυσικής, τεχνολογίας και στατιστικής στα πλαίσια του εργαστηρίου γενικής φυσικής του προγράμματος σπουδών τους.

Με δεδομένο ότι τα τελευταία χρόνια έχει πλέον αναδειχθεί η αναγκαιότητα να προσανατολιστεί η εργαστηριακή εκπαίδευση των σπουδαστών των θετικών επιστημών στην επιστημονική διαδικασία (scientific process), το SolarLight σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε η χρήση του να μυήσει κατά το δυνατόν

καλύτερα τους σπουδαστές στον τρόπο σκέψης και στη μεθοδολογία της επιστημονικής διερεύνησης. Συγκεκριμένα, οι σπουδαστές πρέπει μέσω αυτής της εργαστηριακής διάταξης πρώτον να μπορούν να επέμβουν στην πειραματική διαδικασία επιλέγοντας τον τρόπο με τον οποίο θα εκτελέσουν τις πειραματικές τους μετρήσεις και δεύτερον να έχουν τη δυνατότητα να εμπλακούν άμεσα με τη συλλογή, την οργάνωση και κυρίως με την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων στα πλαίσια των βασικών αρχών της επιστημονικής σκέψης. Η τελευταία απαίτηση προϋποθέτει μεταξύ άλλων την εκτενή χρήση και εμβάθυνση στα ακόλουθα:

α) στην αναγκαιότητα των γραφικών παραστάσεων ως εργαλείο εξαγωγής φυσικών συμπερασμάτων κατά την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων (Σύμφωνα με τον Tukey (1977), «Η μεγαλύτερη αξία των γραφημάτων είναι όταν μας αναγκάζουν να προσέξουμε κάτι που δεν αναμέναμε ποτέ να δούμε»)

β) στην στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων

γ) στην τεχνική της προσαρμογής (fitting) ενός θεωρητικού μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα

δ) στην τεχνική της προσομοίωσης (simulation) φυσικών συστημάτων μέσω θεωρητικών μοντέλων

ε) τέλος, στη εξαγωγή συγκεκριμένων φυσικών συμπερασμάτων τα οποία θα πρέπει να συγκριθούν με τη βιβλιογραφία και να σχολιαστούν.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω εκπαιδευτικοί στόχοι στην πράξη, η εργαστηριακή διάταξη θα πρέπει να διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

α) Η κατασκευή της να είναι χαμηλού κόστους, εύκολη σε επιδιορθώσεις και μη εκτεθειμένη σε μεγάλες φθορές χρήσης. Οι απαιτήσεις αυτές επιβάλλονται δεδομένου ότι η πειραματική διάταξη πρόκειται να χρησιμοποιηθεί από μεγάλο αριθμό σπουδαστών και για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το εργαστήριο φυσικής του Γενικού Τμήματος ασκεί ετησίως περίπου 1000 σπουδαστές.

β) Η διεπαφή του χρήστη για τον έλεγχο της διάταξης πρέπει να είναι ελκυστική στους σπουδαστές (εύκολη στη χρήση λειτουργική και ευχάριστη) προκειμένου να προκαλέσει και να κρατήσει αμείωτο το ενδιαφέρον τους.

γ) Η διάταξη πρέπει να έχει τη δυνατότητα της απομόνωσης παραγόντων που μεταβάλλουν το σύστημα προκειμένου οι σπουδαστές να έχουν τη δυνατότητα (στα πλαίσια μιας εργαστηριακής άσκησης) να μελετήσουν επιλεκτικά την εξάρτηση χαρακτηριστικών μεγεθών του φωτοβολταϊκού από κάποια παράμετρο αλλά και να

σχεδιάσουν (στα πλαίσια εκπόνησης μιας πτυχιακής εργασίας) την εξάρτησή τους και από άλλες παραμέτρους.

Στο εμπόριο διατίθεται ένα ευρύ φάσμα εργαστηριακών διατάξεων που αφορούν στη μελέτη φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι διατάξεις αυτές είναι ως επί το πλείστον μηχανικές (δεν εμπλέκουν τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή) αλλά και όσες στηρίζονται στη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για τη συλλογή και την επεξεργασία των μετρήσεων παρέχουν καθορισμένες και περιορισμένες λειτουργίες, όπως για παράδειγμα τη γραφική απεικόνιση των χαρακτηριστικών I-V και P-V υπό διαφορετικές συνθήκες φωτεινότητας.

Η εργαστηριακή άσκηση που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής προκειμένου να ικανοποιεί τους εκπαιδευτικούς στόχους αλλά και τις ιδιαιτερότητες της χρήσης της που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, επιλέχθηκε να είναι πλήρως αυτοματοποιημένη μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή (fully computer based) και να παρέχει επιπλέον λειτουργίες αυτών που παρέχονται από εργαστηριακές διατάξεις του εμπορίου (όπως μελέτη της εξάρτησης του συντελεστή απόδοσης από τη φωτεινότητα και τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός, προσομοιώσεις της απόκρισής του με μεταβολή παραμέτρων όπως η θερμοκρασία). Κυρίως όμως έχει τη ιδιότητα της επεκτασιμότητας προκειμένου να δίδει τη δυνατότητα περαιτέρω ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων (με πρόσθεση νέων καρτελών στην κονσόλα του χρήστη). Για παράδειγμα, μπορεί να προστεθεί μελλοντικά η σύγκριση διαφορετικών μοντέλων προσαρμογής των πειραματικών δεδομένων καθώς και η πρόσθεση περαιτέρω προσομοιώσεων της εξάρτησης της απόκρισης των φωτοβολταϊκών από άλλες παραμέτρους όπως η εν σειρά και η εν παραλλήλω σύνδεση φωτοβολταϊκών κυψελίδων. Επίσης, μπορεί να συμπεριληφθεί η ανάπτυξη στατιστικών εργαλείων (π.χ ιστογράμματα, μέθοδοι ελαχιστοποίησης) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση των σπουδαστών σε θέματα στατιστικής της μετρητικής διαδικασίας).

Η υλοποίησή της εργαστηριακής διάταξης (πλατφόρμα ανάπτυξης, σύστημα ψηφιοποίησης και λήψης δεδομένων, λογισμικό δημιουργίας κονσόλας χρήστη και λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων) στηρίχθηκε σε προγράμματα ανοιχτού λογισμικού (open source, open hardware).

1.3 Τεχνικές προκλήσεις

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος και το κόστος της συσκευής και να διασφαλιστεί η ασφάλεια των χρηστών ήταν απαραίτητες κάποιες υποχωρήσεις στην προσομοίωση του φυσικού συστήματος στο οποίο αναμένεται να λειτουργούν

τα φωτοβολταϊκά στοιχεία υπό δοκιμή, χωρίς όμως να επηρεάζεται όμως η ακρίβεια και ορθότητα των μετρήσεων.

1.4 STC

Οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούν κάποια στάνταρ μετρήσεων που ονομάζονται standard test conditions όταν αξιολογούν τα προϊόντα τους. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων τα φωτοβολταϊκά υποβάλλονται σε τεχνητό φως έντασης 1000 W ανά τετραγωνικό μέτρο. Στην πραγματικότητα τέτοια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί μόνο να πραγματοποιηθεί κατά την ηλιακή μεσημβρία, με το φωτοβολταϊκό στραμμένο κάθετα στον ήλιο, ύστερα από βροχή που θα καθαρίσει την ατμόσφαιρα από την σκόνη. Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στους 25 °C και η ατμοσφαιρική πυκνότητα στα 1.5 kg/m³. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού στις STC συνθήκες είναι που δίνει στο φωτοβολταϊκό την κατάταξή του.

Ενώ οι συνθήκες STC λειτουργούν σαν ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς για την κατάταξη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού σπάνια τις πλησιάζουν. Το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο εγκαθίστανται, η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία και άλλοι παράγοντες από περιοχή σε περιοχή και από ώρα σε ώρα. Αυτό βέβαια δεν επηρεάζει της αρχές λειτουργίας των ίδιων των στοιχείων και μας επιτρέπει για πρακτικούς λόγους να αποκλίνουμε από αυτές τις συνθήκες στην κατασκευή που περιγράφεται αργότερα στο κείμενο.

Ιδανικές πηγές για την παροχή τεχνητής φωτεινής ακτινοβολίας για την προσομοίωση αποτελούν οι λάμπες τύπου xenon arc, ένα είδος ηλεκτρικού λαμπτήρα που παράγει φως περνώντας ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από ιονισμένο αέριο Ξένο που βρίσκεται κάτω από υψηλή πίεση. Παράγουν έντονο λευκό φως που μιμείται την ηλιακή ακτινοβολία. Για να ξεκινήσει η ακτινοβολία χρειάζεται ένας ηλεκτρικός παλμός αρκετών kV ενώ η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται συχνά απαιτεί υδρόψυξη για συνεχόμενη λειτουργία. Λόγο της πίεσης που βρίσκεται το αέριο, σε περίπτωση που σπάσουν υπάρχει κίνδυνος εκτόξευσης κομματιών γυαλιού με μεγάλη ταχύτητα που είναι και ο λόγος που κάποιες φορές απαιτείται προστατευτική ενδυμασία για τον χειρισμό τους.

Για λόγους ασφάλειας, κόστους και διαθεσιμότητας ανταλλακτικών, στην κατασκευή η πηγή φωτός που χρησιμοποιήθηκε είναι 2 λευκά power leds ισχύος 3W το καθένα τα οποία τροφοδοτούνται από μία πηγή σταθερού ρεύματος. Αν και αρχικά είχε προταθεί ο έλεγχος της θερμοκρασίας της συσκευής μέσω ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου peltier, τελικώς εγκαταλείφθηκε και η επίδραση της θερμοκρασίας στο

φωτοβολταϊκό στοιχείο μελετάται με προσομοίωση μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου. Η γωνία του φωτοβολταϊκού σε σχέση με την φωτεινή πηγή μπορεί να ελεγχθεί μέσω ενός σερβοκινητήρα ενωμένου κάθετα στον άξονα περιστροφής του φωτοβολταϊκού. Τέλος δεν υπάρχει πρόβλεψη για τον έλεγχο της πυκνότητας του αέρα, που μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με την θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

2.1 Εισαγωγή στην Φυσική των Φωτοβολταϊκών

2.1.1 Δομές Υλικών και δημιουργία ρεύματος σε αυτά

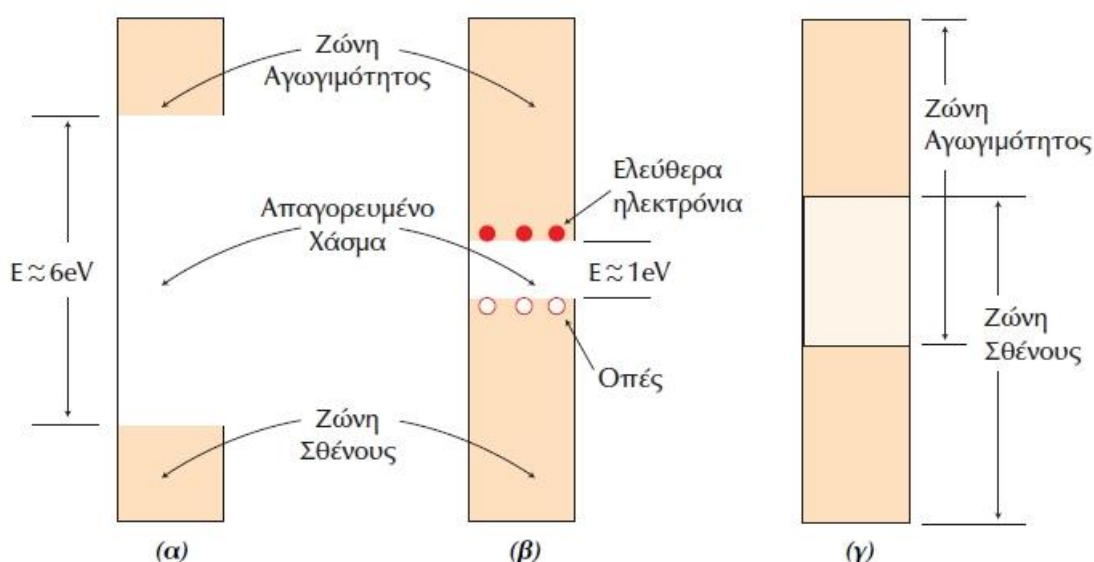
Από ηλεκτρική άποψη όλα τα γνωστά στοιχεία χωρίζονται σε αγωγούς, μονωτές και ημιαγωγούς ανάλογα με την ειδική τους αγωγιμότητα. **Αγωγοί** ονομάζονται τα υλικά που αντιδρούν στα ηλεκτρικά πεδία και επιτρέπουν την ροή φορτίων. Αντίθετα οι **μονωτές** αντιστέκονται στην ροή φορτίων και δεν αντιδρούν στα ηλεκτρικά πεδία. Κανένας μονωτής δεν είναι τέλειος, γιατί σε κάθε υλικό όταν η εφαρμοζόμενη τάση φτάσει μία ορισμένη τιμή που ονομάζεται τάση διάσπασης, παρατηρείται κατάρρευση της αντίστασης και ραγδαία αύξηση του ρεύματος. **Ημιαγωγοί** είναι τα υλικά που μπορούν να επιτρέψουν ή να εμποδίσουν την ροή φορτίων ανάλογα με την ενεργειακή κατάσταση στην οποία βρίσκονται. Ο πιο γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο, το πρώτο στοιχείο που βρήκε εφαρμογή στην τεχνολογία ημιαγωγών.

Το καθαρό πυρίτιο βρίσκεται σε κρυσταλλική μορφή και επιτρέπει την ομοιόμορφη ροή ηλεκτρικού ρεύματος αλλά έχει πολύ χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα για να θεωρείται αγωγός ($10^2 \Omega/m$). Στην φυσική του κατάσταση κάθε άτομο του συνδέεται με ομοιοπολικούς δεσμούς με τέσσερα γειτονικά του μέσω των τεσσάρων ηλεκτρονίων εξωτερικής στοιβάδας (σθένους) που διαθέτει, σχηματίζοντας μία διάταξη με χημική σταθερότητα και ηλεκτρική ουδετερότητα. Ως στοιβάδα ή **ζώνη σθένους** ορίζεται η περιοχή στην οποία βρίσκονται σε τροχιά τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μακρύτερα από τον πυρήνα του ατόμου. Κανένα από αυτά τα ζεύγη ηλεκτρονίων δεν βρίσκεται στην ζώνη αγωγιμότητας όσο αυτά είναι συνδεδεμένα ομοιόμορφα. Με την αύξηση της θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνεται και η ταλάντωση των ατόμων γύρω από τις θέσεις τους, σπάζοντας κάποιους από αυτούς τους δεσμούς, δημιουργώντας ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο που κινείται μέσα στο υλικό και αφήνοντας μία **οπή** στην θέση του. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα που έχει ως συνιστώσες τις κινήσεις των ηλεκτρονίων και των ισάριθμων οπών που κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση.

Για να βελτιωθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα του καθαρού κρυστάλλου εισάγονται προσμίξεις όπως ο φώσφορος και το βόριο με μία διαδικασία που ονομάζεται **εμπλουτισμός** και αυξάνει δραματικά την αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Ο φώσφορος διαθέτει πέντε ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους με αποτέλεσμα όταν συνδέεται με τα τέσσερα γειτονικά του άτομα πυριτίου να περισσεύει ένα ηλεκτρόνιο που κινείται ελεύθερα. Αντίστοιχα το βόριο έχει μόνο τρία ηλεκτρόνια στην στοιβάδα

σθένους, και όταν εισάγεται σαν πρόσμιξη στο πυρίτιο δημιουργείται μία οπή (έλλειμμα) ανάμεσα στους συνδέσμους των ατόμων, αφήνοντας ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού ατόμου αδέσμευτο. Αυτή η οπή μπορεί να κινείται σαν ένα εικονικό σωματίδιο ελεύθερα μέσα στο υλικό μέχρι να βρεθεί ένα άλλο αδέσμευτο ηλεκτρόνιο για να σχηματίσει δεσμό. Στην πρώτη περίπτωση όπου υπάρχει πλεόνασμα ηλεκτρονίων ο ημιαγωγός που προκύπτει καλείται τύπου N ενώ στην δεύτερη που υπάρχει πλεόνασμα οπών ο ημιαγωγός καλείται τύπου P. Αν και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές μπορούν να κινούνται μέσα στο υλικό, το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο του υλικού είναι μηδέν και επομένως ο κρύσταλλος είναι ηλεκτρικά ουδέτερος. Αυτή η άτακτη μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών δεν ισοδυναμεί με ηλεκτρικό ρεύμα γιατί δεν γίνεται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να βρίσκονται σε οποιαδήποτε απόσταση από τον πυρήνα. Ακολουθούν τροχιές σε συγκεκριμένες ζώνες που χαρακτηρίζονται από μία μοναδική ομάδα τιμών των κβαντικών αριθμών:



Εικόνα 2 Δομή και ενεργειακές ζώνες μονωτών (α), ημιαγωγών (β) και μετάλλων (γ)

Κύριος κβαντικός αριθμός n , ο αριθμός αυτός εξαρτάται μόνο από την απόσταση του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα του ατόμου και αντιστοιχεί στην ενέργεια του ηλεκτρονίου. Η μέση απόσταση αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του n και σχηματίζει διαφορετικούς φλοιούς γύρω από τον πυρήνα. Ο μέγιστος αριθμός ηλεκτρονίων σε κάθε φλοιό δίνεται από τον τύπο $2n^2$.

Αξιμουθιακός ή Τροχιακός κβαντικός αριθμός l ($l = 0, 1, \dots, n-1$), δίνει την τροχιακή στροφορμή του ηλεκτρονίου και περιγράφει το σχήμα των ατομικών τροχιακών.

Μαγνητικός κβαντικός αριθμός m_l ($m_l = -l, -l+1, \dots, l-1, l$), δίνει την τιμή της προβολής της τροχιακής στροφορμής σε ένα συγκεκριμένο άξονα.

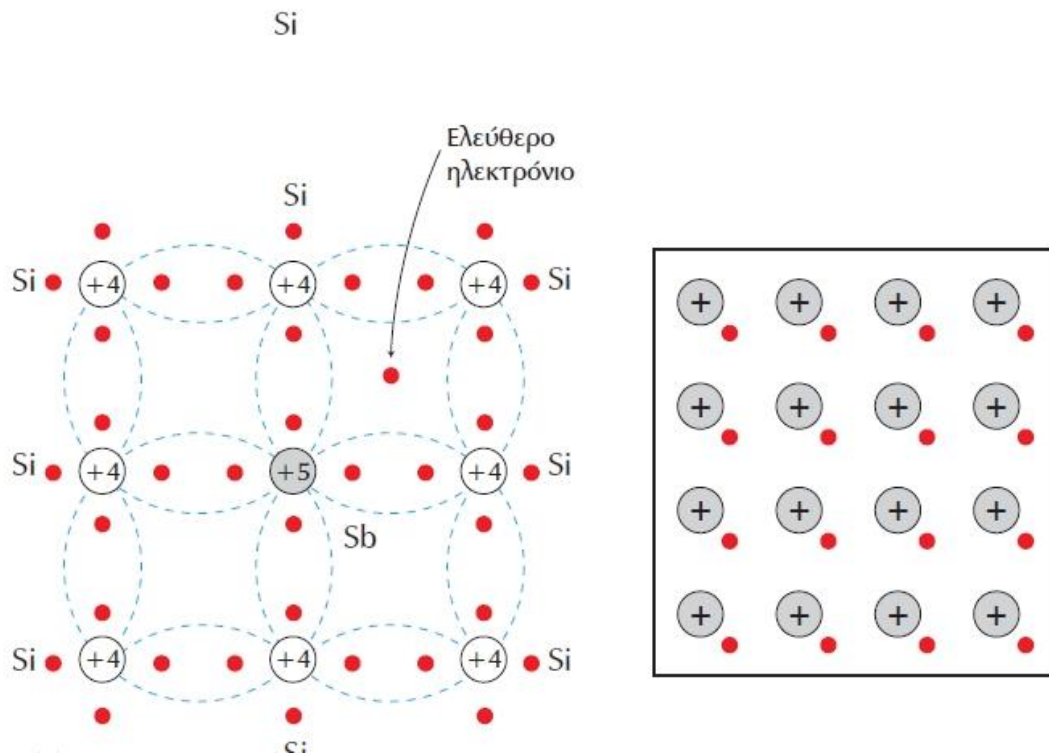
Κβαντικός αριθμός σπίν s (ιδιοστροφορμή), δίνει σε ποια από τις δύο δυνατές κατευθύνσεις περιστρέφεται το ηλεκτρόνιο όταν βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Πάουλι είναι αδύνατον να υπάρξουν στο ίδιο άτομο ή σύμπλεγμα ατόμων (πχ σε μεταλλικό πλέγμα) πάνω από δύο ηλεκτρόνια στην ίδια κβαντική κατάσταση, και όταν υπάρχουν θα έχουν αντίθετο σπίν.

Όταν υπάρξει ένα κενό σε τροχιά χαμηλής ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο θα την καλύψει αφήνοντας την υψηλότερη τροχιά που είχε πρωτύτερα λόγω της ηλεκτροστατικής δύναμης και σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Πάουλι.

2.1.2 Τύποι Ημιαγωγών

Όπως περιγράφηκε και παραπάνω σε όλους τους ημιαγωγούς υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές σε όλη την έκταση του υλικού τα οποία είναι στις ίδιες αναλογίες, διατηρώντας την ενεργειακή ευστάθεια και σταθερότητα του ημιαγωγού. Με τον εμπλουτισμό του όμως, δηλαδή με την προσθήκη στοιχείων με συγκεκριμένες ατομικές ιδιότητες δημιουργούνται οι προσμίξεις.

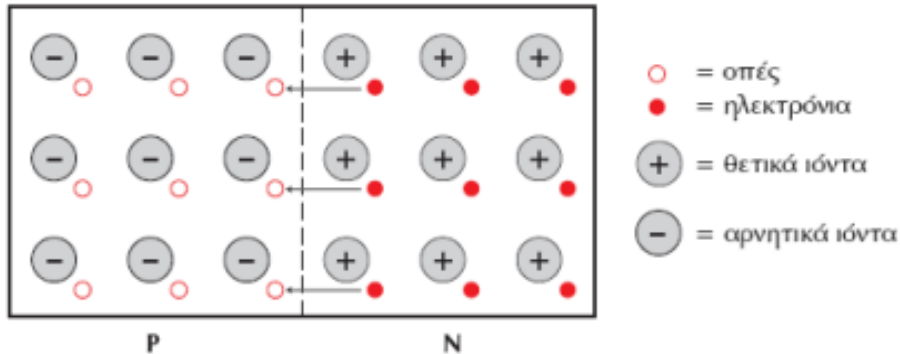
Στην περίπτωση που η πρόσμιξη αποτελείται από στοιχείο τριών ηλεκτρονίων στην εξωτερική του στοιβάδα, τότε οι οπές γίνονται περισσότερες σε πληθυσμό απ' ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στην περιοχή αυτή. Η κατάσταση αυτή δημιουργεί τον ημιαγωγό τύπου P. Για την δημιουργία τέτοιου τύπου ημιαγωγών συνήθως χρησιμοποιείται ως βάση το πυρίτιο και προσμίξεις στοιχείων, όπως το γάλλιο και το ίνδιο, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην τεχνολογία των υλικών και της μικροηλεκτρονικής.



Εικόνα 4 Κρυσταλλική Δομή ημιαγωγού τύπου N αποτελούμενου από πυρίτιο με προσμίξεις ινδίου

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή με πρόσμιξη άλλου στοιχείου στο πυρίτιο μπορούμε να πετύχουμε την δημιουργία του ημιαγωγού τύπου N. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να χρησιμοποιηθούν στοιχεία για πρόσμιξη, τα οποία διαθέτουν αυτή τη φορά πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα. Με τον τρόπο αυτό, ο ημιαγωγός θα αποκτήσει πληθώρα ελεύθερων ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του περισσότερα από τις οπές, που βρίσκονται σε αυτό. Έτσι, έχει κατασκευαστεί ο ημιαγωγός τύπου N. Υλικά που χρησιμοποιούνται για προσμίξεις σε τέτοιου είδους ημιαγωγούς είναι το αρσενικό, το αντιμόνιο και ο φώσφορος, με τα δύο τελευταία να χρησιμοποιούνται συχνότατα.

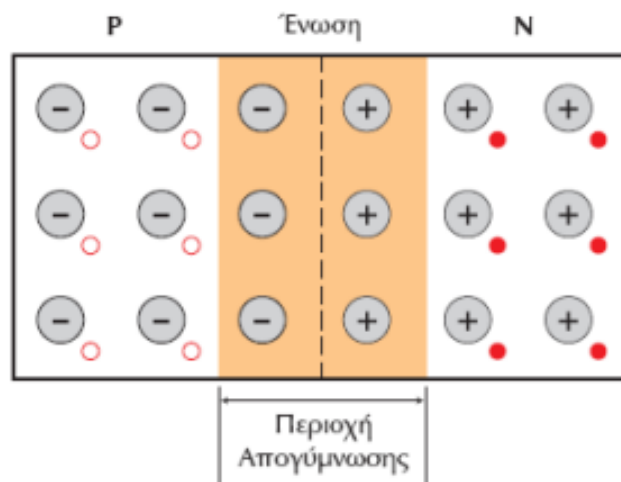
2.1.3 Δημιουργία επαφών P-N στο εσωτερικό Ημιαγωγών



Εικόνα 5: Δημιουργία επαφής τύπου P-N στο εσωτερικό ημιαγωγού

Όπως περιεγράφηκε και στα προηγούμενα υποκεφάλαια υπάρχουν οι τμήματα ημιαγωγού τύπου P έρθουν σε επαφή με τμήματα τύπου N. Το πρώτο κομμάτι λοιπόν διαθέτει όπως περιεγράφηκε πληθώρα οπών, ενώ στο δεύτερο πληθώρα ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η τάση, λοιπόν, που υπάρχει είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν και να ενωθούν με ομοιοπολικούς δεσμούς με τις οπές, που βρίσκονται στην γειτονική περιοχή της ένωσης. Με τον τρόπο αυτό εξισορροπείται σε μία πολύ μικρή περιοχή στο κέντρο των δύο τμημάτων των ημιαγωγών, που θεωρείται ηλεκτρικά απογυμνωμένη, γι' αυτόν τον λόγο και καλείται περιοχή απογύμνωσης της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν πλέον στην μία πλευρά μόνο θετικά ιόντα στην περιοχή τύπου P και αρνητικά ιόντα στην περιοχή τύπου N.

Τέλος, η ύπαρξη των θετικών από την μία πλευρά και των αρνητικών από την άλλη πλευρά ιόντων, δημιουργεί ένα προστατευτικό πλαίσιο ορισμένου δυναμικού, το οποίο δεν μπορεί να διαπεραστεί από τα ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια, χωρίς να τους εφαρμοστεί εξωτερική δύναμη για κίνηση ή εξωτερική ενέργεια, συνήθως υπό την μορφή τάσης ή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.



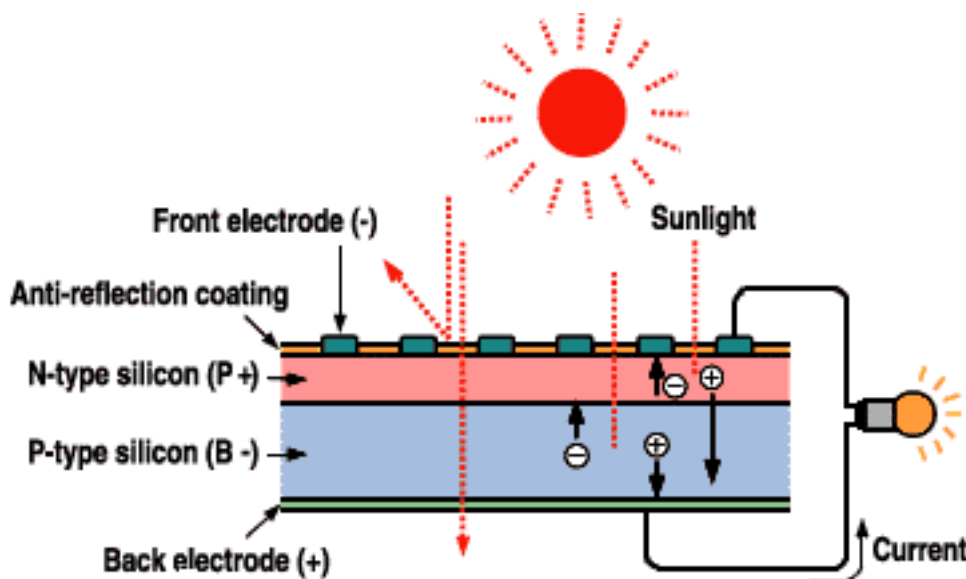
Εικόνα 6 Περιοχή απογύμνωσης σε ένωση τύπου P-N

2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Όπως περιγράφηκε και παραπάνω υπάρχει ένα συγκεκριμένο πλήθος και συγκέντρωση ελευθέρων ηλεκτρονίων και οπών σε κάποιο υλικό. Όσον αφορά τώρα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, όταν οι φορείς αυτοί εντός του υλικού βρεθούν υπό την επίδραση ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση οπών προς την περιοχή τύπου p, ενώ τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αντιθέτως προς την περιοχή τύπου n. Αυτό όπως άλλωστε συμβαίνει σε πολλά στοιχεία στην φύση, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μίας διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες αυτούς.

Το ηλεκτροστατικό πεδίο, που περιγράφηκε προηγουμένως προκύπτει από την ύπαρξη του ηλιακού φωτός και την πρόσπτωση των φωτονίων στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Οπότε το πεδίο αυτό θεωρείται σχεδόν συνεχές, εφόσον είναι και συνεχής η πρόσπτωση φωτονίων, δηλαδή με την ύπαρξη συνεχούς ηλιοφάνειας.

Η διαφορά δυναμικού αυτή λοιπόν, που έχει εμφανιστεί και που αντικατοπτρίζει την ορθή πόλωση της διόδου με τους δύο ακροδέκτες διαφορετικού τύπου (p και n) ορίζει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο με βάση το οποίο λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση του φωτοβολταϊκού φαινομένου

2.3 Ιστορική αναδρομή

Ας αναλύσουμε σε αυτό το σημείο την απαρχή των φωτοβολταϊκών στοιχείων και γενικότερα όλης της τεχνολογίας, που ξεκίνησε να αναπτύσσεται πριν από αρκετά χρόνια και τον τρόπο με τον οποίο έφθασε να βρίσκεται στα σημερινά επίπεδα.

Από την ετυμολογία της λέξης αρχικά μπορούμε να την αναλύσουμε στα δύο συνθετικά της, τον όρο «φως» και τον όρο «βόλτα», ο οποίος προέρχεται από τον μεγάλο φυσικό Alessandro Volta, που πριν από πολλά χρόνια ασχολήθηκε με την θεωρία του ηλεκτρισμού, των παραμέτρων, που τον επηρεάζουν και τα αποτελέσματα που μπορεί να επιφέρει στους ανθρώπους. Τα φωτοβολταϊκά λοιπόν αποτελούν στοιχεία, τα οποία εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ακριβέστερα αναφερόμαστε στην διάταξη που συμπεριλαμβάνει στοιχεία τα οποία με την εκμετάλλευση φυσικών φαινομένων, τα οποία έχουν ήδη ερευνηθεί θα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, όταν δεχθούν ηλιακή ακτινοβολία.

Αρχή των φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να αναγνωρισθεί το έτος 1839, όταν και ο φυσικός Edmond Becquerel ξεκίνησε την έρευνά του για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, όπως έχει καταλήξει να ονομάζεται η όλη διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πρώτο του πείραμα περιλάμβανε μία διάταξη, η οποία αποτελούνταν από λευκόχρυσο βυθισμένο σε απλό

ηλεκτρολύτη, η οποία υπό την παρουσία ηλιακού φωτός εμφάνιζε ηλεκτρικό ρεύμα υπό σχεδόν σταθερή τάση.

Η αρχή αυτή συνεχίστηκε να ερευνάται για αρκετά χρόνια και να γίνονται διάφορα πειράματα με την χρήση ηλεκτρολυτών και άλλων χημικών στοιχείων σε υγρή μορφή. Το 1877 δύο μέλη του Πανεπιστημίου του Cambridge ερευνώντας διάφορα υλικά και τις ιδιότητές τους εργαστηριακά προχωρούν σε μία μεγάλη ανακάλυψη σχετικά με το χημικό στοιχείο σελήνιο. Το σελήνιο λοιπόν, όπως διατύπωσαν οι επιστήμονες Day και Adams είναι σε θέση να μεταβάλλει τις ηλεκτρικές του ιδιότητες υπό την παρουσία φωτονίων, που προσπίπτουν στην επιφάνειά του. Τα πειράματά τους στέφθηκαν με απόλυτη επιτυχία, ωστόσο παρέμεναν εργαστηριακά υπό προστατευτικές συνθήκες για το υλικό.

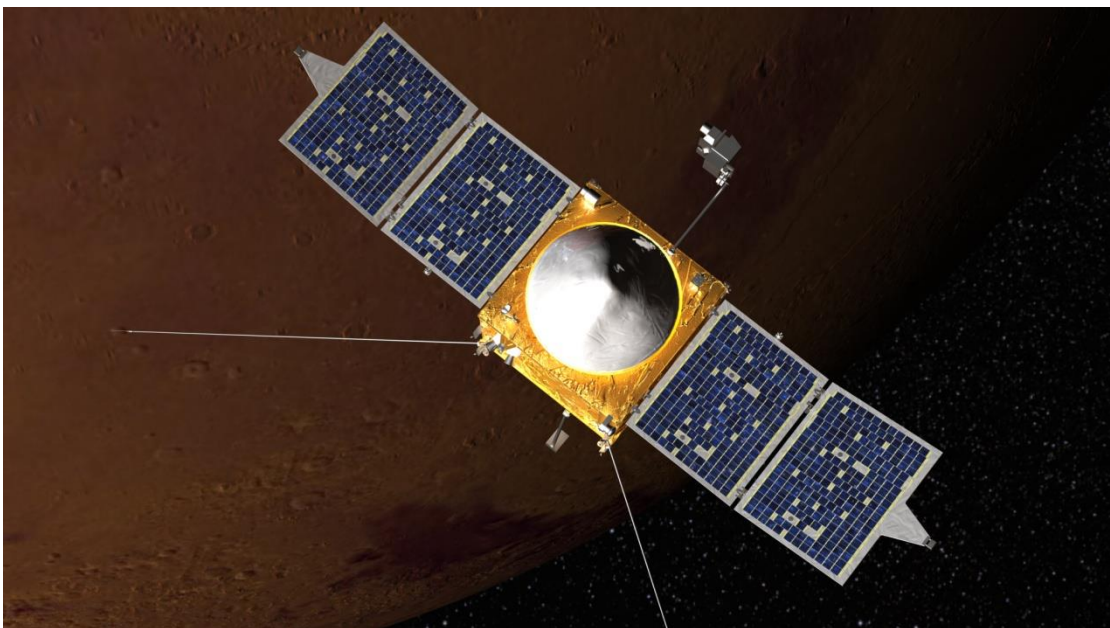
Το μεγάλο βήμα έγινε από έναν άλλο φυσικό, τον Charles Fritz, ο οποίος μετά από περίπου 50 χρόνια αποφεύγοντας την χρήση του συνηθισμένου ηλεκτρολύτη παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, το οποίο περιέχει κρύσταλλο από σελήνιο, ένα υλικό, το οποίο δεν ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένο εκείνη την εποχή. Το ενθαρρυντικό είναι ότι ήταν σε θέση να μετρήσουν την παραγωγή ενέργειας, όχι φυσικά και με μεγάλη ακρίβεια και σωστές μεθόδους, αλλά μπόρεσαν να υπολογίσουν ότι η απόδοση αυτού του στοιχείου ήταν περί το 1%, ιδιαίτερα ενθαρρυντικό αποτέλεσμα αν αναλογιστούμε τα επίπεδα έρευνας και την διαθεσιμότητα υλικών.

Ωστόσο, το βασικό πρόβλημα είναι ότι κανένας από τους προαναφερθέντες δεν είχε ασχοληθεί με την φυσική θεωρία και την ερμηνεία του φαινομένου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία. Για τον λόγο αυτό και οι μέχρι τότε κατασκευασμένες διατάξεις παρέμεναν αρκετά άμορφες και χωρίς ιδιαίτερα καλή απόδοση. Εκείνος, που έδωσε την λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι ο πασίγνωστος Albert Einstein με μία από τις πρώτες ανακαλύψεις και διατυπώσεις θεωριών του, ο οποίος μελετώντας το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο το 1904 δίνει την ώθηση, που χρειαζόταν η τεχνολογία για να κάνει τεράστια βήματα προόδου. Ο Einstein για αυτή του την ανακάλυψη ως γνωστόν τιμήθηκε και με το βραβείο Nobel αρκετά χρόνια αργότερα όταν και αναγνωρίστηκε η αξία της θεωρίας του.

Ωστόσο και πάλι παρέμενε ένα άλλο πρόβλημα, που σχετιζόταν με τα χρησιμοποιούμενα υλικά για κατασκευή τόσο μερών των φωτοβολταϊκών διατάξεων, όσο και για το καθ' αυτού φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η θεωρία ημιαγωγών, που αναπτύχθηκε το 1930 από τον Schottky και η κατασκευή των πρώτων ημιαγωγών πυριτίου από αυτόν λίγα χρόνια αργότερα έδωσε λύσεις και σε αυτόν τον τομέα. Το αποτέλεσμα ήρθε το 1953, όταν οι Fuller, Chapin και Pearson κατασκεύασαν το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου με απόδοση που ξεπερνούσε κατά πολύ την υπάρχουσα.

Στο σημείο αυτό, κλείνει και ο πρώτος κύκλος ανακαλύψεων σχετικά με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και όσα σχετίζονται με αυτό, γεγονός, που ορίζει και το κλείσιμο της πρώτης γενιάς φωτοβολταϊκών. Τα πρώτα έργα δεν φάνηκαν να έρθουν, με πρώτο εκείνο, που κατασκευάστηκε το 1958 στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, όπου χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά φωτοβολταϊκά πλαίσια σε τεχνητό δορυφόρο, που κατασκευάστηκε για ερευνητικούς σκοπούς. Η απόδοση των πλαισίων αυτών ήταν στο 9% και η διάρκεια ζωής τους ήταν στα 6 χρόνια. Ο σκοπός της χρήσης και εγκατάστασής τους στον δορυφόρο ήταν η τροφοδοσία με ηλεκτρική ενέργεια του πομπού και του δέκτη των διατάξεων επικοινωνίας με την γη.

Η πρώτη αυτή απόπειρα στέφθηκε με απόλυτη επιτυχία και σε συνέχεια αυτής οι Η.Π.Α. εκτοξεύουν τους τεχνητούς δορυφόρους Explorer 4 και Explorer 5 το 1959, οι οποίοι χρησιμοποιούν 9600 φωτοβολταϊκά στοιχεία απόδοσης περί το 10% και αποτελούν την κύρια πηγή τροφοδοσίας των σταθμών με ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 8: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στοιχείων για παροχή ενέργειας σε δορυφόρους των Η.Π.Α.

Την δεκαετία που ακολουθεί η Ιαπωνία εκμεταλλεύεται μελέτες και έρευνες που διεξάγονται σε φωτοβολταϊκά στοιχεία και εγκαθιστά πλαίσια απόδοσης 14% σε φάρους και άλλες απομονωμένες περιοχές, που έως τότε δεν διέθεταν παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος αυτού του εγχειρήματος ήταν τεράστιο βέβαια και αποτελούσε το μεγαλύτερο έργο της έως τότε εποχής.

Το άμορφο πυρίτιο ήταν το επόμενο στάδιο ερευνών κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το 1976, οι Calson και Wronski, προχωρούν στην κατασκευή στοιχείου

από άμορφο πυρίτιο το οποίο ωστόσο κρίνεται εντελώς ανεπιτυχές, λόγω της μηδαμινής του απόδοσης. Το έτος αυτό ξεκινά και η συστηματοποιημένη κατασκευή σε βιομηχανίες φωτοβολταϊκών στοιχείων για την ευρεία χρήση τους τόσο σε κρατικό επίπεδο όσο και σε επιχειρηματικό. Πολλές διατάξεις πλέον τροφοδοτούνται αμιγώς από φωτοβολταϊκά πλαίσια, η διάρκεια ζωής των οποίων ξεπερνά τα 15 χρόνια και θεωρούνται πολύ αξιόπιστα.

Το 1977 ο Kameth είναι εκείνος, που κάνει την πρώτη απόπειρα χρήσης ενός άλλου υλικού για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το υλικό αυτό είναι το γάλλιο, το οποίο χρησιμοποιείται με προσμίξεις άλλων υλικών, που ερευνάται η απόδοσή τους στην συνολική διάταξη. Η διάταξη αυτή είχε απόδοση κοντά στο 16%, αλλά εμφάνισε αρκετές δυσκολίες κατασκευής. Ωστόσο, η τεχνολογία κατασκευής στοιχείων και κυψελών από πυρίτιο έχει φθάσει σε πολύ ανώτερα επίπεδα και έτσι η νέα τεχνολογία παραμένει ανεκμετάλλευτη και ανεξερεύνητη.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα αυτά τα χρόνια είναι το αρκετά μεγάλο κόστος κατασκευής και η δυσκολία εύρεσης και επεξεργασίας των απαραίτητων υλικών. Ωστόσο, αυτό δεν στέκεται εμπόδιο στην συστηματοποιημένη χρήση ηλιακών κυψελών σε διάφορα έργα, φθάνοντας στο 1983, οπότε και κατασκευάζεται το πρώτο ηλιακό πάρκο στην περιοχή Victroville της California. Ακολούθως, το 1984 αναπτύσσεται περαιτέρω η τεχνολογία άμορφου πυριτίου και κατασκευάζονται πλαίσια τα οποία κυκλοφορούν στην αγορά ευρέως.

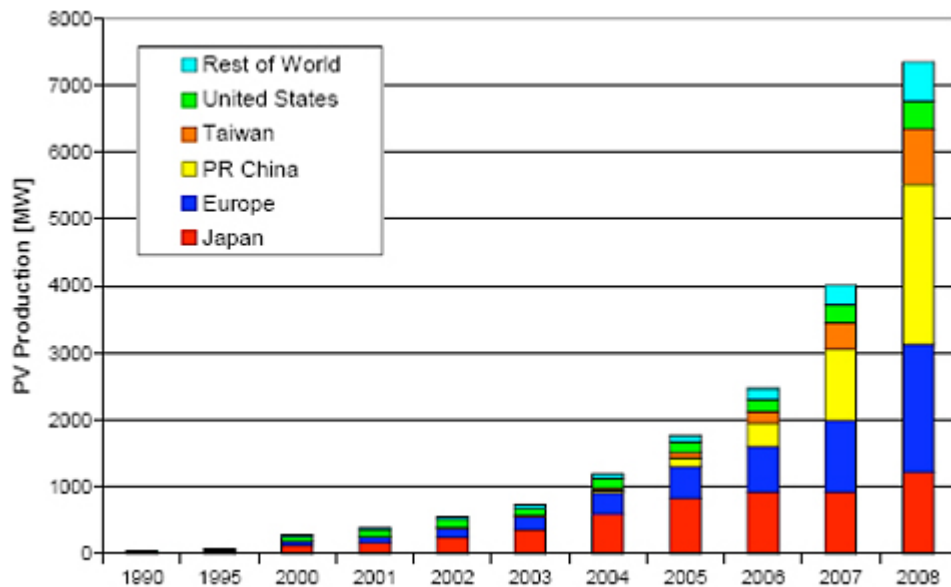
Φθάνοντας στην αλλαγή της χιλιετίας, ο τομέας της ηλιακής ενέργειας έχει κάνει πολλά βήματα μπροστά προσφέροντας περί τα 1000 MW ετησίων στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Η απόδοση των κυψελών προσεγγίζει το 19% και έτσι την επόμενη δεκαετία η τιμή της παραγόμενης ενέργειας τείνει να προσεγγίσει το 1 GW ετησίως.

Τα εμπορικά ηλιακά στοιχεία κατασκευάζονται, με διάφορες τεχνολογίες, όπως αυτή του πυριτίου (μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό) αλλά και του λεπτού φιλμ (άμορφο). Επίσης χρησιμοποιούνται άλλα φωτοευαίσθητα υλικά, όπως δισηληνιούχος ινδικός χαλκός (CaInSe₂) και τελουριούχο κάδμιο (CdTe).

Πολλές είναι πλέον οι εφαρμογές των φωτοβολταϊκών στοιχείων, αλλά ακόμη παραμένουν σε συμπληρωματικό παράγοντα παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα στην Αμερική η εποχιακή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στηρίζεται καθαρά στην ηλιακή ενέργεια, όταν η ηλιοφάνεια είναι στην μεγαλύτερη ανοδική της ακμή.

Τα πρώτα βήματα στο τομέα αυτό ξεκίνησαν στην Ευρώπη, το 2000, κυρίως με προγράμματα στήριξης της αρχικής επένδυσης και της αποδιδόμενης στο ηλεκτρικό δίκτυο ενέργειας. Η στήριξη της αρχικής επένδυσης είχε θετικά αποτελέσματα στην Γερμανία αυξάνοντας την εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ από Φ/Β συστήματα.



Εικόνα 9: Γράφημα παραγωγής ηλιακής ενέργειας παγκοσμίως 1990-2008

Πλέον τώρα, παγκοσμίως όλο και περισσότερα Φ/Β συστήματα είναι ενσωματωμένα σε κτίρια και είναι συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο. Ευρέως διαδεδομένη είναι και η χρήση αυτονόμων Φ/Β συστημάτων για την βελτίωση της ποιότητας της ζωής σε απομακρυσμένες περιοχές, που δεν υπάρχει πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος στην αγορά εμφανίζονται όλο και περισσότερα καταναλωτικά προϊόντα όπως αριθμομηχανές, ρολόγια κλπ που χρησιμοποιούν μια Φ/Β κυψέλη.

2.4 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων

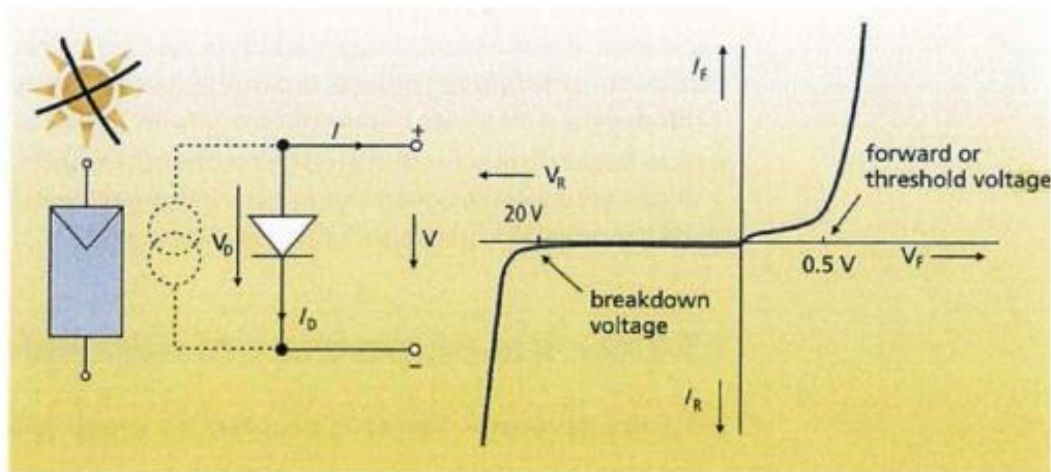
Όπως άλλωστε ισχύει σε όλα τα ηλεκτρικά μοντέλα, δύο είναι τα στοιχεία που μας αφορούν, ώστε να θεωρήσουμε μία μελέτη ενός υλικού ή μίας ηλεκτρικής δομής πλήρη και αντιπροσωπευτική. Αυτά είναι οι καμπύλες απόκρισης I-V και το ισοδύναμο ηλεκτρικό τους κύκλωμα. Το πρώτο σημείο αφορά περισσότερο την λειτουργία και την απόκριση του κυκλώματος και του στοιχείου στις δοσμένες εισόδους, ενώ το δεύτερο εμβαθύνει περισσότερο σε ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της

δομής, που εξετάζεται οπότε και αναλύει σε βάθος το κυκλωματικό ισοδύναμο του στοιχείου αυτού.

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι αρκετά απλό και εύκολο στην ανάλυση της λειτουργίας του μιας και αποτελεί κυκλωματικά μία τυπική δίοδο, που επιτρέπει την διέλευση ρεύματος, όταν η τάση, που εφαρμόζεται στα άκρα του στοιχείου ξεπεράσουν μία οριακή τιμή (τάση κατωφλίου ή συμβολικά V_i), ενώ σε αντίθετη περίπτωση, δεν επιτρέπεται διέλευση ρεύματος. Ωστόσο υπάρχει και η ανάστροφη πόλωση της διόδου, όπου θεωρητικά δεν μπορεί να επιτραπεί διέλευση, γεγονός το οποίο αναιρείται υπό συγκεκριμένες συνθήκες και μετά από μία οριακή και πάλι τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στα άκρα του στοιχείου και τότε ισχύει ακριβώς το ίδιο φαινόμενο με αρνητική ροή ρεύματος (προς την αντίθετη κατεύθυνση).

Το σύνηθες λοιπόν ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα μετά από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω θεωρητικά θα αποτελούνταν από μία απλή πηγή, την δίοδο συνδεδεμένη στα άκρα της πηγής και τίποτε άλλο, εμφανίζοντας μία τάση στην έξοδο του κυκλώματος, που θα ήταν και η τάση, που θα χρησίμευε για την αξιοποίηση της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας.

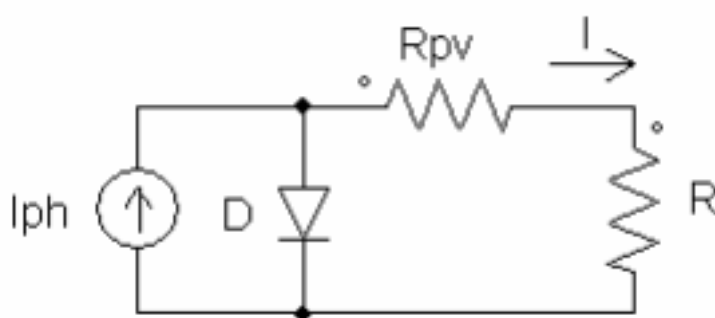
Το σχηματικό αυτό, όπως περιγράφηκε παρουσιάζεται παρακάτω σε συνδυασμό με την χαρακτηριστική καμπύλη, που διέπει κάθε ηλεκτρική και ηλεκτρονική διάταξη, που είναι η καμπύλη Τάσης – Ρεύματος του εμφανιζόμενου σχηματικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Εικόνα 10 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα διόδου και χαρακτηριστική καμπύλη (I-V)

Κάτι τέτοιο, όπως περιγράφηκε προηγουμένως φυσικά δεν είναι ρεαλιστικό σε καμία περίπτωση, μιας και δεν λαμβάνονται υπ' όψη παράμετροι που επηρεάζουν την λειτουργία και την ύπαρξη του φωτοβολταϊκού στοιχείου στον χώρο και μάλιστα στα πλαίσια μίας ηλεκτρικής έστω και μικρής εγκατάστασης.

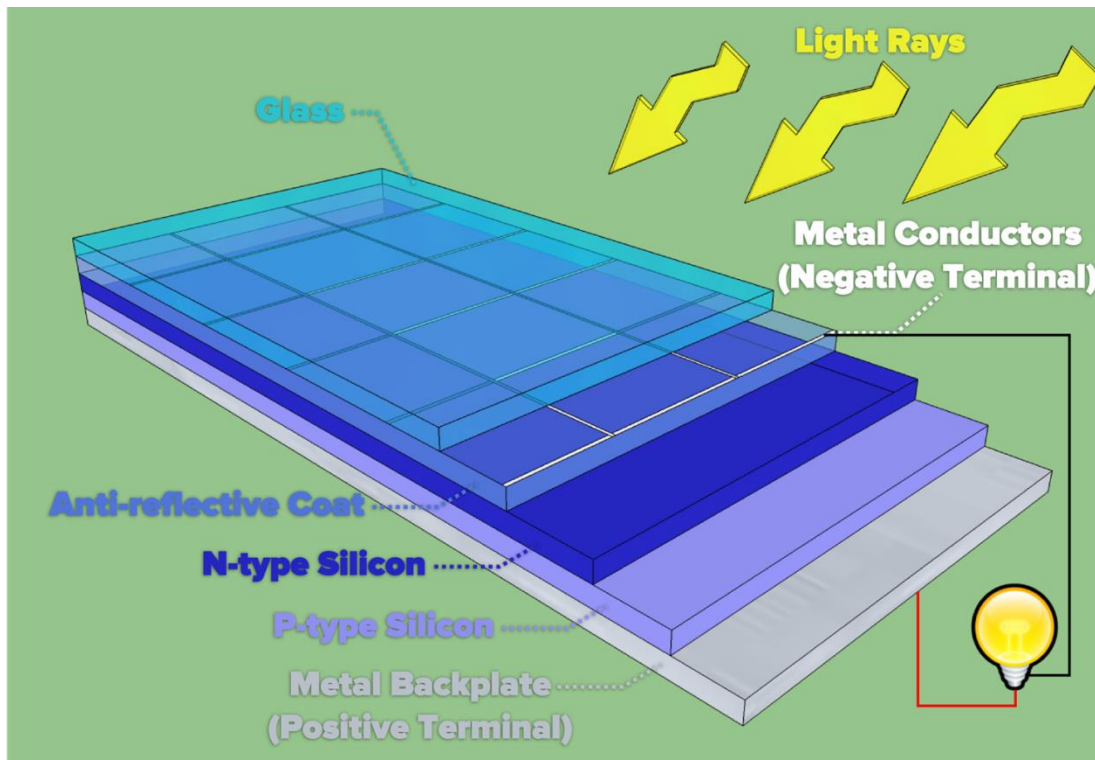
Το παρακάτω σχηματικό είναι αυτό, που έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται σαν ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Εικόνα 11 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκής κυψέλης

Το σχηματικό, που παρουσιάστηκε παραπάνω περιλαμβάνει και τις αντιστάσεις, που προκύπτουν ως απώλειες της διάταξης και πρέπει να συμπεριληφθούν στην ηλεκτρική ανάλυση μίας κυψέλης.

2.5 Οι κυρίαρχες τεχνολογίες κατασκευής



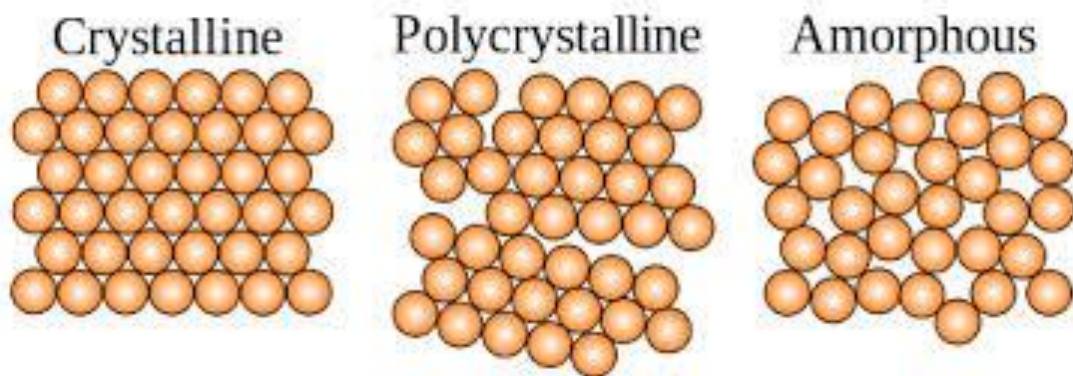
Εικόνα 12 Χαρακτηριστική Δομή Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Με τον όρο φωτοβολταϊκά χαρακτηρίζονται διατάξεις που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αποτελούνται από μικρότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι:

Μονοκρυσταλλικό, Πολυκρυσταλλικό ή Άμορφο πυρίτιο (Si): τρεις μορφές του στοιχείου πυρίτιου που διαφέρουν στον βαθμό οργάνωσης του κρυσταλλικού πλέγματος. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι το βασικό υλικό της μικροηλεκτρονικής σήμερα και αποτελείται από πυρίτιο του οποίου το κρυσταλλικό πλέγμα είναι συνεχές σε όλο το στερεό, χωρίς να σχηματίζει κόκκους. Κατασκευάζεται με την μέθοδο Czochralski, όπου ένας προσεκτικά προσανατολισμένος αρχικός κρύσταλλος βυθίζεται σε λιωμένο πυρίτιο, έλκεται προς τα άνω και περιστρέφεται, αποσπώντας ένα ενιαίο κρύσταλλο. Η ομοιογένεια αυτή εξαλείφει ηλεκτρικά προβλήματα που προκαλούνται από ατέλειες του κρυστάλλου αλλά επειδή δεν είναι τόσο κρίσιμη για την λειτουργία των φωτοβολταϊκών οι περισσότεροι κατασκευαστές προτιμούν το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο λόγω του χαμηλότερου κόστους κατασκευής.

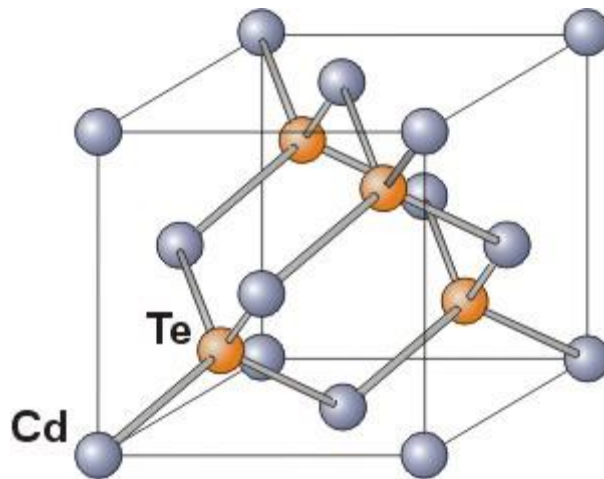
Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτελείται από μικρότερους κρυστάλλους που ονομάζονται κρυσταλλίτες. Κατασκευάζεται με πολλές μεθόδους, συνήθως ρίχνοντας σε καλούπι ακατέργαστο πυρίτιο. Είναι πιο ευαίσθητο στις υψηλές θερμοκρασίες και συνήθως χαμηλότερης απόδοσης από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Φωτοβολταϊκά στοιχεία από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο σήμερα μπορούν να φτάσουν ονομαστική απόδοση από 14% έως 21%, με τα πολυκρυσταλλικά να ακολουθούν με τυπικές αποδόσεις από 13% έως 16%.

Το άμορφο πυρίτιο (a-Si) αποτελεί μη κρυσταλλική μορφή του πυριτίου. Αν και υστερεί σε ηλεκτρονικές επιδόσεις, προσφέρεται για περισσότερες εφαρμογές γιατί έχει την δυνατότητα να αποτεθεί σε κάποιο υπόστρωμα (π.χ. πλαστικό) σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, σχηματίζοντας λεπτές μεμβράνες και επιτρέποντας την φθηνή παραγωγή εύκαμπτων φωτοβολταϊκών. Παράγεται μέσω την τεχνολογίας PECVD όπου πρόδρομα αέρια ιονίζονται σε κλειστό θάλαμο από ηλεκτρόδια και ωθημένα από το εφαρμοζόμενο ηλεκτροστατικό πεδίο βομβαρδίζουν την γειτονική επιφάνεια. Ο σχηματισμός εξαιρετικά λεπτών μεμβρανών επιτρέπει την επικάλυψη με στρώσεις συντονισμένες σε διαφορετικά μήκη κύματος φωτεινής ακτινοβολίας, αυξάνοντας την απορρόφηση της και αντισταθμίζοντας κάπως την χαμηλή τους απόδοση που κυμαίνεται από 6% έως 8%.



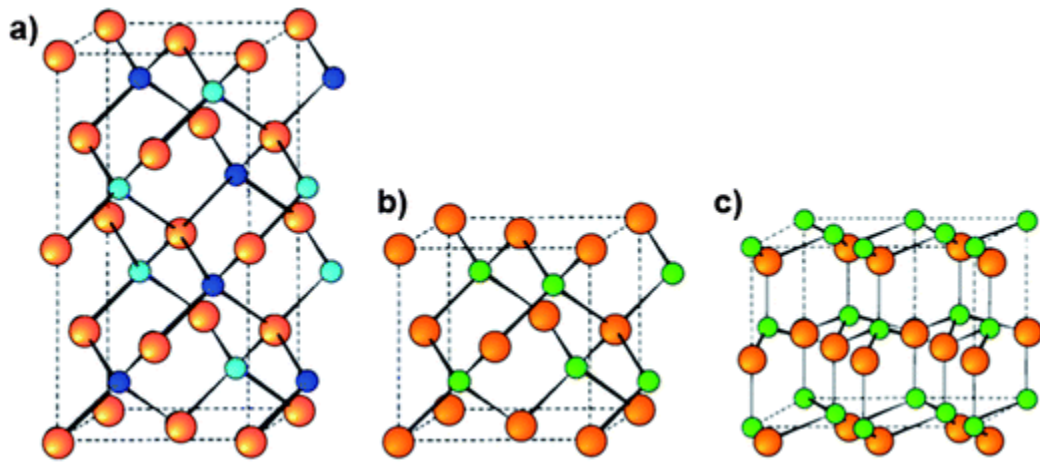
Εικόνα 13 Σύγκριση μονοκρυσταλλικής, πολυκρυσταλλικής και άμορφης δομής πυριτίου

Τελουριούχο κάδμιο (CdTe): Μία από τις φθηνότερες τεχνολογίες παραγωγής φωτοβολταϊκών, το ενεργειακό χάσμα του τελουριούχου καδμίου (1.44 eV) είναι σχεδόν απόλυτα ταιριαστό με την ενεργειακή κατανομή των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας και έχει μεγάλη απορροφητικότητα. Μπορεί να κατασκευαστεί με διάφορες μεθόδους όπως η χημική εναπόθεση ατμών και η ηλεκτρολυτική εναπόθεση. Η απόδοσή τους κυμαίνεται στο 7% με 11%.



Εικόνα 14: Κρυσταλλική δομή τελλουριούχου καδμίου

CIGS (Copper Indium Gallium Selenide): Μπορεί να αποτεθεί σε εύκαμπτο υπόστρωμα. Επίσης για την παραγωγή του χρησιμοποιείται λιγότερη ενέργεια από ότι χρησιμοποιείται για την διαδικασία παραγωγής φωτοβολταϊκών κρυσταλλικού πυριτίου και λιγότερο κάδμιο σε σχέση με την διαδικασία παραγωγής των φωτοβολταϊκών CdTe, το οποίο είναι στοιχείο τοξικό για το περιβάλλον και κάποιες φορές αντικαθίσταται από ψευδάργυρο. Ρυθμίζοντας την αναλογία Γαλλίου και Ινδίου, το ενεργειακό χάσμα του στοιχείου μπορεί να αλλάξει από 1,04 eV για στοιχεία χαλκού-ινδίου-δισεληνιδίου (CIS) μέχρι 1,68 eV για στοιχεία χαλκού-γαλλίου-δισεληνιδίου (CGS). Η δυνατότητα ρύθμισης του ενεργειακού χάσματος επιτρέπει την κατασκευή επικαλυπτόμενων στρώσεων διαφορετικών ενεργειακών χασμάτων για την αύξηση την αποδοτικότητας. Αν και είναι τα πιο αποδοτικά εύκαμπτα φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου (“thin-film”) σήμερα, υστερούν σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου με την απόδοσή τους να φτάνει το 15,7%, είναι όμως πιο ανθεκτικά στις μεταβολές της θερμοκρασίας.



Εικόνα 15: Δομές ημιαγωγών χαλκού-ινδίου-γαλλίου-δισεληνιδίου σε διάφορες εκδοχές

Πίνακας 1 Συγκριτικός πίνακας τεχνολογίας φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου

Τύπος	Μονοκρυσταλλικό	Πολυκρυσταλλικό	Λεπτού Υμενίου
Εμφάνιση			
Απόδοση	14% - 21%	13%-16%	a-Si: 6% - 8% CdTe: 7% - 11% CIGS: 15,7%

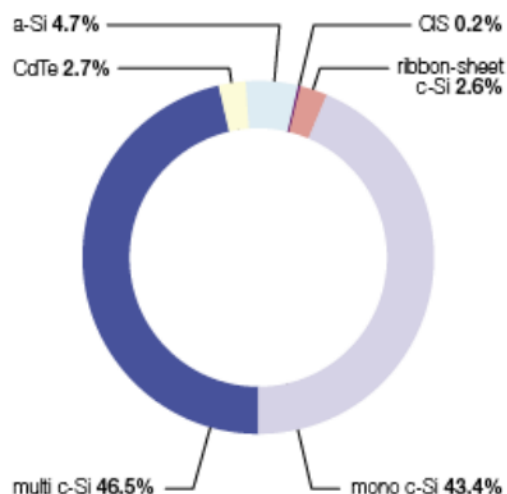
Παρατηρούνται αρκετά μεγάλες αποκλίσεις σε κάποιες από τις παραπάνω κατηγορίες τεχνολογιών κατασκευής. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί και η ευκολία και το κόστος επεξεργασίας των απαιτούμενων υλικών. Για παράδειγμα η τεχνολογία

μονοκρυσταλλικού πυριτίου θεωρείται από τις ευκολότερες στην χρήση και την κατασκευή, παρά το αρκετά μεγάλο εύρος και την κατά περιπτώσεις χαμηλή απόδοση του συνολικού φωτοβολταϊκού στοιχείου, που παράγεται. Για τον λόγο αυτό και χρησιμοποιείται κατά κόρον. Παρά κάτω θα αναλυθούν με περισσότερες λεπτομέρειες η χρήση των τεχνολογιών αυτών με βάση τους ημιαγωγούς, που χρησιμοποιούνται σε αυτές.

2.5.1 Είδη ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των Φ/Β

Αξίζει να ερευνηθεί η σημερινή κατάσταση της αγοράς των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε βάθος. Η αφθονία των διαθέσιμων τεχνολογιών κατασκευής και των υλικών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτές για τις ιδιαίτερες απαιτήσεις εφαρμογών έχουν απελευθερώσει αρκετά την αγορά.

Στην εικόνα που ακολουθεί εμφανίζονται οι αναλογίες των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών.



Εικόνα 16: Χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες κατασκευής φωτοβολταϊκών κυψελών

Είναι αρκετά ξεκάθαρη η διαφορά των μεριδίων, που διαθέτει το πυρίτιο στις διάφορες μορφές του λόγω της ευκολίας επεξεργασίας του και φυσικά της ευκολίας στην εύρεσή του στη φύση, μιας και είναι διαθέσιμο σε τεράστιες ποσότητες σε άμμο

και άλλα υλικά. Τα Φ/Β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου αποτελούν περίπου το 90% της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β γεννητριών. Το υπόλοιπο της αγοράς καλύπτεται από τεχνολογίες Φ/Β λεπτών υμενίων, όπως το άμορφο πυρίτιο, το Τελουριούχο κάδμιο και τον δισελινιούχο Ινδικό χαλκό.

Η ευρύτητα των εφαρμογών του πυριτίου και η ευκολία χρήσης του σε κατασκευές φωτοβολταϊκών οφείλεται σε διάφορους λόγους, οι κυριότεροι δύο εξ' αυτών είναι οι ακόλουθοι:

A) Είναι το κύριο υλικό των διατάξεων ηλεκτρονικής με αποτέλεσμα, οι ιδιότητες του να έχουν μελετηθεί καλά τα τελευταία 40 χρόνια.

B) Παρουσιάζει μεγάλη αξιοπιστία σε ακραίες συνθήκες. Το βασικότερο και αντιπροσωπευτικότερο παράδειγμα αποτελεί η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διαστημόπλοιο με τροχιά προς το Δία, όπου οι συνθήκες ήταν ιδιαίτερα ακραίες με 50 Για παράδειγμα τα Φ/Β συστήματα σε διαστημόπλοιο με τροχιά προς το Δία, λειτούργησαν ικανοποιητικά με συνθήκες με 50 W/m^2 και θερμοκρασία -120° C .

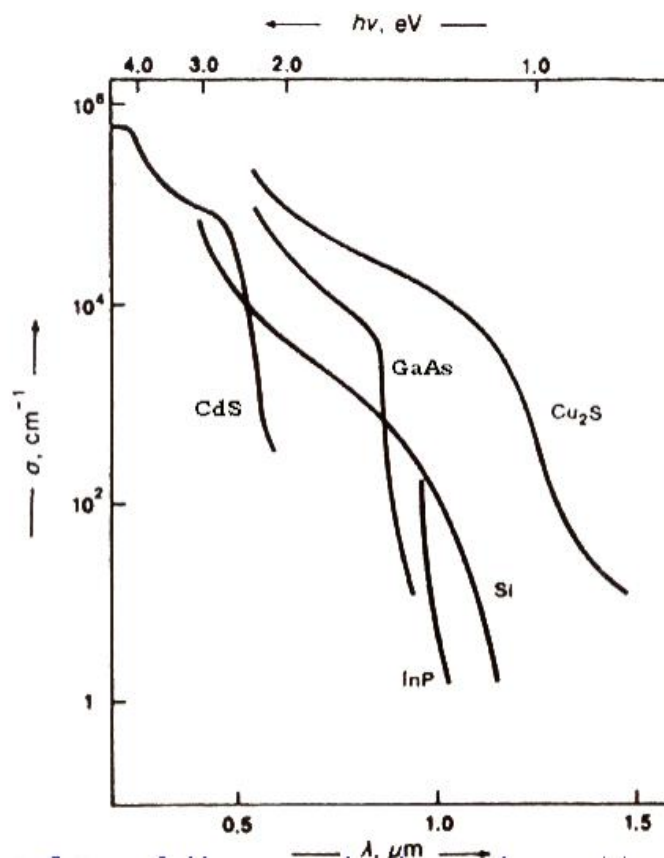
Σε άλλο παράδειγμα παρόμοιας διάταξης σε επίγεια εφαρμογή πλαίσια έδειξαν ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή σε συνθήκες έντονου ανέμου και έντονης βροχόπτωσης σε κορυφογραμμές και σε συνθήκες ταχύτητας ανέμου που ξεπερνούσε τα 100 Km/h ή κοντά σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον, όπως της θάλασσας. Σε θεωρητικό επίπεδο η απόδοση του πυριτίου και των στοιχείων, που κατασκευάζονται από αυτό μπορεί να φθάσει κοντά στο 24%.

Η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel, ο οποίος παρατήρησε ότι κάποια υλικά παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν εκτίθενται στο φως. Το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο αναπτύχθηκε από τα εργαστήρια Bell το 1954 και άρχισε να χρησιμοποιείται την δεκαετία του 1960 από την NASA για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε διαστημικούς δορυφόρους. Μέσω του διαστημικού προγράμματος η τεχνολογία εξελίχθηκε, το κόστος παραγωγής μειώθηκε και έχοντας ως έναυσμα την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970, άρχισε να χρησιμοποιείται σε οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Περιγράφεται ως η πόλωση ηλεκτρικών φορτίων που παρατηρείται σε ημιαγωγούς και οφείλεται στην διέγερση ηλεκτρονίων από φωτόνια κατάλληλης ενέργειας, μετατρέποντάς τα σε φορείς φορτίου για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων δημιουργεί μία διαφορά δυναμικού, δημιουργώντας μία ηλεκτρική γεννήτρια.

Ο μεγαλύτερος και σημαντικότερος παράγοντας για την χρησιμοποίηση ενός υλικού για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι ο βαθμός απορρόφησης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνειά του.

Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται η μεταβολή του συντελεστή αυτού (στην βιβλιογραφία χρησιμοποιείται το σύμβολο «α») συγκριτικά με το μήκος κύματος (σύμβολο «λ») και την ενέργεια των φωτονίων ηλιακής ακτινοβολίας (σύμβολο «hν»), που προσπίπτει σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο.



Εικόνα 17: Μεταβολή συντελεστή απορρόφησης (α) σε σχέση με το μήκος κύματος και την ενέργεια φωτονίων ηλιακής ακτινοβολίας (hν)

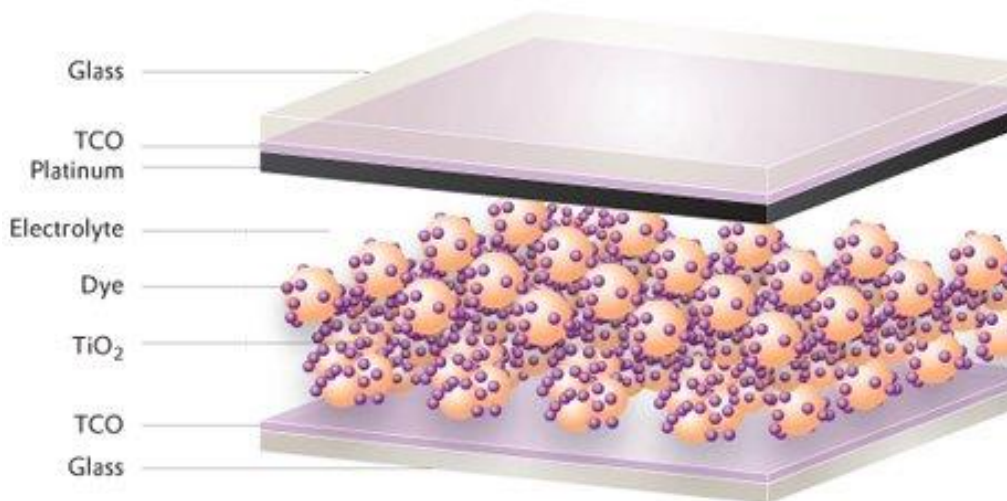
2.5.2 Σύγχρονες αναπτυσσόμενες και αναπτυσσόμενες τεχνολογίες κατασκευής

Dye-sensitized solar cell

Αυτή η τεχνολογία κατασκευής στηρίζεται απόλυτα σε μία φυσική ιδιότητα, που ανιχνεύθηκε από ερευνητές κατά τις αρχές του 1960. Το φαινόμενο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από οργανικά υλικά με την χρήση οξειδίων ως ηλεκτρόδια κατά την εφαρμογή τους σε ηλεκτροχημικά στοιχεία έγινε γρήγορα αντιληπτή,

ωστόσο την περίοδο εκείνη τόσο τα μέσα, όσο και τα υλικά παραγωγής ήταν αρκετά περιορισμένα.

Με την πάροδο των χρόνων και κατά τα πρώτα έτη της δεκαετίας του 2010 άρχισε η συστηματοποιημένη έρευνα για την βελτίωση της τεχνολογίας κατασκευής λεπτού υμενίου για την χρήση τους στην φωτοβολταϊκή βιομηχανία για μαζική και συστηματοποιημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση του ήλιου. Στην βασική τους λειτουργία ως φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν διαφέρουν από τον πρόγονό τους, ωστόσο τα υλικά, που χρησιμοποιούνται όσο και μία σημαντική διαφορά στην εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι τα δύο απαραίτητα στοιχεία, που διαφοροποιούν αυτήν την τεχνολογία από την τεχνολογία λεπτού υμενίου, που θεωρείται έως σήμερα μία από τις πιο επιτυχημένες, αποδοτικές και αποτελεσματικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία.

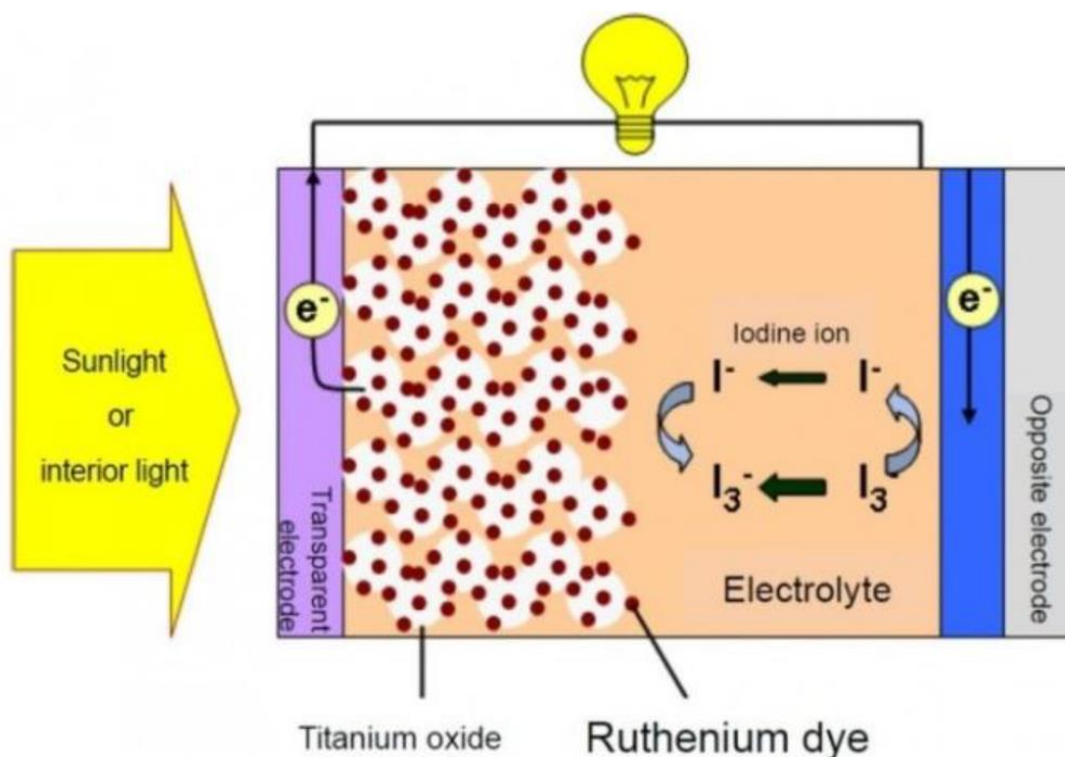


Εικόνα 18: Δομή σε επίπεδα φωτοβολταϊκού στοιχείου DSSC

Η τυπική δομή ενός τέτοιου στοιχείου περιλαμβάνει ένα πορώδες στρώμα διοξειδίου του τιτανίου, το οποίο βρίσκεται εμβαπτισμένο σε ένα υγρό διάλυμα ηλεκτρολύτη, που κατασκευάζεται με βάση τον λευκόχρυσο, το οποίο διαδραματίζει τον ρόλο ενός καταλύτη για την όλη διαδικασία. Σε επόμενο επίπεδο βρίσκεται ένα επόμενο στρώμα μοριακής δομής, το οποίο είναι υπεύθυνο για την πρόσληψη της ηλιακής ακτινοβολίας με μία λειτουργία αντίστοιχη με αυτή της φωτοσύνθεσης των φυτών. Έτσι, λοιπόν, έχουν ήδη κατασκευαστεί οι δύο ακροδέκτες, η άνοδος, που είναι το διοξείδιο του τιτανίου και η κάθοδος, που είναι ο λευκόχρυσος, τα οποία είναι εμποτισμένα σε διάλυμα ηλεκτρολύτη. Με τον τρόπο αυτόν έχει ολοκληρωθεί

το στοιχείο δύο ακροδεκτών, το οποίο είναι σε θέση με την πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας να δημιουργήσει στα άκρα του, όπου βρίσκονται μεταλλικοί αγωγοί διαφορά δυναμικού αναγκαία να καλύψει ηλεκτρικές ανάγκες σε ικανοποιητικό βαθμό.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω η τεχνολογία αυτή εκμεταλλεύεται πλήρως τα πλεονεκτήματα που έχει δημιουργήσει και χρησιμοποιεί η φύση στους έμψυχους οργανισμούς. Τα στοιχεία, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτού του τύπου τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι αρκετά απλά και βρίσκονται σε αφθονία ή μπορούν να κατασκευαστούν μαζικά και συστηματικά σε εργαστήρια ή και σε βιομηχανικό επίπεδο.



Εικόνα 19: Λειτουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου DSSC

Όσον αφορά στο κόστος και στην ευρύτητα των χρήσεων τους, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο σημείο, το ιδιαίτερα μικρό τους πάχος και κατ' επέκταση το μικρό τους βάρος είναι σε θέση να τα καταστήσει αρκετά μεγάλους και ικανούς ανταγωνιστές απέναντι σε όλες τις συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής, που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται αυτές τις μέρες.

Το συνολικό κόστος κατασκευής και εκμετάλλευσής τους παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλό, καθιστώντας τα αρκετά ελκυστικά. Ο βαθμός απόδοσής τους θεωρητικά μπορεί να φθάσει ακόμη και το 14-15% σε εργαστηριακό επίπεδο υπό συγκεκριμένες και σχεδόν απόλυτες συνθήκες. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι σε πραγματικές εφαρμογές ρεαλιστικών συνθηκών μία απόδοση του επιπέδου κοντά στο 10-11% θεωρείται αρκετά εύκολα επιτεύξιμη και φυσικά είναι απόλυτα ικανοποιητική αν αναλογιστούμε τα πλεονεκτήματα, που προσφέρονται από την συγκεκριμένη τεχνολογία για την βιομηχανία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

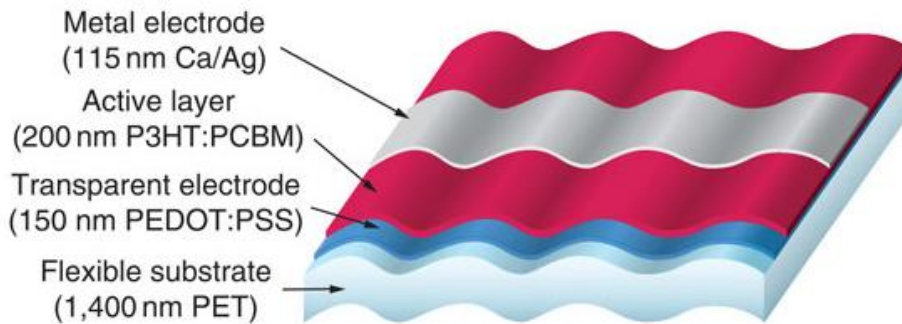
Μία λεπτομέρεια, που μπορεί ωστόσο να δημιουργήσει προβλήματα αποτελεί η χρήση του ηλεκτρολύτη. Γενικά μέχρι σήμερα θεωρούνταν αδιανόητο και μη-εφαρμόσιμο το γεγονός να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρολύτης και μάλιστα σε υγρή μορφή σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, το οποίο απαιτούμε σε πολλές εφαρμογές να είναι σταθερής δομής. Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη τεχνολογία κατασκευής δεν δημιουργεί τέτοια προβλήματα.

Ο ηλεκτρολύτης αυτός τοποθετείται στην διάταξη για να προσφέρει το ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο, που απαιτείται για την δημιουργία της απαραίτητης διαφοράς δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό αυτομάτως σημαίνει ότι δεν απαιτείται να γίνει έγχυση με τρύπημα του στρώματος του διοξειδίου του τιτανίου, όπως γίνεται αντίστοιχα στις συμβατικές τεχνολογίες, όπου χρειάζεται να γίνει τρύπα (via-hole) στο λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου ώστε να πετύχουμε την έγχυση του υλικού.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι και αυτή η τεχνολογία υποστηρίζει ως ένα βαθμό κάμψη και μηχανική καταπόνηση στο φωτοβολταϊκό στοιχείο με την προσθήκη της αντοχής σε υψηλότερες θερμοκρασίες, χωρίς να προκαλείται αλλοίωση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του στοιχείου ή οποιαδήποτε επιβλαβής παραμόρφωση και αλλοίωση στην δομή του.

Τέλος, μεταξύ των μειονεκτημάτων που μπορούν να αναγνωριστούν για αυτού του τύπου τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συγκαταλέγεται το υψηλό κόστος για το ρουθίνιο, τον λευκόχρυσο και το γυαλί, που χρησιμοποιείται στα ακραία στρώματα κάλυψης του στοιχείου και στις επαφές του. Επίσης, ο καταλύτης, που συνηθέστερα χρησιμοποιεί πτητικά οργανικά στοιχεία αποτελεί εκ των πραγμάτων ιδιαίτερα επικίνδυνο στοιχείο της διάταξης και για να μην υπάρξει πρόβλημα μόλυνσης πρέπει να σφραγίζεται και να μονώνεται καλά. Φυσικά ως υγρό διατρέχει τον κίνδυνο είτε μεγάλης αύξησης της θερμοκρασίας του είτε το ακριβώς αντίθετο, ψύξη σε χαμηλό σημείο έως και την πήξη του, που ουσιαστικά θα έχει οδηγήσει σε διακοπή της λειτουργίας του στοιχείου και πιθανότατα όλης της εγκατάστασης. Εν γένει τέτοιου είδους στοιχεία χαρακτηρίζονται από αρκετά μεγάλη θερμοκρασιακή αστάθεια, γεγονός, που επηρεάζει αρκετά την αξιοπιστία τους.

Εύκαμπτα φωτοβολταϊκά στοιχεία



Εικόνα 20 Δομή εύκαμπτου φωτοβολταϊκού στοιχείου

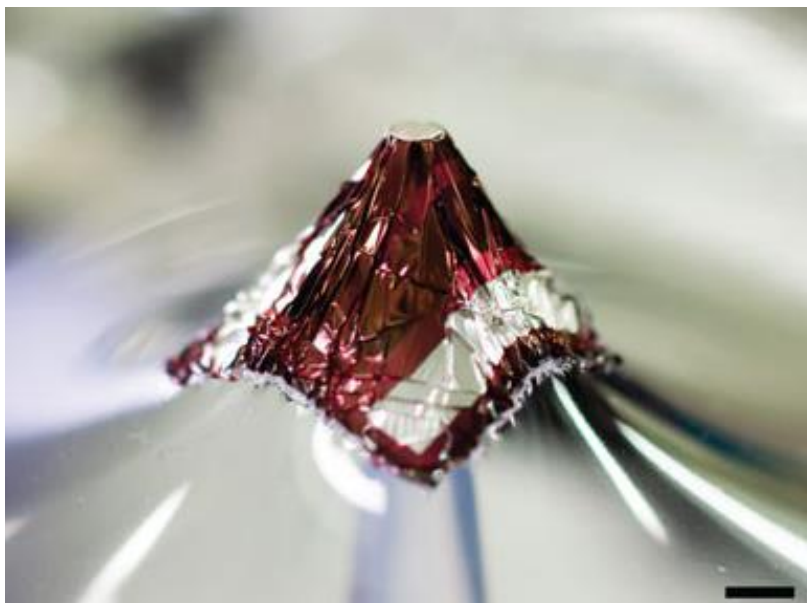
Οι περισσότερες τεχνολογίες κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων έως τα προηγούμενα 4-5 χρόνια στηρίζονταν στην βελτίωση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους και ορισμένες παραμέτρους, που επηρεάζουν τον βαθμό απόδοσής τους. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια οι έρευνες εστιάζονται σε διαφορετικά στοιχεία και παραμέτρους, όπως για παράδειγμα σε μηχανική αντοχή και μεταβολή των χωροταξικών τους παραμέτρων χωρίς να επέλθουν προβλήματα ή βλάβες στην λειτουργία τους. Ένα τέτοιο παράδειγμα, το οποίο συνεχίζει να δοκιμάζεται και να αναπτύσσεται είναι τα εύκαμπτα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η βασική τους θεωρία στηρίζεται στο ότι χρησιμοποιούν οργανικά υλικά και συγκεκριμένα πολυμερή έχοντας ως βάση ένα λεπτό στρώμα από πολυμερή ως υπόστρωμα.

Η γενικότερη αρχή λειτουργίας και οι παράπλευρες λειτουργίες, που πρέπει να επιτελεί δεν αλλάζουν. Αντιθέτως, τα επιπλέον χαρακτηριστικά που τους προσδίδει η χρήση των πολυμερών και άλλων οργανικών υλικών για την κατασκευή όλων των απαραίτητων ηλεκτρικών στοιχείων, τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στην βιομηχανία, ως μονωτικά υλικά σε φύλλα ακόμη και στην βιομηχανία κατασκευής υφασμάτων.

Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι ότι χρησιμοποιούν υλικά, τα οποία είναι θεωρητικά συνεχώς και σε μεγάλες ποσότητες διαθέσιμα οπότε δεν υπάρχει πρόβλημα διακοπής ή λήξης της παραγωγής τους. Επίσης, η φύση αυτών των υλικών προσδίδει χαμηλό κόστος παραγωγής για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αλλά

επιπλέον και ελάχιστο βάρος σε σχέση με τα συμβατικά. Το πάχος τους δεν ξεπερνά τις λίγες εκατοντάδες νανόμετρα για κάθε φύλλο, οπότε και το τελικό προϊόν που θα κατασκευαστεί θα είναι σίγουρα τουλάχιστον ένα επίπεδο χαμηλότερου πάχους από αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα κατά κόρον.

Το υπόστρωμα, το οποίο έχει πάχος περί τα 125 μικρόμετρα επιτρέπει την κάμψη του φωτοβολταϊκού έως και 5 χιλιοστά, τεράστια τιμή, αν αναλογιστεί κανείς το συνολικό του μέγεθος αναλογικά.



Εικόνα 21: Δείγμα ευκαμψίας φωτοβολταϊκού στοιχείου έως και 5mm

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (OPVs) αποτελούν σύμφωνα με ερευνητές και μελετητές της αγοράς τη τρίτη γενιά φωτοβολταϊκών, που θα εκκινήσει μία τεράστια ανάπτυξη στην χρήση τους σε διάφορους τομείς δραστηριότητας και παραγωγής. Το μεγάλο ερώτημα είναι το κατά πόσον είναι έτοιμη η βιομηχανία να ξεκινήσει την σταθερή και συστηματοποιημένη παραγωγή αυτών των στοιχείων, ώστε να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν. Το μεγαλύτερο αρνητικό τους στοιχείο, είναι ότι με τις επιπλέον παραμέτρους, που θεωρούνται ιδιαίτερα ενθαρρυντικές και χρήσιμες, που τους έχουν προσδώσει τα οργανικά υλικά και τα πολυμερή έχει περιοριστεί σε αρκετά μεγάλο βαθμό ο βαθμός απόδοσής τους, δηλαδή ο ρυθμός μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Σε δοκιμαστικές εφαρμογές έχει μετρηθεί περί το 1-1,5%, το οποίο φυσικά απέχει αρκετά από τον ήδη σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης των συμβατικών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σε εργαστηριακές μελέτες που διεξήχθησαν τα τελευταία χρόνια υπό συνθήκες επιτεύχθηκε απόδοση κοντά στο 10%, που θα μπορούσε αρκετά εύκολα να τα καταστήσει βασικό στοιχείο

κατασκευής των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων τόσο σε περιορισμένο βαθμό, όπως οικιακές εγκαταστάσεις, όσο βέβαια και σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, όπως για αμιγώς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ακόμη και χρήση στην βιομηχανία. (Martin Kaltenbrunner, 2012)

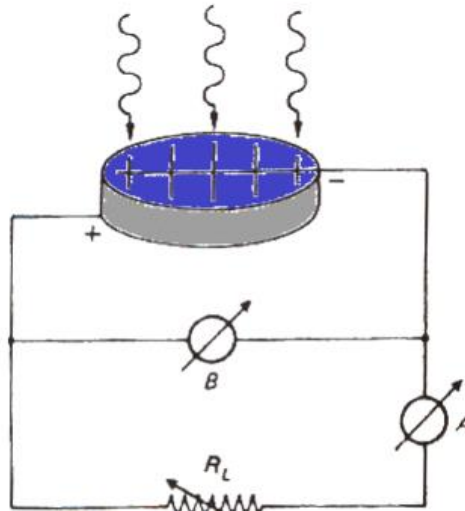
2.6 Βαθμός Απόδοσης και Παράγοντες Αυξομείωσής του

Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού καταδεικνύει την ποιότητα της εγκατάστασης και ορίζει την πραγματική ενέργεια, που παράγεται και είναι προς εκμετάλλευση σε σχέση με την ιδανική παραγωγή, που θα είχε η εγκατάσταση. Ουσιαστικά ερμηνεύει και συνυπολογίζει τις απώλειες από παράγοντες, που αλλάζουν την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας, όπως θα εξηγηθούν αναλυτικά παρακάτω, αλλά απώλειες των αγωγών, απώλειες θερμότητας και άλλες παράπλευρες απώλειες της εγκατάστασης, όπως για ιδιοκατανάλωση, ιδίως όταν πρόκειται για μεγάλες εγκαταστάσεις.

Ο βαθμός απόδοσης εκφράζεται με ποσοστό επί τοις εκατό και φυσικά ως ιδανικό ορίζεται το 100%, το οποίο σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να επιτευχθεί. Αρκούμεστε σε χαμηλότερες τιμές, οι οποίες φυσικά επηρεάζονται και από την ποιότητα κατασκευής και συντήρησης της εγκατάστασης συνολικά.

Για απλές περιπτώσεις, που θέλουμε να επιβεβαιώσουμε την σωστή και εύρυθμη λειτουργία μίας φωτοβολταϊκής διάταξης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, η απλούστερη των οποίων περιλαμβάνει μέτρηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, που χρησιμοποιούνται. Οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν είναι το ρεύμα, το οποίο παράγεται, η τάση, που εμφανίζεται στα άκρα του στοιχείου, αλλά για να έχουμε ένα σαφές αποτέλεσμα πρέπει να εξετάσουμε την καμπύλη που περιλαμβάνει σχηματικά τις τιμές αυτές σε ένα διάγραμμα σε διάφορες στιγμές ανά την ημέρα, όπου μεταβάλλεται η ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς και οι δύο αυτές τιμές.

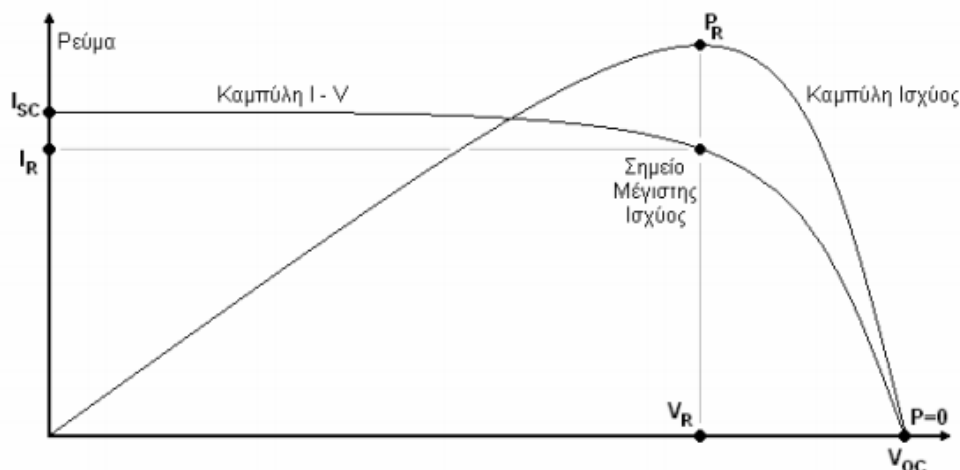
Εφόσον το διάγραμμα, που εμφανίζει την καμπύλη φόρτισης του στοιχείου μας είναι σχετικά όμοια με αυτήν που θεωρητικά θα έπρεπε να τείνει να μοιάζει τότε θεωρούμε ότι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο λειτουργεί σωστά. Φυσικά μία φυσιολογική τιμή με κάποια σχετικά όρια ανοχής για το ρεύμα και την τάση του στοιχείου, αποτελούν ένα πρώτο δείγμα καλής λειτουργίας της διάταξης.



Εικόνα 22 Απλή διάταξη για μέτρηση ηλεκτρικής συμπεριφοράς φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η παραπάνω τεχνική ελέγχου μίας φωτοβολταϊκής διάταξης χρησιμοποιεί ένα βολτόμετρο για την μέτρηση της τάσης στους ακροδέκτες του στοιχείου, ένα αμπερόμετρο για την μέτρηση του διερχόμενου ρεύματος από την διάταξη και μία αντίσταση, που αντιπροσωπεύει το φορτίο για μία πιο ρεαλιστική απεικόνιση του αποτελέσματος, που συλλέγεται.

Όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης μία φωτοβολταϊκής διάταξης, ο συνηθέστερος και απλούστερος τρόπος υπολογισμού του είναι με τον υπολογισμό του λόγου της πραγματικής παραχθείσας ενέργειας σε μία δεδομένη χρονική περίοδο προς την ονομαστική τιμή της ιδανικής ποσότητας ενέργειας, που αναμένεται να παραχθεί από το πλαίσιο ή την ομάδα πλαισίων, που είναι συνδεδεμένα στην εγκατάσταση.



Εικόνα 23: Καμπύλη ισχύος φωτοβολταϊκής διάταξης

Υπάρχουν και λογισμικά, τα οποία είτε παρέχονται από κατασκευαστές, τα οποία μπορούν συνυπολογίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία, που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, την κλίση του πλαισίου, την θερμοκρασία της περιοχής και την νέφωση και την υγρασία μίας περιοχής να υπολογίσουν προσεγγιστικά και θεωρητικά τον βαθμό απόδοσης. Ωστόσο, δεν κρίνονται ιδιαίτερα αξιόπιστα συγκρινόμενα με τον πραγματικό και χειροκίνητο υπολογισμό του βαθμού απόδοσης. Σε κάθε περίπτωση, ο υπολογισμός πρέπει να είναι τακτικός και ιδιαίτερα σχολαστικός, μιας και είναι σε θέση να καταδείξει προβλήματα κατασκευής ή ακόμη και βλάβες σε κάποιο σημείο της εγκατάστασης, που δεν είναι τόσο εμφανές.

Όπως άλλωστε είναι λογικό και αναμενόμενο τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, μιας και δεν έχουν σταθερή ροή ενέργειας προς αυτά (ηλιακή ενέργεια) δεν μπορούν να έχουν κατά την διάρκεια μίας ημέρας σταθερή ροή. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες, που επηρεάζουν τόσο αυτή όσο και τον γενικότερο βαθμό απόδοσης. Οι δύο κυριότεροι εξ' αυτών είναι η ηλιακή ακτινοβολία, που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο όπως και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Άλλοι παράγοντες, που μπορούν σε ένα μικρό βαθμό να επηρεάσουν την παραγωγή ενέργειας ενός πλαισίου είναι η υγρασία η πυκνότητα της συννεφιάς, η βροχή και η κατανομή του ηλιακού φάσματος στην περιοχή λειτουργίας.

2.7 Τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα φ/β τεχνολογίας

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει κάνει αρκετά βήματα προόδου και έχει φθάσει σε ένα σημείο κάλυψης αρκετά μεγάλου ποσοστού της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας

ειδικά σε απομονωμένες περιοχές, οι οποίες δεν είναι διασυνδεδεμένες στο δίκτυο της εκάστοτε χώρας. Πολλά, λοιπόν, είναι τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους, που τα καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικά ακόμη και για επενδυτικά προγράμματα. Μερικά από τα πλεονεκτήματά τους συνοψίζονται ως εξής:

- Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
- Ελάχιστη έως μηδενική ρύπανση των εγκαταστάσεων τους και πλήρης απουσία αποβλήτων ή άλλων επιβλαβών παραπροϊόντων.
- Αθόρυβη λειτουργία των διατάξεων.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (τουλάχιστον 25 χρόνια).
- Υψηλή αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Ελάχιστες απαιτήσεις επίβλεψης και συντήρησης.
- Αντοχή σε έντονες και ακραίες καιρικές συνθήκες (ισχυρούς άνεμους, ακραία χαλαζόπτωση, κλπ).
- Σχετικά απλή μέθοδος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες.
- Εύκολη επέκταση της υπάρχουσας εγκατάστασης.
- Δυνατότητα ανεξαρτησίας των διατάξεών τους από τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για απομακρυσμένες περιοχές (αυτόνομα και μη-διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα).
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών. Το εύρος της παραγόμενης ισχύος τους μπορεί να κυμαίνεται από μερικά Watt για οικιακή χρήση έως και πολλές χιλιάδες MW για μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και ηλιακών πάρκων σε περιοχές με έντονη φωτεινότητα και ηλιοφάνεια ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Ωστόσο, αν και διαθέτουν αρκετά πλεονεκτήματα που κυρίως στοχεύουν στην αξιοπιστία, την σταθερότητα και την έλλειψη αρνητικών αποτελεσμάτων στο περιβάλλον και στον άνθρωπο, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι διατάξεις στις οποίες χρησιμοποιούνται έχουν και διάφορα μειονεκτήματα, μεταξύ των οποίων είναι τα εξής:

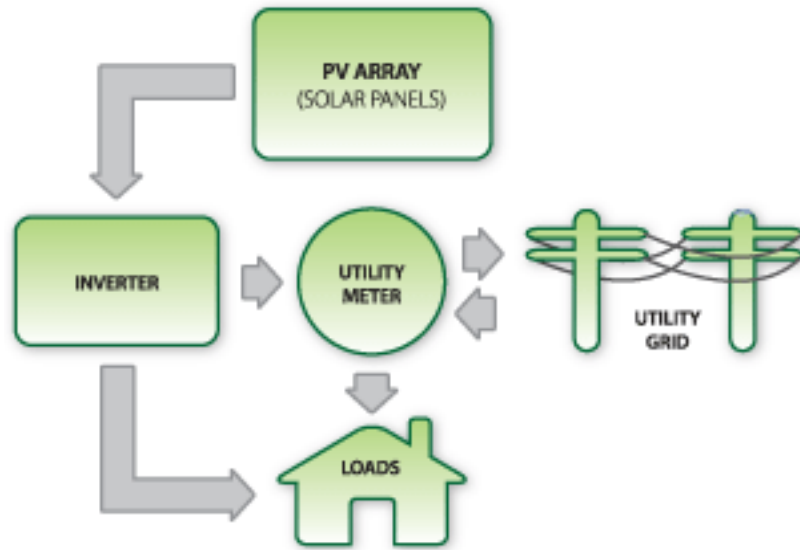
- Υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, το οποίο οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο υψηλό κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων και όχι τόσο στο κόστος της υπόλοιπης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός). Η αναλογία είναι περίπου 90%-10% για τις δύο αυτές παραμέτρους.
- Δεν είναι διαθέσιμη η αποθήκευση πλεονάσματος παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ειδικά σε μη-διασυνδεδεμένα δίκτυα. Ακόμη και σε ιδιαίτερες εφαρμογές, όπου αυτό γίνεται, είναι αρκετά μη-αποδοτικό με μεγάλες απώλειες παραχθείσας ενέργειας. Οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται έχουν απώλειες λόγω φυσικών φαινομένων, ενώ έχουν και αρκετά μεγάλο κόστος για το εύρος, στο οποίο πρέπει να χρησιμοποιηθούν.
- Λόγω της μικρής πυκνότητας της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, απαιτείται η χρησιμοποίηση μεγάλων σχετικά επιφανειών για τα πλαίσια, που εντάσσονται στην εγκατάσταση. Ειδικά η σκίαση και άλλες παράμετροι θα μειώσουν κατά πολύ την συνολική απόδοση της εγκατάστασης και κατ' επέκταση την συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα.
- Εξάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις καιρικές συνθήκες, που αποτελούν έναν απρόβλεπτο παράγοντα, επιτρέποντας μόνο εκτιμήσεις σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα (συνήθως ετήσια). Με βάση αυτά τα στοιχεία άλλωστε γίνονται και οι μελέτες πριν από την κατασκευή μίας εγκατάστασης ειδικά όταν πρόκειται για περίπτωση συστηματικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε για κάλυψη μεγάλων αναγκών μίας περιοχής ή μίας βιομηχανίας, είτε πρόκειται για πώληση της ενέργειας στον διαχειριστή του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της εκάστοτε χώρας.

2.8 Στοιχεία Ολοκληρωμένης Εγκατάστασης Φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν έχουν νόημα ύπαρξης αυτόνομα στην φύση εφόσον δεν χρησιμοποιούνται σε κατάλληλες διατάξεις και εγκαταστάσεις με κάποιο σκοπό σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή. Για να θεωρηθεί μία φωτοβολταϊκή διάταξη πλήρης έστω και μερικώς απαιτεί και διάφορα άλλα στοιχεία, τα οποία επιτελούν αρκετά

σημαντικές λειτουργίες, ώστε το ρεύμα, το οποίο παράγεται με την χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα πλαίσια να είναι αφενός ικανοποιητικό ποιοτικά και αφετέρου σε εκμεταλλεύσιμη μορφή.

Μία χαρακτηριστική διάταξη παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα με διάφορα επιμέρους στοιχεία, που μπορεί να διαθέτει. Η συγκεκριμένη αφορά στην συνηθέστερη χρήση φωτοβολταϊκών, που αποτελεί η εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας για οικιακή ιδιοκατανάλωση.



Εικόνα 24: Χαρακτηριστική δομή φωτοβολταϊκής διάταξης

2.8.1 Αντιστροφείς Τάσης



Εικόνα 25 Αντιστροφέας Τάσης (inverter)

Ο αντιστροφέας τάσης είναι ένα από τα σημαντικότερα μέρη μίας φωτοβολταϊκής διάταξης, ύστερα από το βασικό τμήμα της παραγωγής ενέργειας. Ο στόχος του είναι να καταστήσει την παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια ικανή να ενταχθεί στο διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της περιοχής είτε σε δίκτυο μεταφοράς. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες παράγουν συνεχή τάση, λόγω της φύσης της λειτουργίας τους και η τάση αυτή θα πρέπει να γίνει εναλλασσόμενη και μάλιστα σε συχνότητα κατάλληλη για είσοδο στο σύστημα, δηλαδή για την Ελλάδα τα 50 Hz. Εκτός από αυτή την αρμοδιότητα, ο αντιστροφέας, ειδικά όταν πρόκειται για μεγάλα ηλιακά πάρκα ή μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλιακής ενέργειας είναι και ο αυτόνομος ρυθμιστής όλης της μονάδας, με βάση κάποια χαρακτηριστικά και δεδομένα, που του έχουν δοθεί. Αυτό σημαίνει ότι «αποφάσεις», που παίρνει επηρεάζουν την αποδοτικότητα της εγκατάστασης αλλά και την συνολικής επένδυσης αντίστοιχα.

Για τον σωστό σχεδιασμό ενός συνολικού φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν η επιλογή του κατάλληλου inverter τάσης. Η λειτουργία του συστήματος ξεκινά και τελειώνει με εντολή του αντιστροφέα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την κατά τον δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση της εγκατάστασης. Επίσης αρμοδιότητα του αντιστροφέα είναι η εκκίνηση και η διακοπή της παροχής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς το σύστημα, ώστε να πετυχαίνει μέγιστη ροή ισχύος αλλά και άμεση διακοπή και αποκοπή από το συνολικό σύστημα όταν εμφανιστούν οποιαδήποτε προβλήματα. Για τον λόγο αυτόν απαιτούνται και ιδιαίτερα συστήματα ασφαλείας, ώστε να εκμηδενίζεται το περιθώριο σφάλματος ή και καταστροφής μέρους ή και όλου του αντιστροφέα.

Ο αντιστροφέας λειτουργεί με κάποιες βασικές αρχές, που ορίζονται τόσο κατασκευαστικά, όσο και ειδικά από διάφορους κανονισμούς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, στην οποία θα ενταχθεί. Μία από τις βασικές αρχές είναι να προσαρμόζεται στην τάση του δικτύου. Οποιαδήποτε μεταβολή προκύπτει και ανιχνεύεται από τον αντιστροφέα, θα οδηγήσει σε μεταβολή διατάξεών του, ώστε να εναρμονιστεί με την τάση του δικτύου, στο οποίο θα παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται.

Προφανώς ανεξάρτητα από την προσαρμογή στην ημιτονοειδή τάση του δικτύου, υπάρχει και συνεχόμενη ροή ρεύματος, για την οποία δεν χρειάζονται προσαρμογές και μεταβολές. Ωστόσο, οι αλλαγές στην λειτουργία αυτή, όπως περιγράφηκε προηγουμένως καθίσταται ευκολότερη σε περιπτώσεις, όπου η σύνθετη αντίσταση του δικτύου είναι μεγάλη, κάτι που συμβαίνει σε μη-διασυνδεδεμένες μονάδες ή σε διασυνδεδεμένες με το δίκτυο μονάδες χαμηλής ισχύος.

2.8.2 Αποθηκευτικά μέσα

Όπως προαναφέραμε, η αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων ηλιακής ενέργειας μπορεί να κυμανθεί σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών, ανάλογα με διάφορες παραμέτρους τόσο της εγκατάστασης, όσο και του περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει ότι και η παραγόμενη ενέργεια ακόμη και κατά την διάρκεια της ημέρας δεν παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται συνεχώς πολλές φορές με αρκετά μεγάλες αποκλίσεις. Για τον λόγο αυτό και τα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ενέργειας λειτουργούν σε συμπληρωματικό επίπεδο, όταν πρόκειται για μεγάλα δίκτυα διανομής ενέργειας, όπως για παράδειγμα μίας ολόκληρης πόλης ή ακόμη και χώρας. Όταν όμως η εγκατάσταση τροφοδοτεί μία μικρή περιοχή ή και μία άλλη μεμονωμένη εγκατάσταση ή διάταξη, τότε προκύπτουν προβλήματα τροφοδοσίας ισχύος. Η πρώτη περίπτωση περιλαμβάνει την ελλιπή τροφοδοσία με ισχύ, όπου και εμφανίζεται ένα αρκετά μεγάλο ζήτημα. Συνήθως αυτά τα προβλήματα καλύπτονται από άλλες συμπληρωματικές πηγές ενέργειας, είτε από το σταθερό δίκτυο του παρόχου ρεύματος ή από άλλες ανανεώσιμες πηγές, που είναι εγκατεστημένες για εφεδρεία. Η δεύτερη περίπτωση αφορά την ύπαρξη πλεονάσματος παραχθείσας ενέργειας. Προφανώς και δεν είναι αποδοτικό να σπαταλιέται άσκοπα αυτή η ενέργεια.



Εικόνα 26: Συστοιχίες συσσωρευτών για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε φωτοβολταϊκό πάρκο

Ο μόνος τρόπος ώστε να προσπαθήσουμε να διατηρήσουμε την ηλεκτρική ενέργεια, που βρίσκεται σε πλεόνασμα είναι να την αποθηκεύσουμε σε ειδικές διατάξεις και να χρησιμοποιηθεί σε κάποια στιγμή, όπου η τροφοδοσία ισχύος δεν

θα είναι επαρκής για το σύστημα. Τα μέσα αυτά στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ειδικές συστοιχίες συσσωρευτών, ή κατά τη γνωστή τους ονομασία ως μπαταρίες. Οι συσσωρευτές αυτοί έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή για να αντέχουν σε έντονες καταστάσεις, αλλά και να είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν αξιόπιστα σε πολλές φορτίσεις και εκφορτίσεις ακόμη και κατά την διάρκεια της ημέρας.

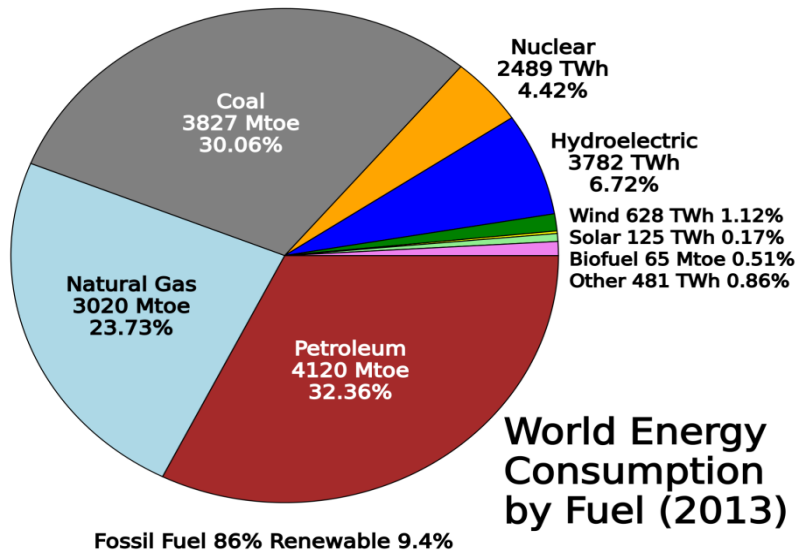


Εικόνα 27 Μεγάλης κλίμακας συστοιχίες συσσωρευτών για μεγάλη παραγωγή ηλιακής ενέργειας

Σαφώς όλοι οι συσσωρευτές δεν είναι όμοιοι. Έχουν διάφορα χαρακτηριστικά, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη και να συμβαδίζουν με τα χαρακτηριστικά τόσο της διάταξης, που θα τροφοδοτηθεί, όσο και του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι οι διαστάσεις τους, το βάρος τους και ο βαθμός στον οποίο επηρεάζονται από συνθήκες του περιβάλλοντος, στο οποίο λειτουργούν. Αυτά, ωστόσο, που ενδιαφέρουν είναι τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά, που είναι η χωρητικότητά τους σε ηλεκτρικά φορτία και η ονομαστική τιμή της τάσης του ρεύματος το οποίο μπορούν να φιλοξενήσουν εντός των διατάξεών τους. Η χωρητικότητα εκφράζεται σε Ah (αμπέρ ανά ώρα) και η τάση σε Volt.

2.9. Οι προοπτικές ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως εξηγήθηκε και περιγράφηκε αναλυτικά στα παραπάνω κεφάλαια διαθέτουν αρκετά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων μορφών ενέργειας. Το βασικότερο πλεονέκτημά τους είναι η καθαρότητα της λειτουργίας τους και οι ελάχιστες επιρροές και επιπτώσεις που προξενούν στο περιβάλλον στο οποίο



Εικόνα 28: Κατανομή μεριδίων πηγών ενέργειας 2013

λειτουργούν. Η τάση αυτή βοηθάει την γενικότερη σκέψη για περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε όλα τα κράτη της γης και βοηθάει αρκετά προς αυτό. Ωστόσο, διάφοροι ανασταλτικοί παράγοντες καθυστερούν την ταχύτερη εξάπλωσή τους και διατηρείται η χρήση άλλων μορφών και πηγών ενέργειας. Στην παρακάτω εικόνα γίνονται εμφανή τα μεριδιά τους στην αγορά ενέργειας, δείχνοντας βέβαια ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα και γενικότερα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γρήγορα κατέλαβαν ένα μεγάλο μέρος της αγοράς.

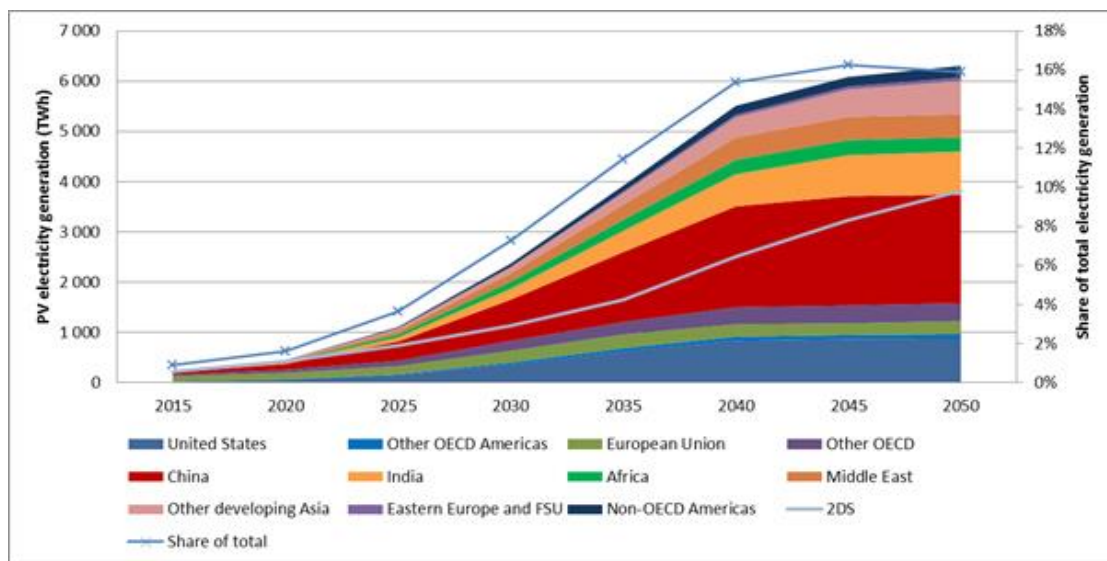
Παρά τα μεγάλα βήματα διείσδυσης της ηλιακής ενέργειας στον παγκόσμιο χάρτη, πολλοί είναι εκείνοι που θεωρούν ότι ένα τέτοιο μέσο παραγωγής ενέργειας θα έπρεπε να έχει αλματώδη αύξηση πωλήσεων. Η άποψη αυτή στηρίζεται κυρίως στο ότι όλοι οι κλάδοι, που σχετίζονται με αυτήν την τεχνολογία είχαν τεράστια αύξηση πωλήσεων και τεράστια ανάπτυξη προς διάφορους στόχους. Ένα τέτοιο παράδειγμα ήταν η βιομηχανία των ημιαγωγών, που αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι για την παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Όπως άλλωστε κάποιος θα μπορούσε να αντιληφθεί διάφορους παράγοντες, που επηρέασαν την αύξηση αυτή, μεταξύ των οποίων ήταν οικονομικές και τεχνικές δυσκολίες. Ως γνωστόν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι εγκαταστάσεις τους αποτελούν μία αρκετά ακριβή

επένδυση και εμπεριέχει αρκετές κατασκευαστικές δυσκολίες και ιδιαιτερότητες. Άλλωστε δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι όσο περνούν τα χρόνια και βελτιώνεται η τεχνολογία, η αγορά τείνει σε αύξηση της αποδοτικότητας και όχι απαραίτητα σε αύξηση της συνολικά παραγόμενης ενέργειας.

Ένας ακόμη ανασταλτικός παράγοντας είναι και οι δύσκολες τεχνικές κατασκευής των στοιχείων για φωτοβολταϊκές διατάξεις. Για παράδειγμα ο όγκος του υλικού, που είναι απαραίτητος για την παραγωγή, όπως και οι μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την επεξεργασία και την κατεργασία των απαιτούμενων υλικών. Αυτοί οι ανασταλτικοί παράγοντες διατήρησαν σχετικά χαμηλά την αύξηση της εισόδου των φωτοβολταϊκών στοιχείων στην παγκόσμια αγορά ενέργειας και έδωσε ώθηση σε συγκεκριμένες τεχνολογίες κατασκευής, όπως αυτή λεπτού υμενίου, για την οποία απαιτείται λιγότερος όγκος υλικού και σαφώς μικρότερη ποσότητα ενέργειας. Φυσικά, με τον τρόπο αυτό μειώνεται αρκετά και το τελικό κόστος του στοιχείου, που παράγεται βοηθώντας επιπλέον την ταχύτητα επέκτασης της αγοράς.

Όπως και να έχει η κατάσταση, οι «παραδοσιακές» τεχνολογίες, που χρησιμοποιούν το κρυσταλλικό πυρίτιο δεν πρόκειται να αποξενωθούν σε καμία περίπτωση, μιας και είναι το πρώτο δείγμα γραφής των φωτοβολταϊκών στοιχείων πριν από πάρα πολλά χρόνια. Οι επενδύσεις, που έχουν γίνει σε αυτές τις τεχνολογίες, τόσο για βελτίωσή τους όσο και για πραγματικά κατασκευασμένα έργα με την χρήση τους υποδεικνύουν της ιδιαίτερα καλή αξιοπιστία και εμπιστοσύνη, που διαθέτουν.

Τέλος, αξίζει να αναφερθούμε στις προβλέψεις, που έχουν γίνει κατά καιρούς για την αγορά της ηλιακής ενέργειας, περιλαμβάνοντας τόσο τον κλάδο των εγκαταστάσεων, όσο και τον κλάδο της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ο κλάδοι αυτοί ευνοούνται κατά κύρια βάση από την ανάπτυξη της τεχνολογίας σε συγκεκριμένους κλάδους της βιομηχανίας και της ηλεκτρονικής για διάφορες διατάξεις, που χρησιμοποιούνται. Σε γενικές γραμμές ο κλάδος φαίνεται να είναι από τους πιο προνομιούχους και να έχει τις καλύτερες προοπτικές για ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια με ταχείς ρυθμούς. Οι μόνοι παράγοντες που ίσως επηρεάσουν την πορεία αυτή μπορεί να είναι το μεγάλο κόστος αρχικής εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και η σχετικά χαμηλή τους απόδοση σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας, που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν. Στο επόμενο διάγραμμα (Εικόνα 29) μπορούμε να παρατηρήσουμε την πορεία, που εκτιμάται ότι θα ακολουθήσει η αγορά της ηλιακής ενέργειας παγκοσμίως τα επόμενα 35 χρόνια περίπου, εμφανίζοντας μία ραγδαία αύξηση της συνολικής παραγωγής, γεγονός, που πρόκειται να προκαλέσει αρκετά έντονες αλλαγές στην αγορά ενέργειας σε πολλά κράτη, που παραδοσιακά στηρίζονταν σε άλλες μορφές ενέργειας για να καλύψουν τις ανάγκες τους.

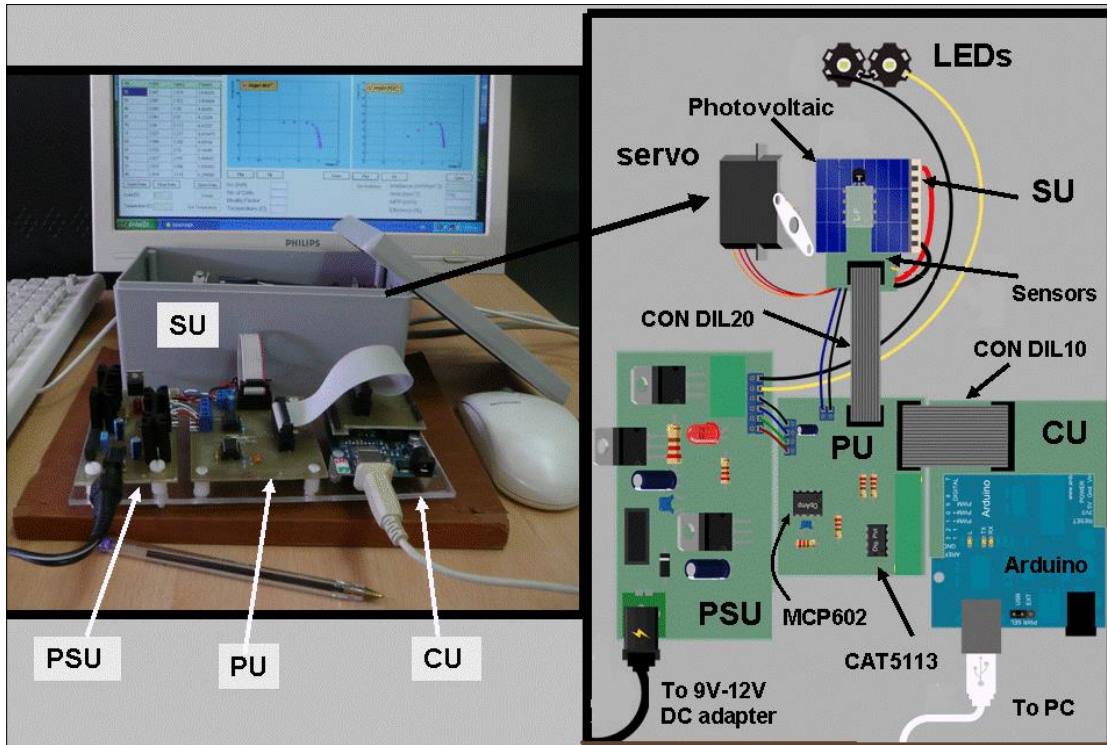


Εικόνα 29: Εκτιμήσεις Συνολικής Παραγωγής Ηλιακής Ενέργειας Παγκοσμίως

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ SOLARINSIGHT

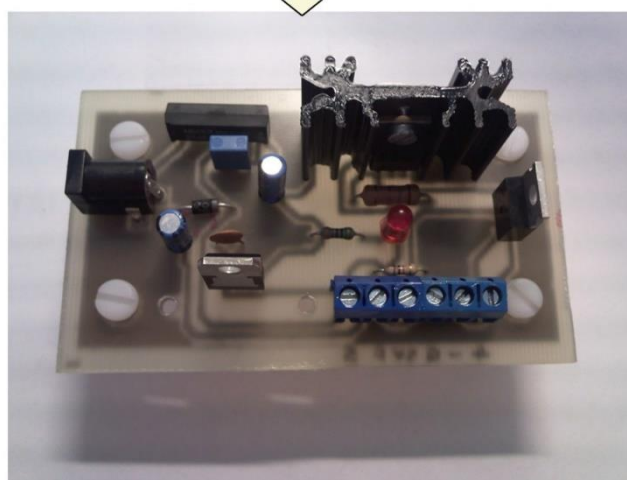
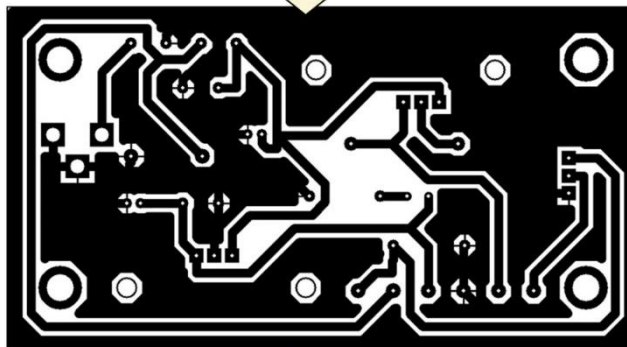
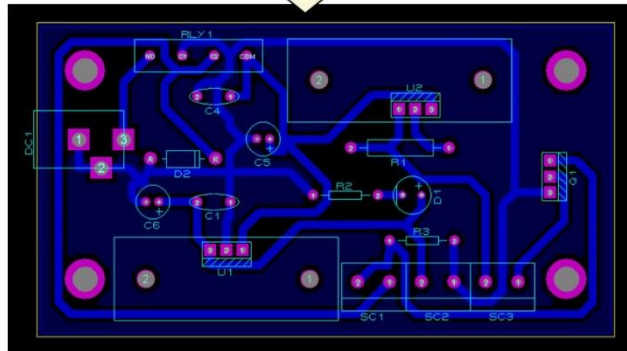
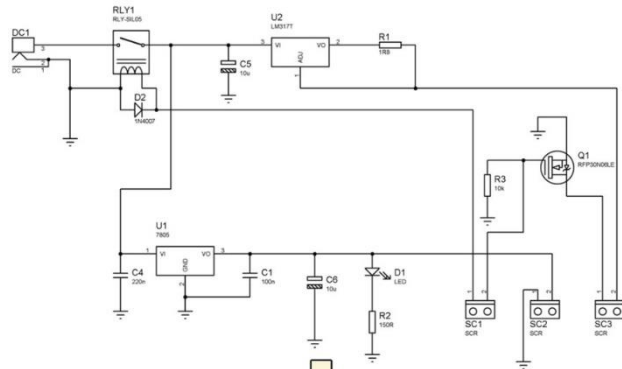
3.1 Η Αρχιτεκτονική του Συστήματος



Εικόνα 30 Η κατασκευή του συστήματος και το απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας

Η κατασκευή του συστήματος σχεδιάστηκε ώστε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη έτσι ώστε να είναι εύκολη στην μεταφορά και να χωράει σε ένα εργαστηριακό πάγκο μαζί με τον απαραίτητο υπολογιστή και τα φύλλα μετρήσεων των σπουδαστών. Ζυγίζει λιγότερο από δύο κιλά και έχει διαστάσεις 22cm x 20cm x 10cm. Αποτελείται από τέσσερα ξεχωριστά υποσυστήματα που συνδέονται μεταξύ τους με καλώδια και καλωδιωταινίες. Κάθε υποσύστημα έχει συγκεκριμένες λειτουργίες εύκολα αντιληπτές από τους σπουδαστές, οι οποίες περιγράφονται εκτενώς στις επόμενες παραγράφους. Οι πλακέτες του συστήματος έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα τόσο από επαγγελματικά εργαστήρια παρασκευής πλακετών όσο και από ιδιώτες με λίγα βασικά εργαλεία. Οι πλακέτες είναι μίας όψεως ώστε να μη χρειάζονται νίπες που ενώνουν τις διαφορετικές στρώσεις του χαλκού και απαιτούν ειδική επεξεργασία και οι ανοχές αποστάσεων και το πλάτος των αγωγών είναι αρκετά μεγάλες ώστε να ελαχιστοποιούνται τα προβλήματα από τις ατέλειες στην τελική πλακέτα, με εξαίρεση την πλακέτα της μονάδας Αισθητήρων

όπου υπάρχει περιορισμός διαθέσιμου χώρου και σχήματος προκειμένου να μην καλύπτει τα ενεργά στοιχεία του φωτοβολταϊκού.



Εικόνα 31 Τα στάδια κατασκευής των πλακετών:
 1. Σχεδίαση Σχηματικού, 2. Σχεδίαση Layout, 3. Εκτύπωση όψεως χαλκού (Bottom Copper), 4. Κατασκευή και Συναρμολόγηση

Όλο το σύστημα εσωκλείεται σε προστατευτικό κουτί (το οποίο εύκολα αφαιρείται) κατασκευασμένο από διάφανο Plexiglass έτσι ώστε να μπορούν οι σπουδαστές να βλέπουν το εσωτερικό του.

Τα υποσυστήματα από τα οποία αποτελείται το σύστημα είναι τα εξής

α) Η μονάδα Αισθητήρων (Sensor Unit,- SU) Αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ τεσσάρων στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά, δύο LEDs των 3W το καθένα συνδεδεμένα σε σειρά εγκατεστημένα επάνω σε ψήκτρα που αποτελούν την φωτεινή πηγή του συστήματος, ένα προγραμματιζόμενο υψηλής ανάλυσης μετατροπέα έντασης φωτός σε συχνότητα (TSL230R), ένα ψηφιακό θερμομέτρο (DS18B20) που μετράει την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού και ένα σερβοκινητήρα που αλλάζει την γωνία του φωτοβολταϊκού σε σχέση με την φωτεινή πηγή. Επάνω στο φωτοβολταϊκό υπάρχουν αισθητήρες θερμοκρασίας και έντασης φωτός. Η ένταση του φωτός που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό ρυθμίζεται αλλάζοντας τον κύκλο λειτουργίας των διόδων εκπομπής φωτός ενώ η γωνία του φωτοβολταϊκού σε σχέση με την φωτεινή πηγή ρυθμίζεται από ένα σερβοκινητήρα. Τα σήματα του ρεύματος και της τάσης του φωτοβολταϊκού ενισχύονται και μετατρέπονται από κατάλληλο κύκλωμα στην πλακέτα επεξεργασίας, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.4 παρακάτω.

Η μονάδα SU εσωκλείεται σε ξεχωριστό αδιαφανές κουτί ώστε οι μετρήσεις του φωτοβολταϊκού να μην επηρεάζονται από το φως του περιβάλλοντος

β) Η μονάδα Τροφοδοσίας (Power Supply Unit-PSU), που παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα κατάλληλης μορφής στο υπόλοιπο σύστημα. Συγκεκριμένα αποτελείται από μια πηγή DC τάσης που παρέχει σταθεροποιημένη τάση 5V στα ολοκληρωμένα και τον σερβοκινητήρα του συστήματος και από μία πηγή συνεχούς ρεύματος 700mA που τροφοδοτεί τα LED της φωτεινής πηγής.

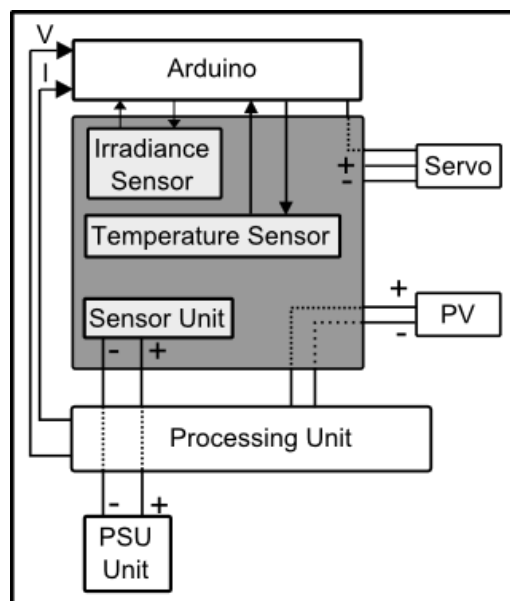
γ) Η μονάδα Επεξεργασίας (Processing Unit PU), περιέχει ένα ψηφιακό ποτενσιόμετρο το οποίο συνδέεται με το φωτοβολταϊκό στην πλακέτα αισθητήρων και το οποίο ελέγχεται από την πλακέτα ελέγχου. Δέχεται τα σήματα της απόκρισης του φωτοβολταϊκού και ενισχύει το σήμα της τάσης ώστε να έρθει στα όρια της μέτρησης του ADC ενώ ταυτόχρονα μετατρέπει το σήμα του ρεύματος σε σήμα τάσης ώστε να μπορεί να μετρηθεί από τον ADC του συστήματος.

δ) Η μονάδα Ελέγχου (Control Unit CU), είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά εντολών από τον υπολογιστή προς το σύστημα και για τη μεταφορά των μετρήσεων ρεύματος, τάσης, θερμοκρασίας και έντασης φωτός που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στον υπολογιστή. Η μονάδα αυτή αναπτύχθηκε επάνω στην ανοιχτή πλατφόρμα ανάπτυξης ηλεκτρονικών Arduino Duemilanove που χρησιμοποιεί των

μικροελεγκτή AVR ATmega328 της εταιρείας ATMEL. Ο μικροελεγκτής της πλατφόρμας προγραμματίζεται χρησιμοποιώντας την γλώσσα προγραμματισμού Wiring (παράγωγη της γλώσσας Processing και παρόμοια με C/C++). Συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB, στον οποίο εμφανίζεται σαν εικονική σειριακή θύρα.

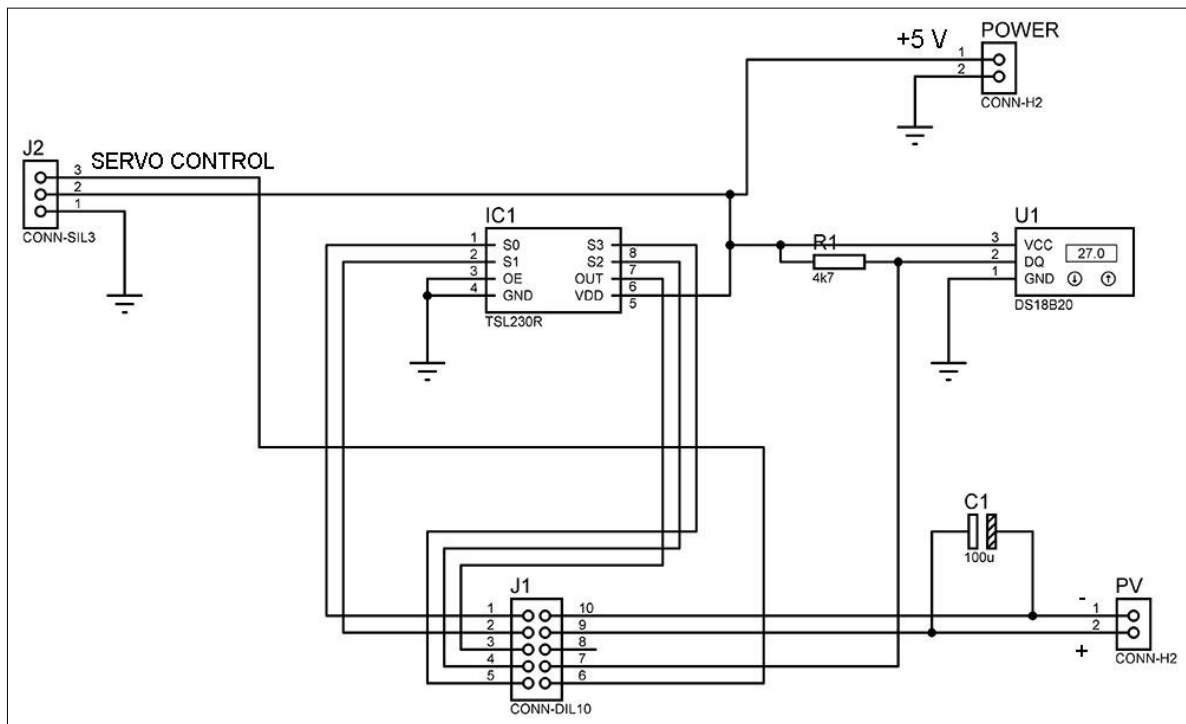
Στα επόμενα υποκεφάλαια περιγράφονται αναλυτικά τα επιμέρους υποσυστήματα.

3.2 Μονάδα Αισθητήρων



Εικόνα 32 Απλουστευμένο διάγραμμα Πλακέτας Αισθητήρων

Η μονάδα αισθητήρων περιέχει κυρίως έναν αισθητήρα θερμοκρασίας και έναν αισθητήρα φωτός. Είναι σχεδιασμένη να έχει μικρό μέγεθος και σχήμα ώστε να εφαρμόζεται επάνω στο φωτοβολταϊκό πάνελ με την βοήθεια ενός ελάσματος από αλουμίνιο με τέτοιον τρόπο ώστε να μην εμποδίζει την διέλευση του φωτός στα ενεργά στοιχεία του φωτοβολταϊκού. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια των μετρήσεων και να μειωθεί όσο το δυνατόν το σφάλμα μέτρησης οι αισθητήρες της πλακέτας έχουν τοποθετηθεί επάνω στην ψήκτρα απέναντι από το κέντρο του φωτοβολταϊκού από την πλευρά των διόδων εκπομπής φωτός και εφάπτονται στην επιφάνεια του πάνελ.



Εικόνα 33 Σχεδιάγραμμα της πλακέτας αισθητήρων

Το λεπτομερές σχεδιάγραμμα της πλακέτας αισθητήρων δίδεται στην Εικόνα 33, όπου αποτελείται κυρίως από τα εξής μέρη:

α) U1 είναι ο αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20

β) IC1 είναι ο αισθητήρας φωτεινής ακτινοβολίας TSL230R

γ) J2 είναι οι βάσεις σύνδεσης για τον σερβοκινητήρα ο οποίος ελέγχει/καθορίζει τη γωνία στρέψης, του φωτοβολταϊκού πάνελ

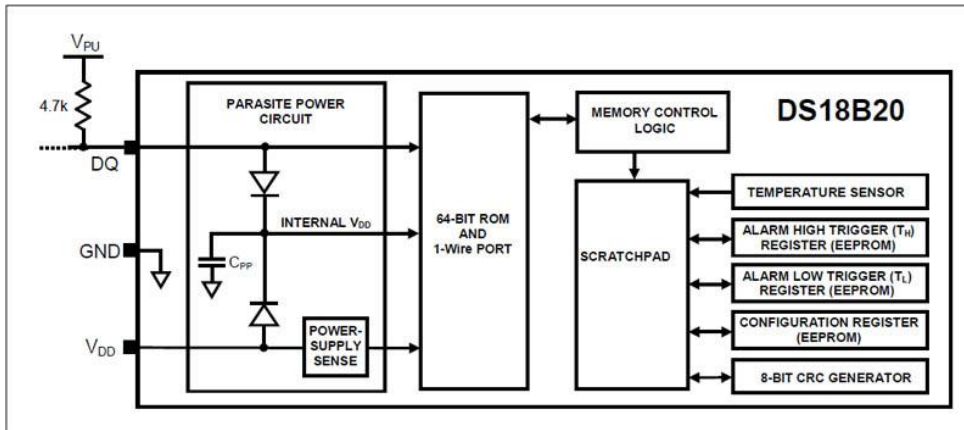
δ) PV είναι οι βάσεις σύνδεσης των ακροδεκτών του φωτοβολταϊκού

ε) J1 είναι η βάση σύνδεσης της καλωδιωτικής σύνδεσης με την πλακέτα επεξεργασίας. Η εν λόγω καλωδιωτική είναι μια εύκαμπτη καλωδιωτική 10 αγωγών μέσω της οποίας συνδέονται στην πλακέτα επεξεργασίας τα εξής:

- Το σήμα ελέγχου του σερβοκινητήρα
- Πέντε σήματα για τον έλεγχο και την μεταφορά των μετρήσεων του αισθητήρα φωτεινής ακτινοβολίας
- Το σήμα ελέγχου και μεταφοράς μετρήσεων του αισθητήρα θερμοκρασίας
- Δύο αγωγοί συνδεδεμένοι στους ακροδέκτες σύνδεσης του φωτοβολταϊκού
- Δύο αγωγοί για την τροφοδοσία τόσο του σερβοκινητήρα και των αισθητήρων της πλακέτας

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά οι αισθητήρες θερμοκρασίας και έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας.

3.2.1 Αισθητήρας θερμοκρασίας:



Εικόνα 34 Μπλόκ διάγραμμα λειτουργίας του αισθητήρα θερμοκρασίας

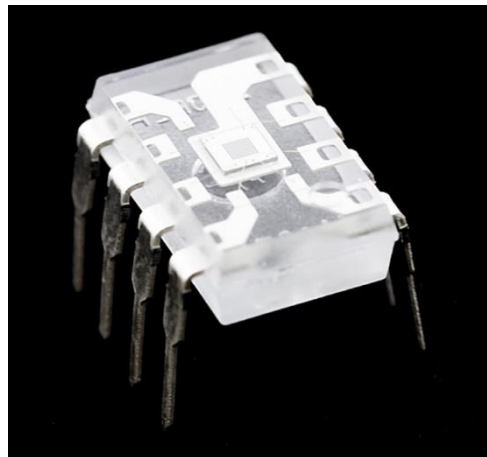
Ο αισθητήρας θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται στην πλακέτα αισθητήρων είναι ο DS18B20 της εταιρείας Maxim (Το μπλοκ διάγραμμα του φαίνεται στην Εικόνα 34). Πρόκειται για ένα ψηφιακό θερμόμετρο ανάλυσης 12 bit. Το εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας είναι από -55°C έως και $+125^{\circ}\text{C}$. Η ακρίβεια του DS18B20 για αυτό το εύρος θερμοκρασιών είναι $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Το θερμόμετρο επικοινωνεί μέσω του πρωτοκόλλου 1-Wire που εξ' ορισμού χρησιμοποιεί μόνο ένα αγωγό για τη μεταφορά των σημάτων ελέγχου και των μετρήσεων εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο πολύτιμο χώρο και ψηφιακές θύρες από τον μικροελεγκτή. Από κατασκευής έχει ενσωματωμένο ένα μοναδικό 64-bit κωδικό στην μνήμη ROM που αποτελεί την διεύθυνσή του κατά την επικοινωνία με τον μικροελεγκτή του συστήματος. Αυτός ο 64-bit κωδικός επιτρέπει την παράλληλη λειτουργία του σε συνδυασμό με άλλες συσκευές που είναι συνδεδεμένες στον ίδιο δίαυλο επικοινωνίας και υλοποιούν το πρωτόκολλο 1-Wire. Απαραίτητη είναι μία pullup αντίσταση $5\text{k}\Omega$ στην γραμμή ελέγχου για να επιτρέπει την χρήση της γραμμής από άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα όταν η θύρα βρίσκεται σε κατάσταση υψηλής εμπέδησης. Η τάση λειτουργίας του είναι από 3V έως 5.5V, συμβατή με την τάση τροφοδοσίας των υπολοίπων ολοκληρωμένων του συστήματος.

Το ολοκληρωμένο επιλέχθηκε σε συσκευασία TO-92 (Εικόνα 35) λόγω του μικρού του μεγέθους.



Εικόνα 35 Το
DS18B20 σε
συσκευασία TO-92

3.2.2 Αισθητήρας Έντασης Φωτεινής Ακτινοβολίας



Εικόνα 36 Φωτογραφία του
αισθητήρα έντασης φωτός TSL230R-
LF

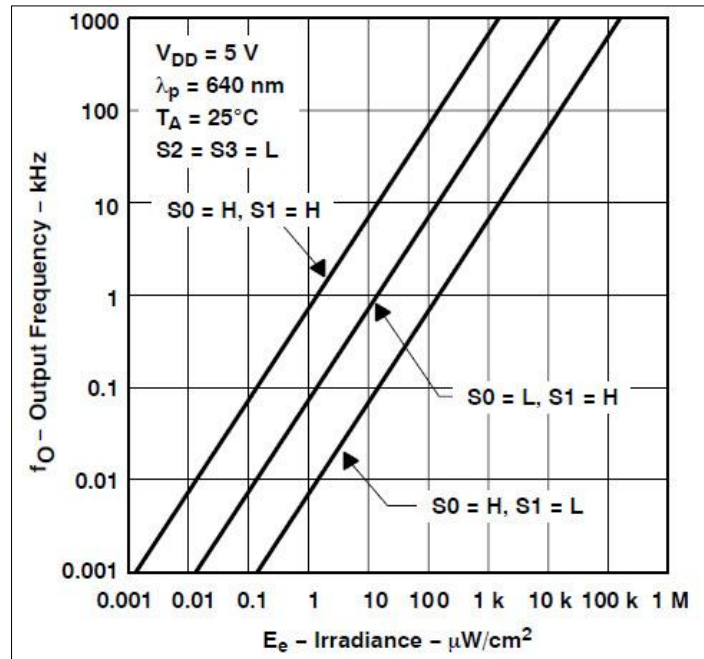
Η μέτρηση της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας γίνεται μέσω ενός αισθητήρα TSL230R-LF της εταιρίας TAOS (Texas Advanced Optoelectronic Solutions) που φαίνεται στην Εικόνα 36. Πρόκειται για έναν υψηλής ανάλυσης προγραμματιζόμενο μετατροπέα έντασης φωτός σε συχνότητα. Αποτελείται από μία ρυθμιζόμενη φωτοδιόδο πυριτίου και ένα μετατροπέα ρεύματος σε συχνότητα σε ένα μονολιθικό ολοκληρωμένο τεχνολογίας CMOS συσκευασμένο σε διάφανη ρητίνη ώστε να επιτρέπει την έλευση του φωτός στην επιφάνεια της φωτοδιόδου. Στην έξοδό του παρουσιάζει παλμοσειρά ή τετραγωνικό παλμό (με κύκλο λειτουργίας 50%) συχνότητας ανάλογης της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του ολοκληρωμένου. Η ευαισθησία του ολοκληρωμένου στο φως είναι

ρυθμιζόμενη σε τρεις κλίμακες (εκτός της κατάσταση απενεργοποίησης της ευαισθησίας όπου το ολοκληρωμένο απενεργοποιείται και δεν βγάζει σήματα στην έξοδο του). Κάθε κλίμακα είναι δέκα φορές πιο ευαίσθητη από την προηγούμενη. Αυτό επιτυγχάνεται διαιρώντας την επιφάνεια της φωτοδιόδου σε τομείς που μπορούν να ενεργοποιηθούν ή να απενεργοποιηθούν για να προσφέρουν την απαιτούμενη ευαισθησία. Η ευαισθησία ρυθμίζεται από την λογική τιμή των ακροδεκτών S0 και S1 (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Ρυθμίσεις ευαισθησίας του αισθητήρα έντασης φωτός

S1	S0	SENSITIVITY
L	L	Power Down
L	H	1x
H	L	10x
H	H	100x

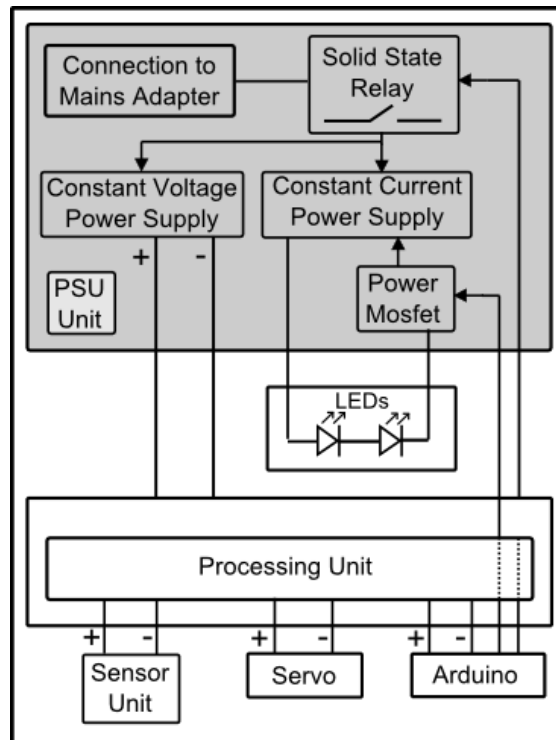
Ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του ολοκληρωμένου η συχνότητα της εξόδου μπορεί να μεταβληθεί από 1 Hz μέχρι 1 MHz, συχνότητα αρκετά μεγαλύτερη από την μέγιστη συχνότητα που μπορεί να μετρήσει ο μικροελεγκτής του συστήματος. Το TSL230R είναι εξοπλισμένο με έναν διαιρέτη συχνότητας 2x, 10x ή 100x ρυθμιζόμενο από την λογική τιμή των ακροδεκτών S2 και S3, επιτρέποντας την μέτρηση της εξόδου και από πιο αργούς μικροελεγκτές.



Εικόνα 37 Συχνότητα εξόδου TS230R σε σχέση με την Ένταση Φωτεινής Ακτινοβολίας

Ο ακροδέκτης OE χρησιμοποιείται για να απενεργοποιήσει το ολοκληρωμένο και να οδηγήσει την έξοδο σε κατάσταση υψηλής εμπέδησης προκειμένου η γραμμή εξόδου να χρησιμοποιηθεί από άλλα ολοκληρωμένα που την μοιράζονται. Αυτή η λειτουργία δεν είναι απαραίτητη για την εφαρμογή και ο ακροδέκτης έχει ενωθεί με την γείωση του κυκλώματος. Η τάση τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου είναι από 2.7V μέχρι 5.5V (στο σύστημα τροφοδοτείται με 5V) και λειτουργεί σε θερμοκρασίες από -25°C μέχρι 70°C

3.3 Μονάδα τροφοδοσίας



Εικόνα 38 Γενικό Διάγραμμα της Πλακέτας Τροφοδοσίας

Η πλακέτα τροφοδοσίας (Εικόνα 38) εκτελεί τις εξής λειτουργίες:

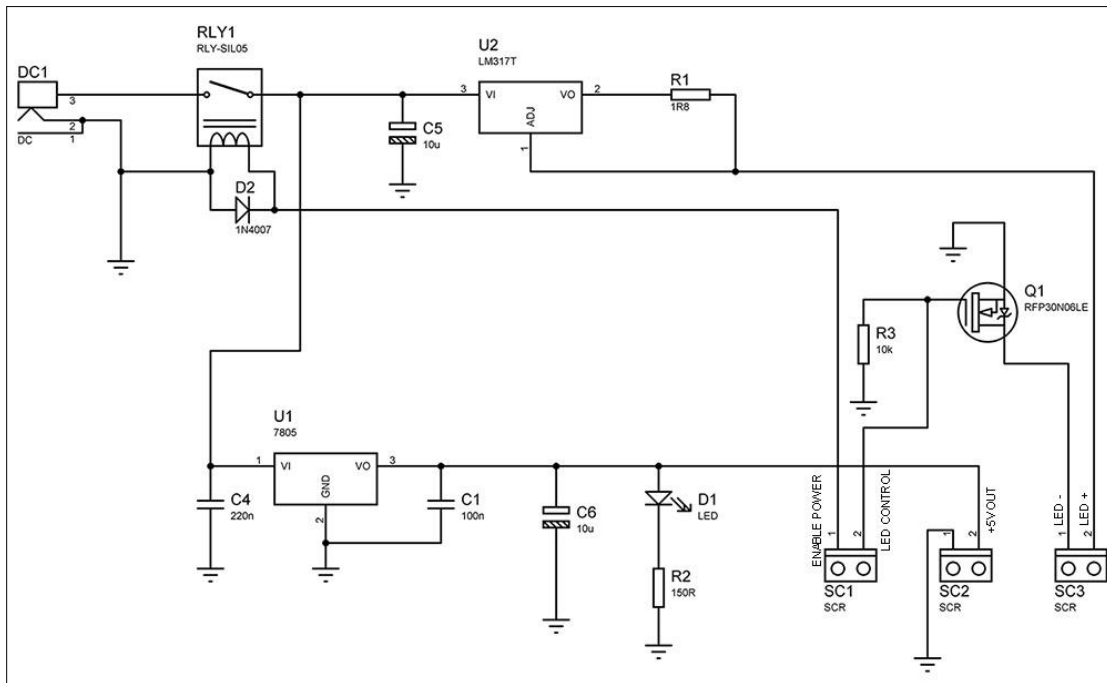
- α) Τροφοδοτεί με τάση 5V όλα τα κυκλώματα των πλακετών του συστήματος του συστήματος
- β) παρέχει την απαραίτητη ισχύ στις διόδους εκπομπής φωτός ώστε το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας τους να είναι 700mA
- γ) ρυθμίζει την φωτεινότητα των διόδων εκπομπής φωτός.

Αναλυτικά, η πλακέτα αποτελείται από τα εξής κυκλώματα: (Εικόνα 39)

1) Έναν εξωτερικό μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος (DC1): Για λόγους ασφαλείας η πλακέτα δεν συνδέεται απ' ευθείας με το δίκτυο της ΔΕΗ αλλά μέσω ενός εξωτερικού μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος που μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα του δικτύου σε συνεχές ρεύμα DC τάσεως 9V και μέγιστου ρεύματος 1.5A.

2) Ένα ρελέ στερεάς κατάστασης (solid state relay) το οποίο ελέγχει την παροχή ισχύος στο κύκλωμα και ελέγχεται από τον κεντρικό μικροελεγκτή του συστήματος στην πλακέτα επεξεργασίας.

- 3) Μία πηγή σταθεροποιημένης τάσης 5V (Constant Voltage Power Supply)
- 4) Μία πηγή σταθεροποιημένου ρεύματος 700mA (Constant Current Power Supply)
- 5) Ένα Power MOSFET (Q1) που λειτουργεί σαν ρυθμιστής της έντασης της φωτεινής πηγής
- 6) Μία ενδεικτική δίοδος εκπομπής φωτός (Test LED) η οποία εκπέμπει κόκκινο φως όταν το σύστημα τροφοδοτείται



Εικόνα 39 Σχεδιάγραμμα της πλακέτας τροφοδοσίας

Στο σχεδιάγραμμα (Εικόνα 39) φαίνεται αναλυτικά η πλακέτα τροφοδοσίας όπου:

DC1 είναι σημείο σύνδεσης με τον εξωτερικό μετασχηματιστή

RLY1 είναι το Solid state ρελέ (RLY-SIL05) που ελέγχει την παροχή ισχύος στο σύστημα,

U1 είναι το ολοκληρωμένο (LM7805) που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα του σταθεροποιητή τάσης,

U2 είναι το ολοκληρωμένο (LM317T) που λειτουργεί σαν σταθεροποιητής ρεύματος,

Q1 είναι το Power MOSFET (RFP30N06LE) που ρυθμίζει την ένταση της φωτεινής πηγής.

D1 η ενδεικτική δίοδος εκπομπής φωτός που εκπέμπει κόκκινο φως όταν το σύστημα τροφοδοτείται.

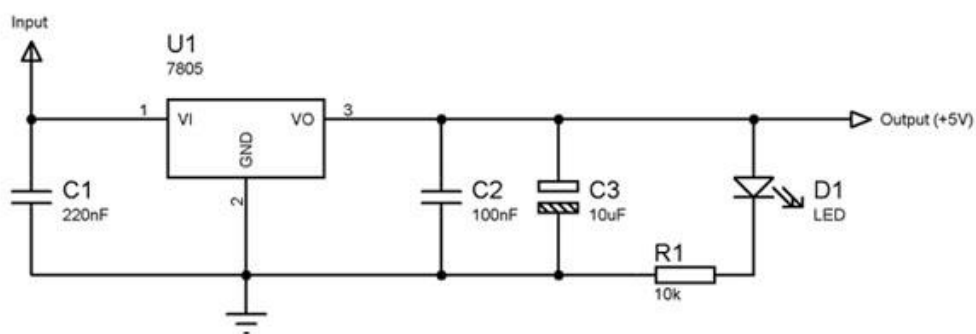
SC1 είναι η βάση σύνδεσης των σημάτων ελέγχου τροφοδοσίας και έντασης της φωτεινής πηγής που έρχονται από την πλακέτα ελέγχου

SC2 είναι η βάση σύνδεσης από την οποία διανέμεται το ηλεκτρικό ρεύμα τάσεως 5V στα υπόλοιπα κυκλώματα

SC3 είναι η βάση σύνδεσης των LED της φωτεινής πηγής

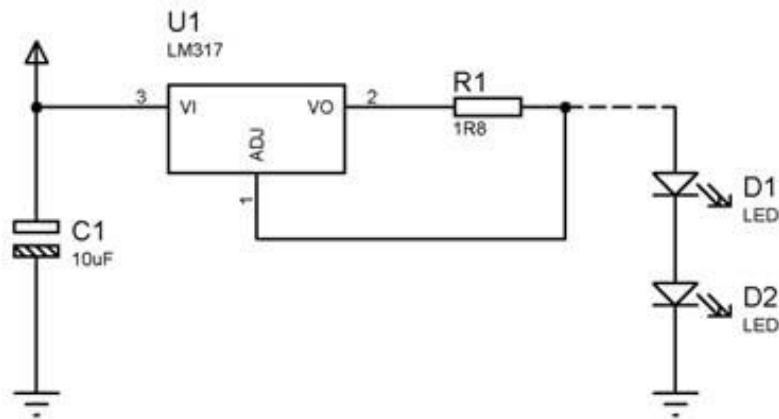
Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά τα κυριότερα υποκυκλώματα της πλακέτας τροφοδοσίας

3.3.1 Σταθεροποιητής Τάσης



Εικόνα 40 Τυπικό σχεδιάγραμμα λειτουργίας του LM7805 ως σταθεροποιητή τάσης 5V

Το υποκύκλωμα του σταθεροποιητή τάσης βασίζεται στο ολοκληρωμένο LM7805, το που παρέχει μέγιστο ρεύμα 1A και σταθεροποιημένη τάση 5V (Εικόνα 40). Οι τρεις πυκνωτές που βρίσκονται στην είσοδο και έξοδο του ολοκληρωμένου βοηθούν στην εξομάλυνση της τάσης και την μεταβατική απόκρισή του. Ταυτόχρονα μία διόδος εκπομπής κόκκινου φωτός (με την κατάλληλη αντίσταση σε σειρά για τον περιορισμό του ρεύματος που την διατρέχει), είναι συνδεδεμένη στην έξοδο του ολοκληρωμένου ως ένδειξη παροχής ισχύος στα υπόλοιπα κυκλώματα. Από την έξοδο αυτού του υποκυκλώματος τροφοδοτούνται όλα τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος που απαιτούν 5V για την λειτουργία τους, όπως τα ολοκληρωμένα και ο σερβοκινητήρας.



Εικόνα 41 Το LM317 ως ρυθμιστής ρεύματος

3.3.2 Σταθεροποιητής Ρεύματος

Για την τροφοδοσία των διόδων εκπομπής φωτός υψηλής ισχύος που αποτελούν την φωτεινή πηγή για τις μετρήσεις υπάρχει ένα κύκλωμα σταθεροποίησης ρεύματος περιορισμένο στα 700 mA το οποίο υλοποιείται από ένα ολοκληρωμένο LM317 σε συνδεσμολογία ρυθμιστή ρεύματος. Για τον καθορισμό της αντίστασης R1 που πρέπει να χρησιμοποιηθεί ώστε το ανώτατο ρεύμα λειτουργίας των διόδων εκπομπής φωτός να περιορίζεται στα 700 mA, χρησιμοποιούμε τον νόμο του Ohm

$$R = \frac{V}{I}$$

όπου $V = 1.25V$ το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό λειτουργίας του LM317 και $I = 0.7A$ με αποτέλεσμα η επιθυμητή αντίσταση που θα τοποθετηθεί μεταξύ των τερματικών ADJ και Vout να είναι 1.8Ω. (Εικόνα 41). Η αντίσταση που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι πάνω από

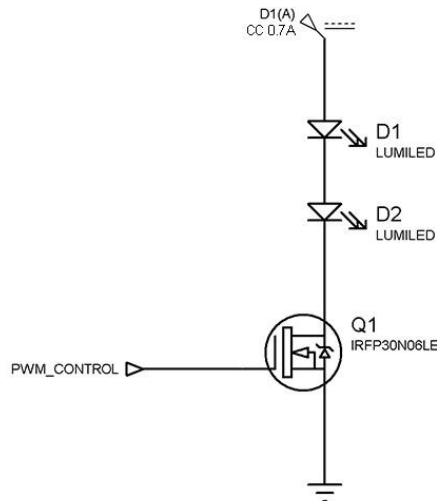
$$P = V \cdot I = 1,25V \cdot 0.7A = 0.875W .$$

Από τον τύπο

$$P = (V - V_f) \cdot I ,$$

όπου V η τάση τροφοδοσίας, V_f η πτώση τάσης της συσκευής και I το ρεύμα που διατρέχει την συσκευή, βρίσκουμε ότι η ισχύς που μετατρέπεται σε θερμότητα για $V = 9V$ ισούται με 2.1W, ισχύς αρκετά μεγάλη για να απαιτείται μία κατάλληλη ψήκτρα για την ομαλή λειτουργία του LM317.

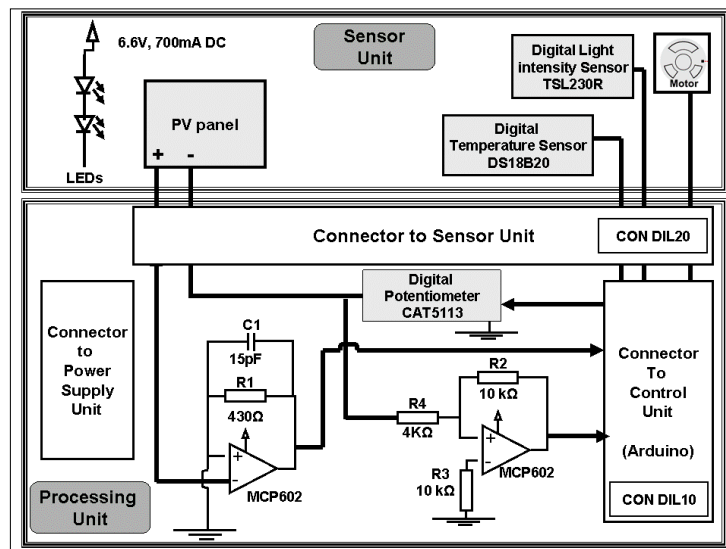
3.3.3 Έλεγχος της φωτεινής πηγής



Εικόνα 42 Κύκλωμα ελέγχου φωτεινής πηγής

Οι δίοδοι εκπομπή που περιγράφονται στην παράγραφο χρησιμοποιούνται σαν φωτεινή πηγή. Η ρύθμιση της φωτεινότητας των διόδων εκπομπής φωτός από τον μικροελεγκτή του συστήματος στην πλακέτα ελέγχου γίνεται με τον έλεγχο μέσω PWM ενός συνδεδεμένου σε σειρά (RFP30N06LE) N-type Power MOSFET (Εικόνα 42). Η αλλαγή στον κύκλο λειτουργίας παράγει το φαινόμενο της αλλαγής της φωτεινής ισχύος που εκπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

3.4 Μονάδα Επεξεργασίας



Εικόνα 43 Γενικό διάγραμμα της πλακέτας επεξεργασίας

Το γενικό διάγραμμα της πλακέτας επεξεργασίας δίδεται στην Εικόνα 43. Η πλακέτα επεξεργασίας είναι συνδεδεμένη μέσω καλωδίων με όλες τις υπόλοιπες και εκτελεί τις εξής λειτουργίες:

α) μεταβάλλει το φορτίο στα άκρα του φωτοβολταϊκού με τη χρήση ενός ψηφιακού ποτενσιόμετρου

β) ενισχύει την τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού με έναν κύκλωμα ενίσχυσης τάσης

γ) μετατρέπει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε τάση προκειμένου να σταλεί και ψηφιοποιηθεί στην κεντρική πλακέτα με κατάλληλο κύκλωμα

γ) διαμοιράζει η τροφοδοσία προς τις άλλες πλακέτες μέσα από τις καλωδιωτικές

δ) μεταφέρει τα σήματα ελέγχου από τον μικροελεγκτή προς τον σερβοκινητήρα που είναι συνδεδεμένος με την πλακέτα αισθητήρων και στο MOSFET που βρίσκεται στην πλακέτα τροφοδοσίας το οποίο ρυθμίζει την φωτεινότητα των διόδων εκπομπής φωτός

ε) συνδέεται με την καλωδιωτική 10 αγωγών (CON DIL 10) με την πλακέτα αισθητήρων και μεταφέρει των μετρήσεις του ρεύματος, τάσης, θερμοκρασίας και έντασης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στον μικροελεγκτή του συστήματος που βρίσκεται στην πλακέτα ελέγχου μέσω της καλωδιωτικής 20 αγωγών (CON DIL 20).

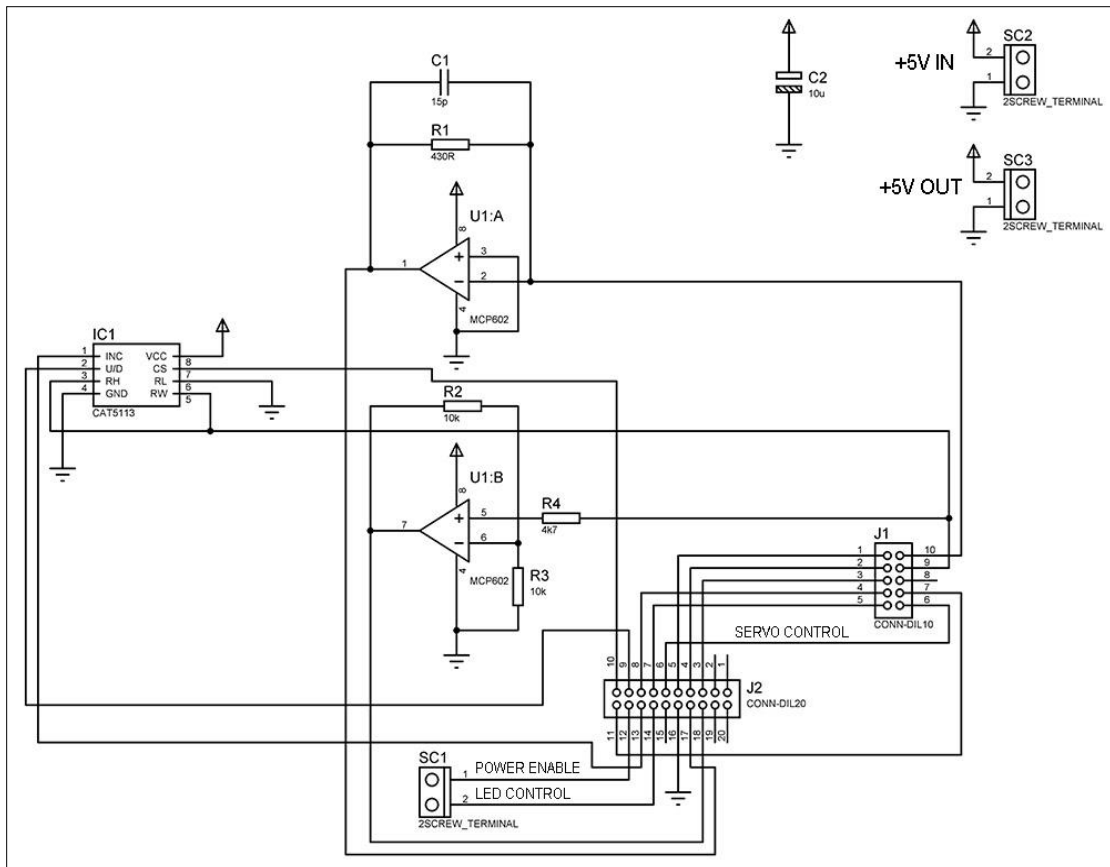
Για τη μεταβολή του φορτίου στα άκρα του φωτοβολταϊκού αρχικά μελετήθηκαν δύο λύσεις; α) η χρήση ενός N-type Power MOSFET με λειτουργία στην γραμμική του περιοχή και β) η χρήση ψηφιακού ποτενσιόμετρου. Η περίπτωση χρήσης του MOSFET εγκαταλείφθηκε για τους παρακάτω λόγους:

Η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταϊκού στις συνθήκες μέτρησης προκαλεί δυσκολίες στον έλεγχο της αντίστασης του τρανζίστορ. Το εύρος τάσεων που πρέπει να εφαρμοστεί στην πύλη του τρανζίστορ ώστε να πάρουμε το κατάλληλο φορτίο δεν υπερβαίνει μερικά mV. Σε αντίθεση με το MOSFET, το ψηφιακό ποτενσιόμετρο προσφέρει εύρος 100 διαφορετικών τιμών αντίστασης ανεξάρτητα από την ισχύ στα άκρα του φορτίου.

Οι ωμικές αντιστάσεις που είναι ενσωματωμένες στο ψηφιακό ποτενσιόμετρο προσφέρουν μεγαλύτερη σταθερότητα και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις σε σχέση με το MOSFET

Το ψηφιακό πρωτόκολλο επικοινωνίας με το ποτενσιόμετρο είναι ανθεκτικό απέναντι στον θόρυβο ο οποίος μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα με την στάθμη της τάσης της Πύλης του τρανζίστορ, αλλάζοντας την αντίστασή του.

Το μικρό μέγεθος του ψηφιακού ποτενσιόμετρου και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του κερδίζουν χώρο στην κατασκευή.



Εικόνα 44 Σχεδιάγραμμα της πλακέτας επεξεργασίας

Το λεπτομερές σχηματικό της πλακέτας επεξεργασίας φαίνεται στην Εικόνα 44, όπου :

IC1 είναι το ψηφιακό ποτενσιόμετρο CAT5113

U1A είναι το ολοκληρωμένο (MCP602) που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα μετατροπέα ρεύματος

U1B είναι το ολοκληρωμένο (MCP602) που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα ενισχυτή τάσης

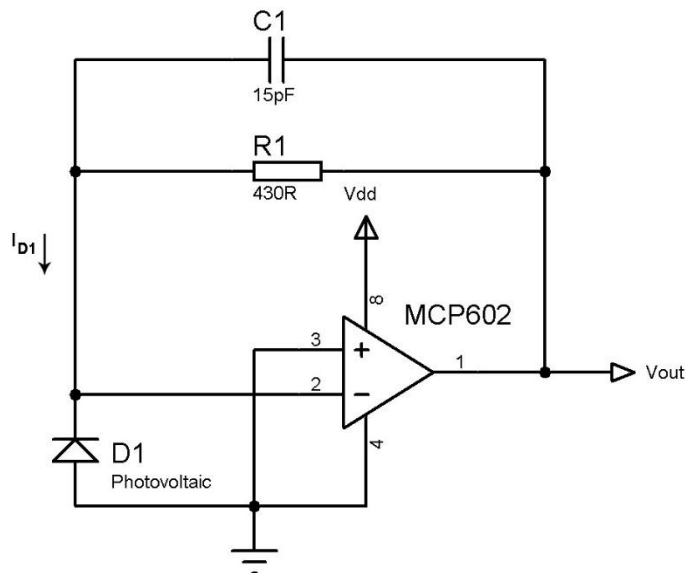
J1 είναι η καλωδιωτική σύνδεση με την πλακέτα αισθητήρων που μεταφέρει σήματα ελέγχου, την τροφοδοσία και τις μετρήσεις των αισθητήρων

J2 είναι η καλωδιωτική που μεταφέρει σήματα ελέγχου, την ενισχυμένη τάση και την τάση από τον μετατροπέα ρεύματος σε τάση στην πλακέτα ελέγχου

Για τη μέτρηση της τάσης στα άκρα του φωτοβολταϊκού και του ρεύματος που παράγεται σχεδιάστηκαν δύο κυκλώματα αντιστοίχως: το κύκλωμα ενίσχυσης τάσης και το κύκλωμα μετατροπής του ρεύματος σε τάση. Αυτά υλοποιήθηκαν με χρήση ενός διπλού, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, rail-to-rail τελεστικό ενισχυτή MCP602 της εταιρείας Microchip. Το ολοκληρωμένο MCP602 επιλέχθηκε λόγω του χαμηλού ρεύματος πόλωσης εισόδου, του χαμηλού θορύβου, της δυνατότητας τροφοδοσίας του από θετική πηγή τάσης και τα όρια των τάσεων εξόδου που φτάνουν κοντά στις τάσεις τροφοδοσίας του.

Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά τα κύρια στοιχεία της πλακέτας επεξεργασίας:

3.4.1 Κύκλωμα μετατροπέα ρεύματος



Εικόνα 45 Μετατροπέας ρεύματος σε τάση με χρήση του ολοκληρωμένου MCP602

Ο μετατροπέας ADC του συστήματος που κάνει την ψηφιοποίηση των τιμών τάσης και ρεύματος του φωτοβολταϊκού μπορεί να μετρήσει μόνο την διαφορά τάσης ενός σήματος σε σχέση με την γή. Προκειμένου να ψηφιοποιηθεί η τιμή του ρεύματος που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε διαφορά

τάσης από ένα κύκλωμα μετατροπής ρεύματος σε τάση. Για την υλοποίηση αυτού του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε ο τελεστικός ενισχυτής MCP602 σε συνδεσμολογία μετατροπέα ρεύματος-σε-τάση (Εικόνα 45). Σε αυτή την συνδεσμολογία το μη αναστρέφων τερματικό του τελεστικού είναι ενωμένο με την γείωση και το αναστρέφων είναι ενωμένο με την έξοδο του τελεστικού μέσω μίας αντίστασης R_2 . Έτσι, λόγω του τρόπου λειτουργίας του τελεστικού, το αναστρέφων τερματικό του βρίσκεται σε ίδια τάση με το μη αναστρέφων (εικονική γείωση).

Για αυξημένη σταθερότητα παράλληλα με την αντίσταση R_2 ενώνεται ένας πυκνωτής C_2 . Η έξοδος του τελεστικού συνδέεται με έναν από τους μετατροπείς ADC του μικροελεγκτή μετρώντας έτσι το ρεύμα που διατρέχει το φωτοβολταϊκό. (Αυτό να φαίνεται και στο σχήμα)

Το ρεύμα I_{D1} που παράγει το φωτοβολταϊκό δίνεται από την σχέση:

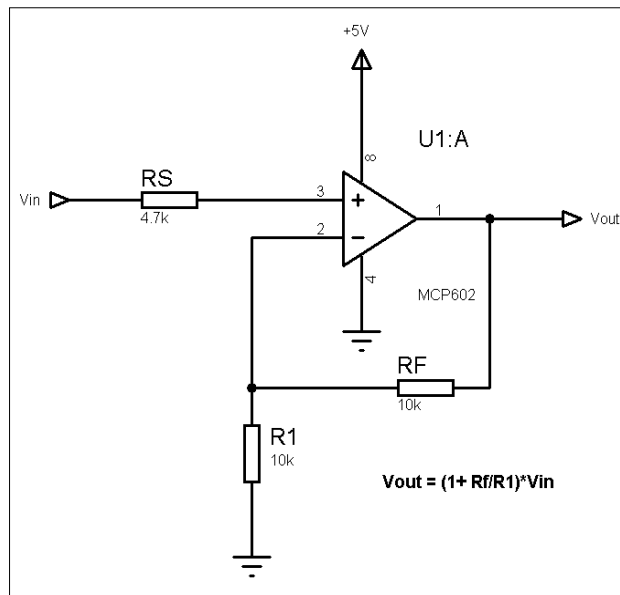
$$I_{D1} = \frac{(V_{inv} - V_{OUT})}{R_2} + I_{C2} = \frac{-V_{OUT}}{R_2} + I_{C2}$$

όπου V_{inv} είναι η τάση στο μη αναστρέφων τερματικό, V_{OUT} η τάση εξόδου και I_{C2} το ρεύμα που διατρέχει τον πυκνωτή C_2 . Επομένως η τάση εξόδου του (V_{OUT}) σε χαμηλές συχνότητες (όπου $I_{C2} = 0$) είναι:

$$V_{OUT} = -I_{D1} \cdot R_2$$

όπου το αρνητικό πρόσημο δηλώνει την φορά του ρεύματος.

3.4.2 Κύκλωμα ενισχυτή τάσης



Εικόνα 46 Σχεδιάγραμμα ενισχυτή τάσης

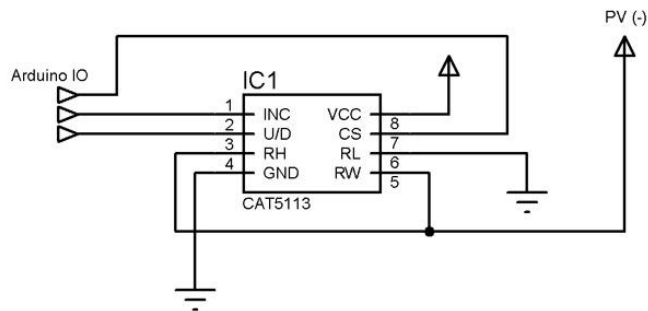
Προκειμένου να μετρηθούν οι τάσεις στα άκρα του φωτοβολταϊκού που βρίσκονται από 0 έως 2.5V χρειάζεται να ενισχυθούν 2 φορές ώστε να έρθουν στο εύρος μέτρησης 0-5V του ADC. Το κύκλωμα ενισχυτή τάσης που κάνει αυτή την ενίσχυση χρησιμοποιεί τον τελεστικό ενισχυτή MCP602 σε συνδεσμολογία μη αναστρέφοντος ενισχυτή τάσης (Εικόνα 46). Η τάση στην έξοδο του υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) * V_{IN}$$

όπου V_{OUT} είναι η τάση εξόδου του ενισχυτή, R_F η αντίσταση που ενώνει την έξοδο με το μη αναστρέφον τερματικό, R_1 η αντίσταση που ενώνει το μη αναστρέφον τερματικό με την γή και V_{IN} η τάση εισόδου.

Προκειμένου να πάρουμε την επιθυμητή ενίσχυση 2x που θα φέρει το πλάτος των μετρήσεων στο εύρος που μπορεί να μετρήσει ο ADC μετατροπείας του κεντρικού μικροελεγκτή χρησιμοποιούμε αντιστάσεις R_f και R_1 με λόγο 1:1 και τιμή 10kΩ. Η αντίσταση R_s χρησιμοποιείται για να εξουδετερώσει το σφάλμα ρεύματος πόλωσης εισόδου. Η τιμή της ισούται με $\frac{R_1 * R_F}{(R_1 + R_F)}$ και δεν επηρεάζει το κέρδος του ενισχυτή.

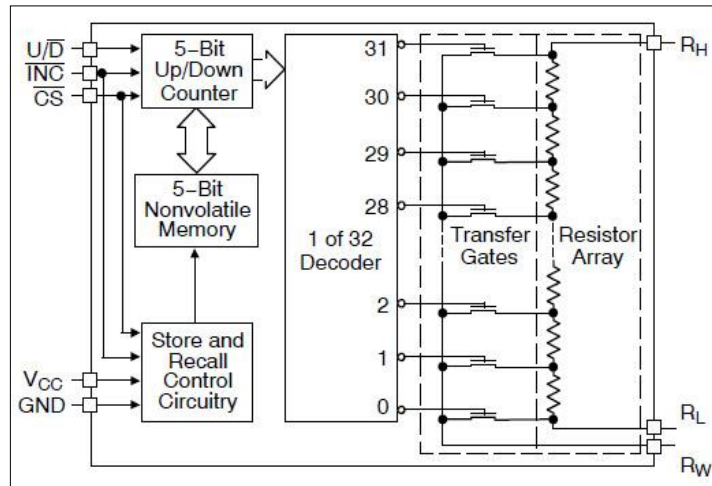
3.4.3 Το ψηφιακό ποτενσιόμετρο



Εικόνα 47 Τοπολογία σύνδεσης του ψηφιακού ποτενσιόμετρου

Για την μεταβολή του φορτίου στο φωτοβολταϊκό, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό ποτενσιόμετρο CAT5113 της εταιρείας ON Semiconductor συνδεδεμένο σε σειρά με το φωτοβολταϊκό (Εικόνα 47). Η επιλογή έγινε λόγω της χαμηλής παραγόμενης ισχύος των φωτοβολταϊκών υπό μελέτη που δεν ξεπερνά τις μέγιστες τιμές ισχύος στις οποίες μπορεί να λειτουργήσει το ποτενσιόμετρο και λόγω της δυνατότητας που παρέχει για ρύθμιση του φορτίου σε 100 διακριτά στάδια. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι ψηφιακό και χρησιμοποιεί τρεις ακροδέκτες για το έλεγχο και την επιλογή του ολοκληρωμένου. Η μέγιστη αντίσταση στο μοντέλο της επιλογής είναι $R_{max} = 1k\Omega$ και η ελάχιστη $R_{min} = 200\Omega$.

Στην Εικόνα 48 φαίνεται το εσωτερικό διάγραμμα λειτουργίας του CAT5113. Κάτω αριστερά εμφανίζεται η μονάδα Ελέγχου Αποθήκευσης και Ανάκλησης της θέσης του δρομέα R_w . Ακριβώς από επάνω εμφανίζεται η 5-bit μόνιμη μνήμη όπου αποθηκεύεται η θέση του δρομέα και από την οποία επαναφέρεται κατά την επαναφορά του ολοκληρωμένου από την κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ισχύος Standby, ενώ στην κορυφή εμφανίζεται ο μετρητής 5-bit που μετρά τις μεταβάσεις των ακροδεκτών ελέγχου U/D, INC και CS και τις στέλνει στον αποκωδικοποιητή που εμφανίζεται στα δεξιά και είναι υπεύθυνος για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των πυλών που αλλάζουν την συνολική αντίσταση του ολοκληρωμένου.



Εικόνα 48 Διάγραμμα λειτουργίας του ψηφιακού ποτενσιόμετρου CAT5113

Πίνακας 3 Προγραμματισμός ακροδεκτών CAT5113

INC	CS	U/D	Ενέργεια
HIGH to LOW	LOW	HIGH	Δρομέας προς H
HIGH to LOW	LOW	LOW	Δρομέας προς L
HIGH	LOW to HIGH	x	Αποθήκευση θέσης
LOW	LOW to HIGH	x	Standby χωρίς αποθήκευση
x	HIGH	x	Standby

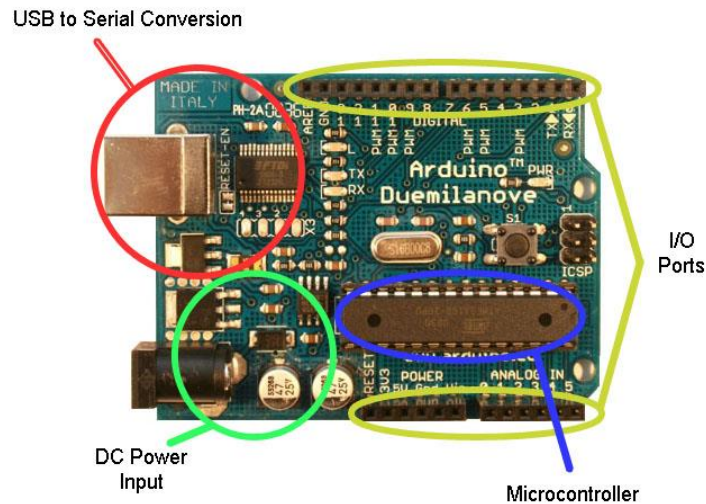
Με τον ακροδέκτη CS σε χαμηλό επίπεδο (LOW) το CAT5113 είναι ενεργοποιημένο και μπορεί να αντιδρά στις εισόδους U/D (up/down) και INC (increase).

Όταν ο ακροδέκτης U/D είναι σε κατάσταση HIGH, ο ακροδέκτης CS είναι σε κατάσταση LOW και γίνεται μετάβαση από υψηλό σε χαμηλό επίπεδο στον ακροδέκτη INC, ο δρομέας R_w μετατοπίζεται προς το τερματικό R_H και το φορτίο στα άκρα του φωτοβολταϊκού αυξάνεται. Για να ελαττωθεί το φορτίο που εφαρμόζεται στο φωτοβολταϊκό μετακινώντας τον δρομέα R_w προς τον ακροδέκτη R_L , κατά την μετάβαση του ακροδέκτη INC από υψηλό σε χαμηλό επίπεδο οι ακροδέκτες U/D και CS πρέπει να βρίσκονται σε χαμηλό επίπεδο (LOW). Εάν ο δρομέας βρίσκεται στην μέγιστη ή ελάχιστη δυνατή θέση δεν μετακινείται πέρα από αυτή όπως και το μηχανικό του ανάλογο.

Σε περίπτωση που ο ακροδέκτης CS μεταβαίνει από LOW σε HIGH ή βρίσκεται σε κατάσταση HIGH το ολοκληρωμένο μπορεί να αποθηκεύσει την τρέχουσα θέση του δρομέα στην εσωτερική του μνήμη και να μπει σε κατάσταση χαμηλής

κατανάλωσης ισχύος (Standby). Αυτές οι καταστάσεις λειτουργίας δεν χρησιμοποιούνται στο σύστημα.

3.5 Μονάδα Ελέγχου (Arduino)



Εικόνα 49: Φωτογραφία του περιβάλλοντος ανάπτυξης Arduino Duemilanove

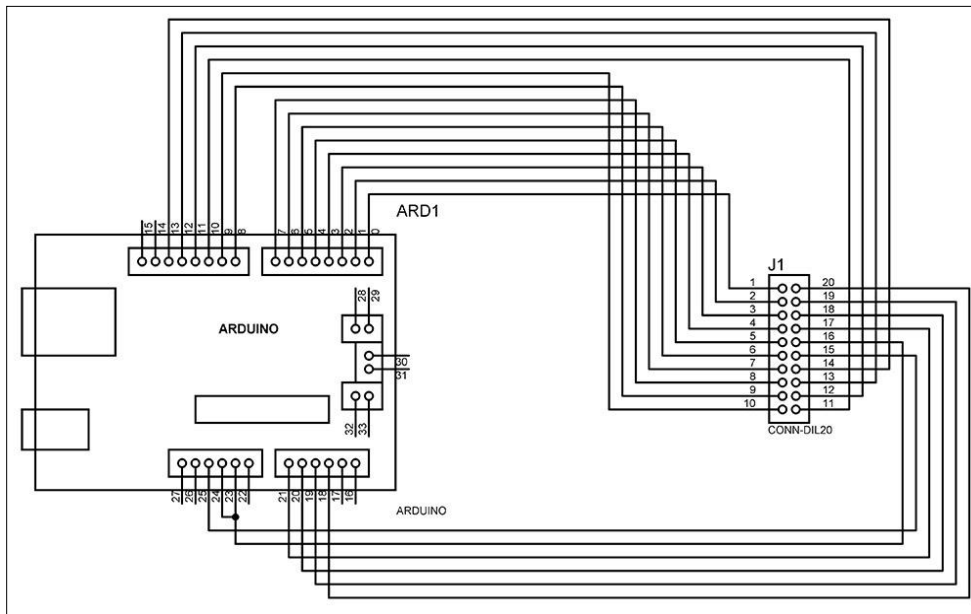
Η πλακέτα ελέγχου του συστήματος αποτελείται από την ανοιχτή πλατφόρμα ανάπτυξης ηλεκτρονικών Arduino και μία πλακέτα που ενώνει τους ακροδέκτες του arduino με την βάση σύνδεσης μια καλωδιωταινία 10 αγωγών που το συνδέει με την πλακέτα επεξεργασίας.

Το Arduino είναι μία ευέλικτη εμπορικά διαθέσιμη πλατφόρμα ανάπτυξης με ανοιχτή άδεια χρήσης και δημόσια διαθέσιμα σχεδιαγράμματα. Από τα διαθέσιμα στο εμπόριο μοντέλα επιλέχθηκε ο Arduino Duemilanove που φαίνεται στην Εικόνα 49.

Το μοντέλο του συστήματος αποτελείται από ένα 8-bit, 32kB Flash μικροελεγκτή ATmega 328 της εταιρείας ATMEL, σε μία πλακέτα με ενσωματωμένα κυκλώματα για εξωτερική τροφοδοσία 6V έως 20V DC από τον σύνδεσμο παροχής ισχύος ή από την θύρα USB μέσω της οποίας συνδέεται με τον υπολογιστή.

Το Arduino διαθέτει 14 ψηφιακούς ακροδέκτες Εισόδου/Εξόδου οι οποίοι μπορούν να τεθούν ως Είσοδοι ή Έξοδοι μέσω εντολών του λογισμικού που εκτελεί ο μικροελεγκτής. Μία σημαντική λεπτομέρεια είναι ότι επειδή αυτοί οι ακροδέκτες είναι τοποθετημένοι με ένα καθιερωμένο τρόπο, επιτρέπεται η επέκταση της λειτουργίας της πλακέτας με μονάδες επέκτασης γνωστές ως "shields". Οι ακροδέκτες

λειτουργούν σε λογικό επίπεδο 0V-5V και μπορούν να παρέχουν ή να καταβυθίζουν ρεύμα 40 mA. Συνδεδεμένες με αυτούς είναι προαιρετικές εσωτερικές αντιστάσεις pull-up 20-50kΩ. Από αυτούς τους ψηφιακούς ακροδέκτες οι 6 έχουν την δυνατότητα προγραμματισμού ώστε να λειτουργούν σαν 8-bit κανάλια PWM (pulse width modulation).



Εικόνα 50 Το Σχεδιάγραμμα της Πλακέτας Ελέγχου (J1: καλωδιωταινία σύνδεσης με την πλακέτα επεξεργασίας)

Επίσης, για την παραγωγή του σήματος ρολογιού χρησιμοποιείται ως ταλαντωτής ένα κύκλωμα με κρύσταλλο συχνότητας 16MHz

Επιπλέον ο μικροελεγκτής διαθέτει 5 αναλογικούς ακροδέκτες εισόδου συνδεδεμένους με 10-bit μετατροπείς ADC, με δυνατότητα να μετρούν τάση από 0 έως 5V. Κάποιοι από τους ακροδέκτες έχουν και άλλες λειτουργίες από τις οποίες οι πιο σημαντικές είναι οι εξής:

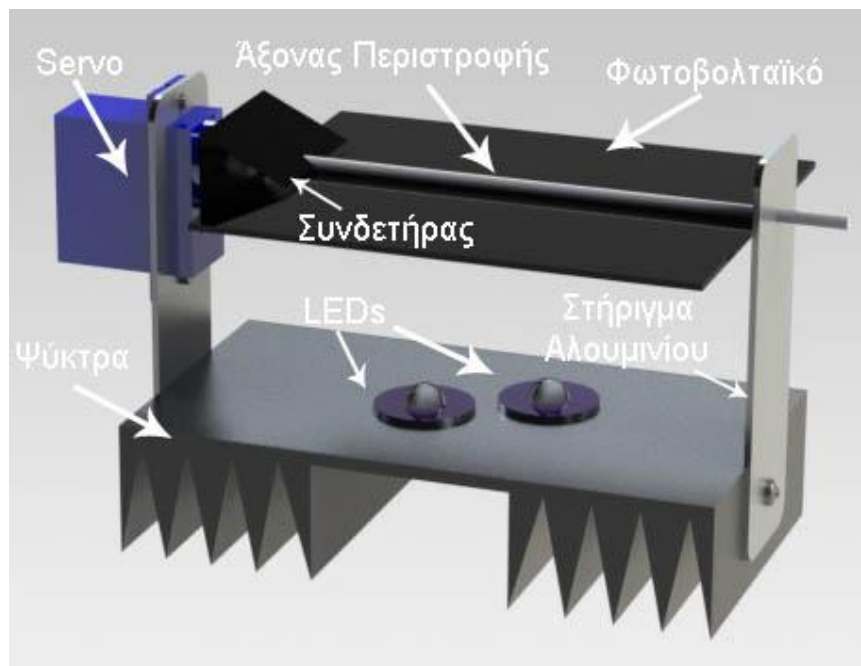
- Σειριακή USART θύρα: Οι ακροδέκτες 1 (RX) και 0 (TX) χρησιμοποιούνται για την λήψη και εκπομπή TTL σειριακών δεδομένων. Αυτοί οι ακροδέκτες είναι συνδεδεμένοι εσωτερικά με το ολοκληρωμένο FTDI FT232RL το οποίο αναλαμβάνει την μετατροπή της επικοινωνίας από Σειριακή σε USB και αντίστροφα.
- Εξωτερικές Διακοπές: Οι ακροδέκτες 2 και 3 μπορούν να ενεργοποιούν διακοπές ανάλογα με την κατάσταση ή την μετάβαση του σήματος που εφαρμόζεται.
- Μία πράσινη ενδεικτική δίοδος εκπομπής φωτός είναι συνδεδεμένη στον ακροδέκτη 13 η οποία φωτοβολεί όταν ο ακροδέκτης είναι σε κατάσταση HIGH.

- RESET: Όταν αυτός ο ακροδέκτης τεθεί σε κατάσταση LOW γίνεται επανεκκίνηση στον μικροελεγκτή και η εκτέλεση του προγράμματος μεταφέρεται στην αρχή.

Από τα 32kB της μνήμης Flash του μικροελεγκτή που διατίθενται για τον προγραμματισμό του, 2kB καταλαμβάνει ο bootloader που έρχεται εγκατεστημένος στο Arduino κατά την αγορά. Η χρησιμότητα του bootloader βρίσκεται στο ότι δεν χρειάζεται ειδικός προγραμματιστής για τον επαναπρογραμματισμό του μικροελεγκτή αλλά αντίθετα ο bootloader φορτώνει κάθε φορά το αρχείο που εγγράφεται σε μία θέση της μνήμης Flash του μικροελεγκτή από τον χρήστη μέσω της σύνδεσης USB. Το πρόγραμμα λειτουργίας (firmware) του Arduino είναι γραμμένο στην γλώσσα προγραμματισμού Wiring, μία γλώσσα παρόμοια με την C++ με περισσότερες απλουστεύσεις (βλ. Κεφάλαιο 4). Επιπλέον, διαθέσιμα στο ολοκληρωμένο του μικροελεγκτή για αποθήκευση δεδομένων είναι 1KB μνήμης SRAM και 512 byte μνήμης EEPROM.

Τα σχεδιαγράμματα του Arduino διανέμονται δημοσίως με την άδεια Creative Commons Share-alike 2.5 και είναι διαθέσιμα από τον ιστότοπο του Arduino

3.6 Μηχανικό μέρος



Εικόνα 51 Τρισδιάστατη απεικόνιση του μηχανικού μέρους από το πρόγραμμα σχεδίασης SolidWorks

Τα κύρια μέρη του μηχανικό μέρους του συστήματος είναι:

A) Ένα φωτοβολταϊκό ισχύος 250mW

B) Δύο δίοδοι εκπομπής φωτός ισχύος 3W η καθεμία καθώς και η κατάλληλη ψήκτρα για την απρόσκοπτη λειτουργία τους

Γ) Ένας σερβοκινητήρας για τη στρέψη του φωτοβολταϊκού (Εικόνα 51)

Επιπλέον, δύο στηρίγματα από φύλλο αλουμινίου, ένας άξονας διαμέτρου 0.2mm και ένας μεταλλικός συνδετήρας έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα έτσι ώστε να συγκρατούν το φωτοβολταϊκό σε απόσταση 3.5 cm από τις φωτεινές πηγές επιτρέποντάς του να αλλάζει την γωνία του μέσω του σερβοκινητήρα.



Εικόνα 52 Ο σερβοκινητήρας HXT900

Ως φωτοβολταϊκό στοιχείο προς μελέτη, χρησιμοποιείται ένα χαμηλής ισχύος 250mW φωτοβολταϊκό πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου συνολικών διαστάσεων 14 x 18 cm το οποίο αποτελείται από 4 ενεργά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά συνολικού εμβαδού 1600 mm². Όλο το φωτοβολταϊκό είναι συσκευασμένο σε διάφανη προστατευτική ρητίνη.

Οι δίοδοι εκπομπής λευκού φωτός έχουν ισχύ εκπομπής 3W η καθεμία και θερμοκρασία χρώματος 6000 - 6200K. Το ρεύμα λειτουργίας τους φτάνει τα 700mA ενώ η τάση λειτουργίας τους κυμαίνεται από 3.4V έως 3.6V. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται από -40 έως 80° C.

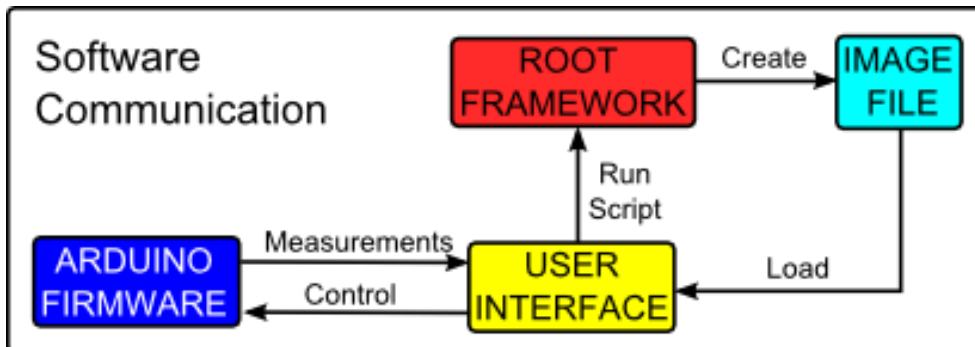
Ο σερβοκινητήρας: Για την στρέψη του φωτοβολταϊκού σε σχέση με την φωτεινή πηγή χρησιμοποιείται ένας αναλογικός σερβοκινητήρας Hextronik HXT900 (Εικόνα 52). Η χρήση σερβοκινητήρα επιλέχτηκε γιατί το συγκεκριμένο είδος κινητήρα

επιτρέπει τον έλεγχο της θέσης του άξονα μέσω ενός ενσωματωμένου συστήματος ανάδρασης το οποίο σε συνδυασμό με ένα μηχανισμό οδήγησης ρυθμίζει την ροπή του κινητήρα. Ο συγκεκριμένος σερβοκινητήρας έχει ταχύτητα $0.12\text{s}/60^\circ$ και η ροπή του φτάνει τα 2.5 kg-cm , αρκετή για την απρόσκοπτη λειτουργία της κατασκευής. Η τάση λειτουργίας του κυμαίνεται από 3V έως 6V και λόγω της σχετικά χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και απλότητας σχεδιασμού, τροφοδοτείται από την ίδια πηγή που τροφοδοτεί τα ολοκληρωμένα κυκλώματα της πλακέτας. Βρίσκεται στο άκρο του φωτοβολταϊκού στοιχείου και είναι βιδωμένος σε σταθερό σημείο που ενώνεται με την ψήκτρα των LEDs (Εικόνα 51). Προκειμένου να οδηγηθεί στην σωστή γωνία στρέψης χρησιμοποιείται ένα σήμα ελέγχου PWM (pulse width modulation) περιόδου 20ms και διαφορετικού πλάτους ανάλογα με της επιθυμητής γωνίας, το οποίο παρέχεται από το Arduino μέσω της καλωδιωτικής 10 αγωγών. Το φωτοβολταϊκό που είναι συνδεδεμένο επάνω στρέφεται γύρω από τον άξονα περιστροφής που διατρέχει το μήκος του φωτοβολταϊκού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

4.1 Γενική περιγραφή



Εικόνα 53 Επικοινωνία μεταξύ του Λογισμικού

Το λογισμικό του συστήματος τρέχει σε λειτουργικά συστήματα Windows της Microsoft. Αποτελείται από τρία μέρη: το firmware της πλατφόρμας Arduino, το Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη (GUI) και το πλαίσιο ανάλυσης δεδομένων ROOT.

Το firmware του Arduino τρέχει στην πλατφόρμα ανάπτυξης και είναι ανεξάρτητο του λειτουργικού συστήματος του Η/Υ. Σκοπός του είναι να δέχεται εντολές από το πρόγραμμα που τρέχει στον Η/Υ, να ελέγχει το υπόλοιπο σύστημα, να παίρνει τις μετρήσεις από τους αισθητήρες και αφού τις μετατρέψει σε κατάλληλη μορφή σύμφωνα με το πρωτόκολλο επικοινωνίας να τις μεταφέρει στον Η/Υ για περαιτέρω επεξεργασία.

Το Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη που επικοινωνεί με το Arduino αναπτύχθηκε στην γλώσσα προγραμματισμού C# μέσα από το προγραμματιστικό περιβάλλον Visual Studio 2010 Professional, δωρεάν διαθέσιμο στους φοιτητές μέσω του προγράμματος DreamSpark της Microsoft. Το Visual Studio συμπεριλαμβάνει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα με αυτόματη συμπλήρωση (IntelliSense) και αναδιάταξη κώδικα, έναν αποσφαλματωτή και ένα γραφικό σχεδιαστή φόρμας.

Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το αντικειμενοστραφές πλαίσιο ανοιχτού κώδικα για ανάλυση δεδομένων μεγάλης κλίμακας ROOT, που αναπτύχθηκε στο CERN. Τα script που χρησιμοποιεί αυτό το πλαίσιο είναι γραμμένα στη γλώσσα προγραμματισμού C++ και τρέχουν μέσω του CINT, ενός διερμηνέα C και C++ που αναπτύχθηκε ανεξάρτητα από το ROOT.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά τα επιμέρους τμήματα του λογισμικού του συστήματος.

4.2 Arduino Firmware

4.2.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, η πλατφόρμα Arduino είναι μία ανοιχτή πλατφόρμα προτυποποίησης ηλεκτρονικών (open-source electronics prototyping platform), που αποτελείται από κυρίως δύο μέρη: την πλακέτα (hardware) και το λογισμικό (software). Όσον αφορά το λογισμικό του Arduino, αυτό αποτελείται από από την γλώσσα προγραμματισμού του Arduino που είναι βασισμένη στο ανοιχτό πλαίσιο προγραμματισμού Wiring και το περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού (IDE) του Arduino που είναι εμπνευσμένο από το αντίστοιχο περιβάλλον της γλώσσας Processing.

Το Wiring (βιβλιογραφία) είναι ένα ανοιχτό πλαίσιο ανάπτυξης λογισμικού για μικροελεγκτές που άρχισε από τον Hernando Barragán το 2003. Επιτρέπει τον προγραμματισμό λογισμικού ανεξαρτήτου πλατφόρμας για τον έλεγχο συσκευών που είναι συνδεδεμένες με ένα μεγάλο εύρος μικροελεγκτών. Η ιδέα που κρύβεται πίσω από το Wiring είναι ότι με λίγες γραμμές κώδικα να μπορεί να δημιουργηθεί ένα αρχικό σχέδιο για πειραματισμό πάνω στο οποίο μπορούν εύκολα να προστίθενται νέες ιδέες, δημιουργώντας έτσι πρωτότυπα μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας που πήρε το όνομα “sketching with hardware”. Το πλαίσιο δημιουργήθηκε με στόχο να ενθαρρύνει μία κοινότητα από αρχάριους μέχρι ειδικούς από όλο τον κόσμο να μοιράζονται ιδέες, γνώση και την συλλογική τους εμπειρία.

Η γλώσσα Processing είναι βασισμένη πάνω στην Java αλλά χρησιμοποιεί απλοποιημένο συντακτικό με σκοπό να μπορεί να εισάγει στον προγραμματισμό ακόμα και άτομα χωρίς μεγάλη εμπειρία στην ανάπτυξη λογισμικού. Κάθε πρόγραμμα σε γλώσσα Processing ονομάζεται sketch και ανήκει στην Java κλάση PApplet. Όλες οι κλάσεις που ορίζονται μέσα στο sketch αντιμετωπίζονται σαν εσωτερικές κλάσεις όταν ο κώδικας μεταφράζεται σε Java και γι' αυτό ο ορισμός στατικών μεθόδων και μεταβλητών απαγορεύεται.

Το περιβάλλον ανάπτυξης του Arduino παρέχει ένα φιλικό για τον χρήστη περιβάλλον (Εικόνα 54) το οποίο είναι ανεξάρτητο πλατφόρμας και επιτρέπει την ανάπτυξη του προγράμματος, τη μεταγλώττιση του σε γλώσσα μηχανής και την μεταφόρτωσή του στον μικροελεγκτή. Αποτελείται από:

α) Μία σειρά από μενού στο επάνω μέρος

β) Μία Toolbar κάτω από το μενού με κουμπιά για τις λειτουργίες που χρησιμοποιούνται πιο συχνά όπως η Επαλήθευση κώδικα (Verify) και η Μεταγλώττιση και Μεταφόρτωση του κώδικα στην πλακέτα (Upload)

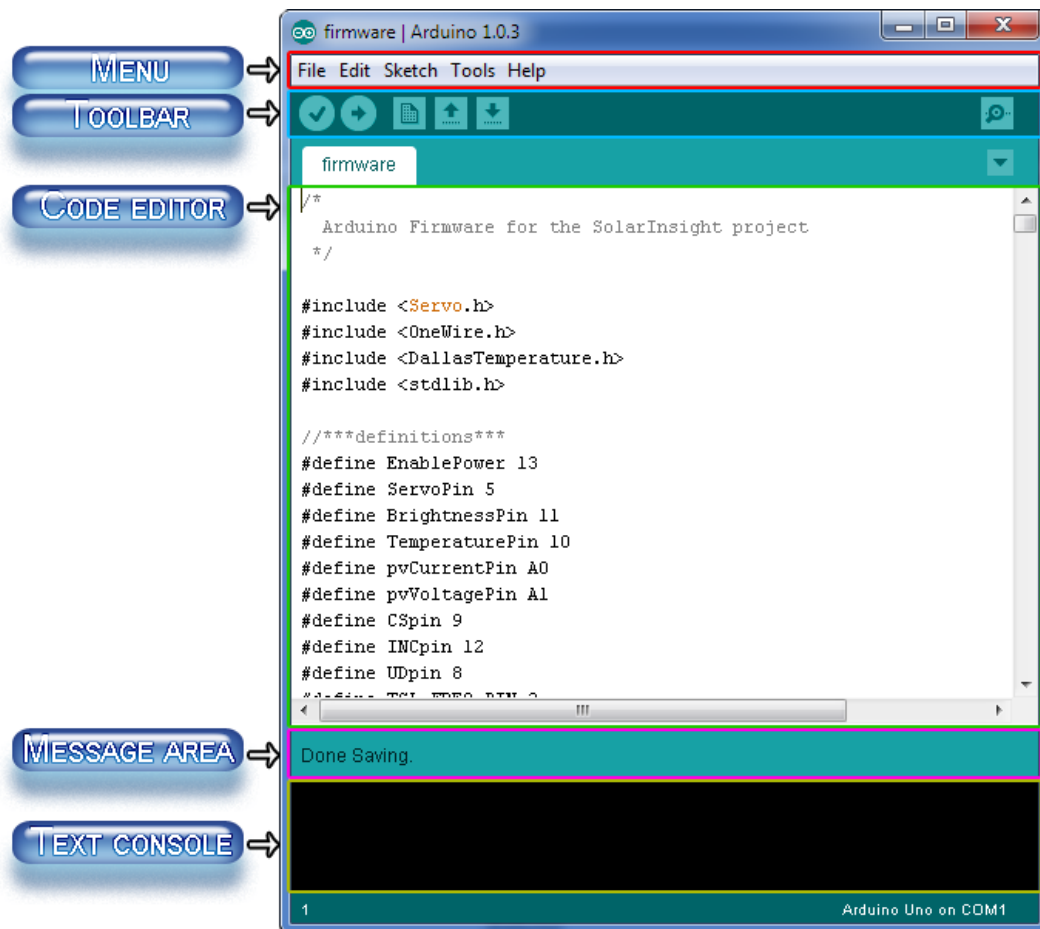
γ) Τον κειμενογράφο όπου γίνεται η ανάπτυξη του κώδικα

δ) Μία περιοχή διαγνωστικών μηνυμάτων που δίνει πληροφορίες κατά την αποθήκευση και εξαγωγή του κώδικα και τυπώνει τα μηνύματά σφάλματος

ε) Μία κονσόλα κειμένου στο κάτω μέρος του παραθύρου

Επίσης περιέχει ένα σειριακό τερματικό για την επικοινωνία και την μεταφορά δεδομένων από και προς το Arduino.

Το IDE χρησιμοποιεί την άδεια χρήσης GNU General Public License (GPL). Σύμφωνα με αυτή την άδεια χρήσης κατοχυρώνεται το δικαίωμα του κατόχου να τρέξει το πρόγραμμα για οποιοδήποτε λόγο, να μελετήσει τον κώδικα και να τον τροποποιήσει προκειμένου να το βελτιώσει και να διανείμει τα αντίγραφα του προγράμματος ελεύθερα στην κοινότητα ώστε να ωφεληθεί ολόκληρη η κοινότητα. Για να γίνουν τα παραπάνω ο κώδικας του προγράμματος πρέπει να είναι γνωστός και διαθέσιμος στον χρήστη. Ένας σημαντικός περιορισμός αυτής της άδειας είναι ότι κάθε αντίγραφο, παράγωγο και προϊόν ενός GPL προγράμματος υποχρεούται να διανέμεται και αυτό υπό την ίδια άδεια.



Εικόνα 54 Το IDE του Arduino

Για να είναι εκτελέσιμο ένα sketch από το Arduino αρκεί να οριστούν δύο συναρτήσεις, η συνάρτηση **setup()** και η συνάρτηση **loop()**.

Η συνάρτηση **setup()** καλείται μόνο μία φορά στην αρχή κατά την εκτέλεση του προγράμματος και με αυτήν γίνονται οι δηλώσεις για την αρχικοποίηση των ρυθμίσεων του συστήματος. Η συνάρτηση **loop()** αποτελεί τον βασικό βρόγχο εκτέλεσης του προγράμματος και καλείται επανειλημμένα μέχρι να σταματήσει η τροφοδοσία στο Arduino ή να «παγώσει» η εκτέλεση του προγράμματος σε κάποιο μέρος του κώδικα. Συγκεκριμένα στην περίπτωση του προγράμματος του συστήματος SolarInsight το διάγραμμα ροής του Arduino sketch δίνεται στην Εικόνα 56

Με τη συνάρτηση **setup()** πραγματοποιούνται τα εξής:

- Ορίζονται οι κατευθύνσεις των θυρών του Arduino ως είσοδοι ή έξοδοι
- Ενεργοποιείται η παροχή ρεύματος στα κυκλώματα
- Αρχικοποιείται ο σερβοκινητήρας και η γωνία του φωτοβολταϊκού επανέρχεται στις 90 μοίρες
- Μεγιστοποιείται η ακτινοβολία της φωτεινής πηγής
- Επαναφέρεται το ποτενσιόμετρο στην χαμηλότερη ρύθμιση αντίστασης
- Ενεργοποιείται η επικοινωνία με τον αισθητήρα θερμοκρασίας και ρυθμίζεται η ανάλυση των μετρήσεών του
- Ορίζεται η ευαισθησία του αισθητήρα φωτεινής ακτινοβολίας καθώς και ρυθμίζεται η συχνότητα εξόδου του ώστε να είναι μετρήσιμη από τον μικροελεγκτή του συστήματος
- Ρυθμίζεται το εύρος ζώνης της σειριακής επικοινωνίας και η εκτέλεση μεταφέρεται σε μία ρουτίνα αναμονής δεδομένων όπου γράφεται στην σειριακή θύρα προτροπή για έναρξη της επικοινωνίας σε αναγνώσιμη μορφή

Η συνάρτηση **loop()** ελέγχει αν ο χρήστης έχει εισάγει έναν χαρακτήρα στο σειριακό ενταμιευτή (serial buffer) και αναλόγως της τιμής αυτού του χαρακτήρα κάνει την κατάλληλη ενέργεια, συνήθως καλώντας κάποια από τις συναρτήσεις που αναλύονται στην επόμενη παράγραφο. Συγκεκριμένα, οι τιμές των χαρακτήρων και οι αντίστοιχες ενέργειες είναι:

Increase load ('e'): Εάν η τιμή του φορτίου που είναι συνδεδεμένο στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη δυνατή, κατεβάζει την τιμή του φορτίου κατά 5 μονάδες και στην συνέχεια καλεί την συνάρτηση *formatOutput()*.

Decrease load ('r'): Εάν η τιμή του φορτίου που είναι συνδεδεμένο στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μικρότερη από την μέγιστη δυνατή, ανεβάζει την τιμή του φορτίου κατά 5 μονάδες μέσω του ψηφιακού ποτενσιόμετρου και καλεί την συνάρτηση *formatOutput()*.

Decrease brightness ('d'): Η τιμή της φωτεινότητας της φωτεινής πηγής του συστήματος μειώνεται κατά 10 μονάδες και καλείται η συνάρτηση *formatOutput()*.

Increase brightness ('f'): Η τιμή της φωτεινότητας της φωτεινής πηγής του συστήματος αυξάνεται κατά 10 μονάδες και καλείται η συνάρτηση *formatOutput()*.

Incline ('c'): Εάν η τιμή της γωνίας μεταξύ φωτοβολταϊκού στοιχείου και φωτεινής πηγής είναι μικρότερη από 90 μοίρες, η γωνία αυξάνεται κατά 10 μοίρες και καλείται η συνάρτηση *formatOutput()*.

Decline ('v'): Εάν η τιμή της γωνίας μεταξύ φωτοβολταϊκού στοιχείου και φωτεινής πηγής είναι μεγαλύτερη από 50 μοίρες, η γωνία μειώνεται κατά 10 μοίρες και καλείται η συνάρτηση *formatOutput()*.

Reset load ('q'): Το φορτίο επανέρχεται στην χαμηλότερη τιμή αντίστασης.

Reset angle ('a'): Η γωνία επανέρχεται στις 90 μοίρες.

Reset Irradiance ('z'): Η ακτινοβολία της φωτεινής πηγής παίρνει την μέγιστη τιμή της.

Temperature Request ('t'): Μετράται η τιμή της θερμοκρασίας και καλείται η συνάρτηση *formatOutput()*.

Power Down ('n'): Κόβεται η τροφοδοσία στα υποκυκλώματα του συστήματος, αποδεσμεύεται ο σερβοκινητήρας και μηδενίζεται η φωτεινότητα της φωτεινής πηγής.

Power Up ('m'): Ενεργοποιείται η τροφοδοσία των υποκυκλωμάτων του συστήματος, συνδέεται ο σερβοκινητήρας και ακτινοβολεί η φωτεινή πηγή με την τελευταία τιμή που είχε λάβει.

Sweep ('z'): Το φορτίο ελαχιστοποιείται, στη συνέχεια αυξάνεται διαδοχικά σε 100 βήματα και καλείται η συνάρτηση *formatOutput()*.

Μέσα στο sketch του Arduino έχουν οριστεί οι παρακάτω συναρτήσεις που καλούνται κατά την διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος:

ResetLoad(): *Ελαχιστοποίηση Φορτίου*. Επαναφέρει το φορτίο στην ελάχιστη τιμή αντίστασης

DecreaseLoad(): *Μείωση Φορτίου*. Στέλνει τα κατάλληλα σήματα (βλ Πίνακα 2) για μείωση του φορτίου από το ψηφιακό ποτενσιόμετρο.

IncreaseLoad(): *Αύξηση Φορτίου*. Στέλνει τα κατάλληλα σήματα (βλ Πίνακα 2) για αύξηση του φορτίου από το ψηφιακό ποτενσιόμετρο.

Add_Pulse(): Μετράει τον χρόνο μεταξύ των παλμών που στάλθηκαν από τον αισθητήρα ακτινοβολίας και υπολογίζει την ένταση της φωτεινής πηγής, δεδομένου ότι συχνότητα των παλμών είναι ανάλογη της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον αισθητήρα.

Sensitivity(): Στέλνει τα κατάλληλα σήματα (βλ Πίνακα 1) για την ρύθμιση της ευαισθησίας του αισθητήρα φωτεινής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα ορίζει την λογική τιμή των ακροδεκτών S0 και S1 του ολοκληρωμένου TSL230R

ώστε η ευαισθησία του να είναι 1:1, 10:1 ή 100:1. Αυτή η συνάρτηση καλείται στο τέλος κάθε επανάληψης της συνάρτησης loop() για να ανανεώσει τις ρυθμίσεις του αισθητήρα.

SetSensitivity(): Ρύθμιση Ευαισθησίας Αισθητήρα Ακτινοβολίας. Υπολογίζει την σωστή τιμή της ευαισθησίας που πρέπει να έχει ο αισθητήρας ακτινοβολίας για την τρέχουσα τιμή φωτεινότητας των διόδων εκπομπής φωτός. Καλώντας την συνάρτηση GetuWattCm2() υπολογίζει την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας και εάν είναι μικρότερη από μία τιμή κατωφλίου αυξάνει την ευαισθησία του αισθητήρα ενώ εάν είναι μεγαλύτερη από μία διαφορετική τιμή κατωφλίου μειώνει την ευαισθησία του αισθητήρα καλώντας την συνάρτηση Sensitivity().

GetuWattCm2(): Υπολογίζει την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας σε $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Συγκεκριμένα υπολογίζει την συχνότητα εξόδου του αισθητήρα φωτεινής ακτινοβολίας πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των παλμών που μετρήθηκαν σε ένα δευτερόλεπτο με τον αριθμό διαίρεσης της συχνότητας εξόδου του αισθητήρα που έχει οριστεί εκείνη την στιγμή από την SetSensitivity(). Σύμφωνα με το datasheet ο λόγος της έντασης της ακτινοβολίας σε $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ και της συχνότητας εξόδου του αισθητήρα είναι 1:10 για ευαισθησία 1x, 1:100 για ευαισθησία 10x και 1:1000 για ευαισθησία 100x, επομένως η συχνότητα εξόδου που υπολογίστηκε πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο πολλαπλασιαστή. Πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδόν της επιφάνειας του αισθητήρα (0.0136cm^2) βρίσκουμε την τιμή της ακτινοβολίας σε $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

FormatOutput(): Διαμορφώνει τα κατάλληλα μηνύματα για την σειριακή επικοινωνία ανάλογα με την πράξη που έκανε ο χρήστης και τα τυπώνει στην σειριακή θύρα. Συγκεκριμένα το μήνυμα εξόδου αποτελείται από επτά μέρη:

- α) Η ενέργεια που έγινε σύμφωνα με την εντολή του χρήστη
- β) Η τάση που μετρήθηκε από το Arduino
- γ) Η ένταση του ρεύματος που μετρήθηκε από το Arduino
- δ) Η θερμοκρασία που μετρήθηκε από τον αισθητήρα θερμοκρασίας
- ε) Το ποσοστό του φορτίου που εφαρμόζεται στο φωτοβολταϊκό
- στ) Η γωνία του φωτοβολταϊκού σε σχέση με τον άξονα που βρίσκεται κάθετος στην φωτεινή πηγή
- ζ) Η φωτεινή ακτινοβολία που μετρήθηκε από τον αισθητήρα ακτινοβολίας

```
BrightnessIncreased|2047 mV|1874 mA|45C|100%|90Degrees|4uW/cm^sq
```

action voltage current temp load angle irradiance

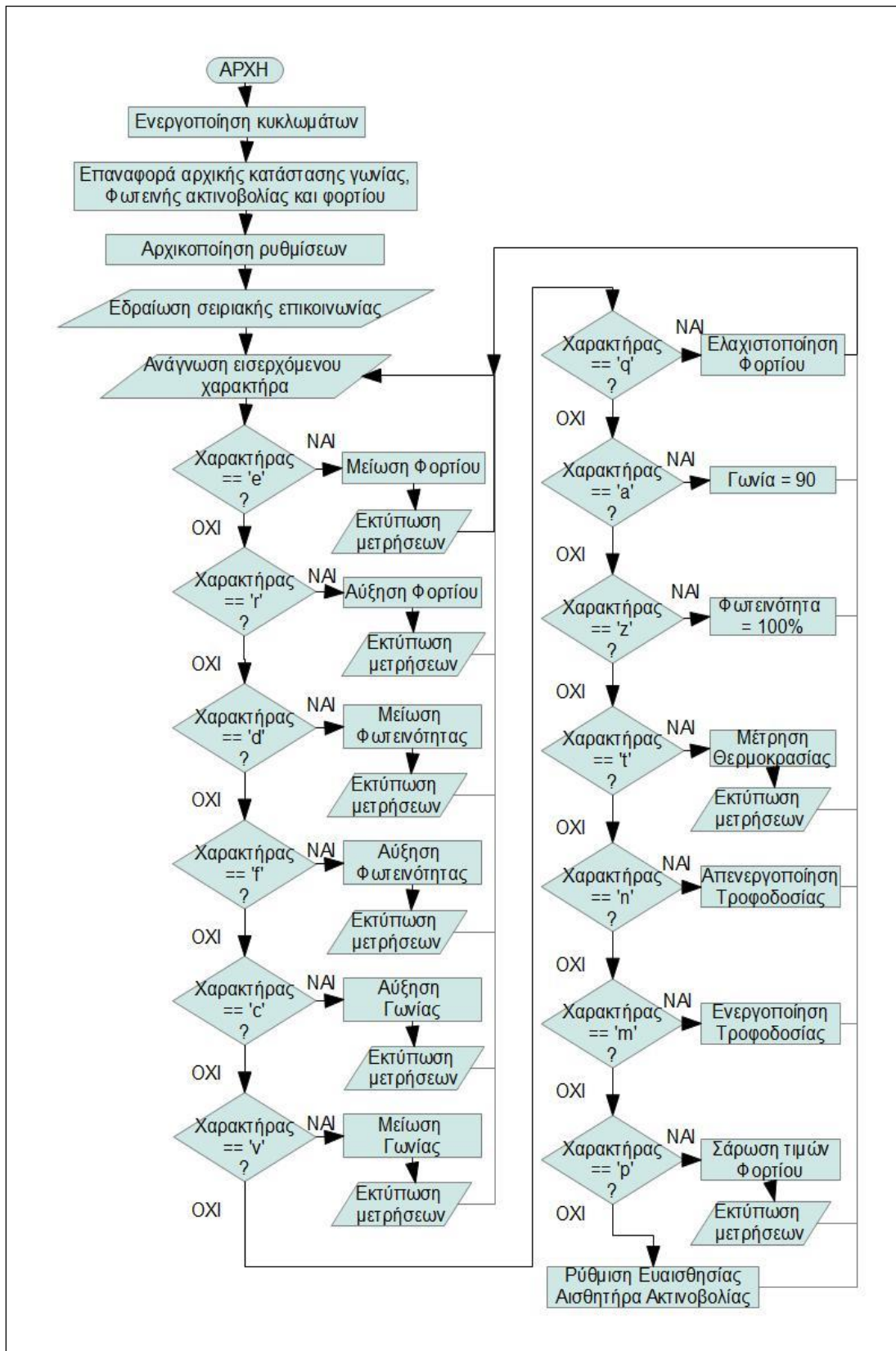
Εικόνα 55 Μήνυμα της formatOutput() όταν ο χρήστης αυξήσει την Φωτεινότητα

Ένα παράδειγμα εξόδου της συνάρτησης όταν ο χρήστης επέλεξε να αυξήσει την ένταση φωτεινότητα των διόδων εκπομπής φωτός φαίνεται στην Εικόνα 55

EstablishContact(): Τυπώνει επαναλαμβανόμενα το μήνυμα “Waiting for contact” όταν το Arduino έχει συνδεθεί στην σειριακή θύρα και αναμένει

εντολές. Το μήνυμα σταματά όταν στον ενταμιευτή της σειριακής θύρας καταχωρηθεί η πρώτη εντολή από τον χρήστη.

Εκτός από τις ενσωματωμένες βιβλιοθήκες έχει φορτωθεί και χρησιμοποιείται η ανεπίσημη βιβλιοθήκη λογισμικού **OneWire** για το Arduino του Jim Studt που επιτρέπει την απλή επικοινωνία με ολοκληρωμένα που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο καθώς και η βιβλιοθήκη **Dallas Temperature** για το Arduino του Miles Burton που βασίζεται στην προηγούμενη και προσφέρει συναρτήσεις για τον έλεγχο του αισθητήρα θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται στο σύστημα (DS18B20).



Εικόνα 56 Διάγραμμα ροής του Arduino sketch

4.3 Η Διεπαφή Χρήστη (User Interface)

Η διεπαφή χρήστη αναπτύχθηκε σε C# με χρήση του περιβάλλοντος ανάπτυξης Visual Studio 2010 Professional της Microsoft η οποία είναι ελεύθερα προσβάσιμη σε σπουδαστές μέσω του DreamSpark προγράμματος. Η διεπαφή χρήστη επικοινωνεί με το Arduino και επιπλέον εκτελεί τον C++ interpreter (CINT) του περιβάλλοντος ROOT, το οποίο με τη σειρά του εκτελεί συγκεκριμένα προγράμματα για την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων.

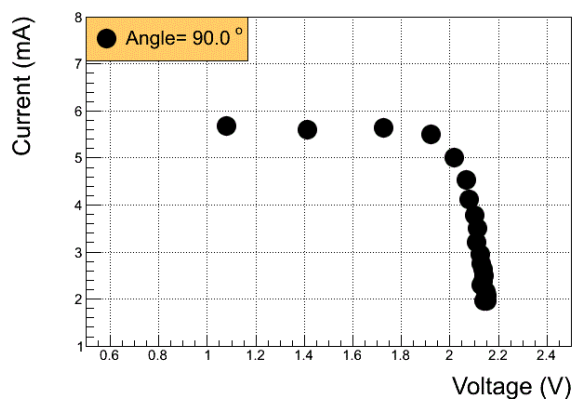
4.4 Το περιβάλλον ROOT

Το ROOT είναι ένα πλαίσιο ανάλυσης δεδομένων. Αναπτύχθηκε από τους René Brun και Fons Rademakers τα μέσα της δεκαετίας του 1990 για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων του πειράματος NA49 που έγινε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Πυρηνικών Ερευνών (CERN) στην Ελβετία. Το τεράστιο μέγεθος των δεδομένων που έφτανε τα 10 Terabyte σε κάθε εκτέλεση αποτελούσε ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη της νέας γενιάς λογισμικού ανάλυσης δεδομένων. Η ελεύθερη πρόσβαση στην ανάπτυξη του πλαισίου ROOT από την κοινότητα των ερευνητών που συμμετείχαν στα πειράματα του CERN για την ανάλυση των πειραματικών τους δεδομένων είχε ως αποτέλεσμα το ROOT να γίνει εξειδικευμένο, κατάλληλο και χρήσιμο για το πεδίο. Σήμερα, με πάνω από δέκα χρόνια χρήσης το ROOT θεωρείται ότι έχει φτάσει σε ένα ώριμο στάδιο. Όταν πρόκειται για επεξεργασία δεδομένων, οι καλά ελεγμένες μέθοδοι του ROOT αποτελούν ισχυρό εργαλείο που αρχίζει να χρησιμοποιείται και από άλλους χώρους όπως η βιομηχανία. Το ROOT χρησιμοποιεί το CINT, ένα διερμηνέα C++ που δημιουργήθηκε από τον Masa Goto και αποτελεί ανεξάρτητο λογισμικό.

Στο σύστημα που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, το ROOT καλείται μέσα από το περιβάλλον εργασίας του χρήστη και χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων, συγκεκριμένα για τη δημιουργία γραφημάτων, για την προσαρμογή (fit) των πειραματικών μετρήσεων από θεωρητικά μοντέλα καθώς και για την εξομοίωση (simulation) της απόκρισης ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού για διάφορες θερμοκρασίες.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά τα προγράμματα επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων που αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον ROOT

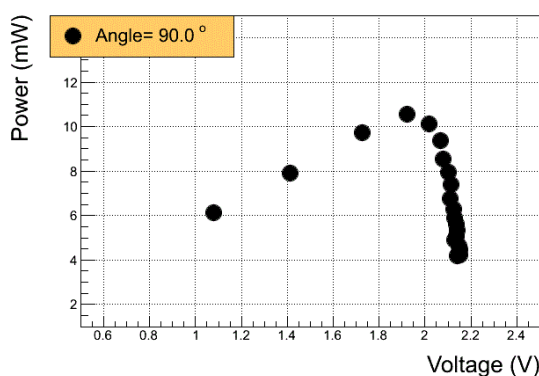
Η γραφική παράσταση του ρεύματος συναρτήσει της τάσης στα άκρα του φωτοβολταϊκού γίνεται με χρήση του script **plot_IV.c**.



Εικόνα 57 I/V

Μέσω της διεπαφής χρήστη λαμβάνονται μετρήσεις τάσης και ρεύματος μεταβάλλοντας το φορτίο στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου μέσω του ψηφιακού ποτενσιόμετρου. Οι μετρήσεις αυτές αποθηκεύονται σε ένα προσωρινό αρχείο. Το πρόγραμμα **plot_IV.c** δέχεται ως παράμετρο τη διαδρομή αυτού του προσωρινού αρχείου προκειμένου να κάνει τη γραφική παράστασή τους (Εικόνα 57). Οι άξονες είναι ονομασμένοι και βαθμονομημένοι από 0 έως 2.5V και από 1 έως 8mA, για την τάση και για την ένταση του ρεύματος αντιστοίχως. Στη λεζάντα επάνω στον καμβά του γραφήματος αναγράφεται η γωνία υπό την οποία η φωτεινή πηγή φωτίζει το φωτοβολταϊκό πάνελ.

Το πρόγραμμα **plot_PV.c** δέχεται ως παράμετρο τη διαδρομή του προσωρινού



Εικόνα 58 P/V

αρχείου όπου έχουν αποθηκευτεί τα πειραματικά δεδομένα και κάνει τη γραφική παράστασή της ισχύος συναρτήσει της τάσης (Εικόνα 58)

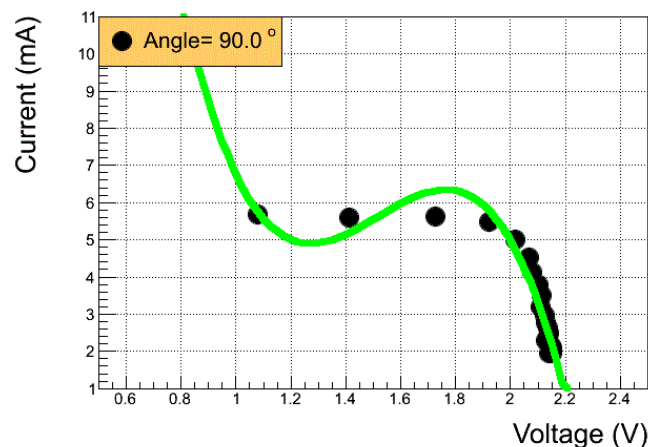
Προκειμένου οι σπουδαστές να εμβαθύνουν στην έννοια της προσαρμογής ενός θεωρητικού μοντέλου στις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται τρεις συναρτήσεις

A) Γραμμική της μορφής $Y = Ax + B$

B) Πολυώνυμο τρίτου βαθμού της μορφής $Y = Ax^2 + Bx + \Gamma$

Γ) Το θεωρητικό μοντέλο της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης ρεύματος - τάσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Τα αντίστοιχα script περιγράφονται πιο αναλυτικά από κάτω



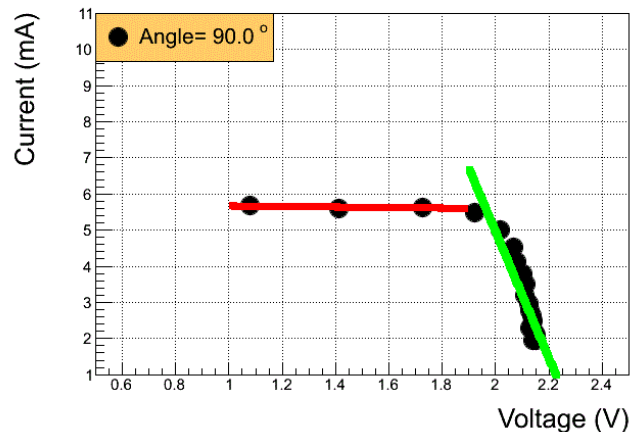
Εικόνα 59 Linear fit I/V

Το **fit_IVLinear.c** (Εικόνα 59) παίρνει σαν παράμετρο την διαδρομή του προσωρινού αρχείου δεδομένων και πραγματοποιεί δύο προσαρμογές με εξίσωση πρώτου βαθμού. Η πρώτη γίνεται στην περιοχή όπου η ένταση του ρεύματος είναι σταθερή (μέχρι 1.9V) και η δεύτερη από 1.9V έως 2.5V

Το **fit_IVPolynomial.c** (Εικόνα 61) παίρνει σαν παράμετρο την διαδρομή του προσωρινού αρχείου δεδομένων. Σε αντίθεση με το προηγούμενο μοντέλο προσαρμογής καμπύλης, αυτό το μοντέλο προσαρμόζει το πολυώνυμο τρίτου βαθμού

$$Y = Ax^2 + Bx + \Gamma$$

επάνω στα πειραματικά δεδομένα.

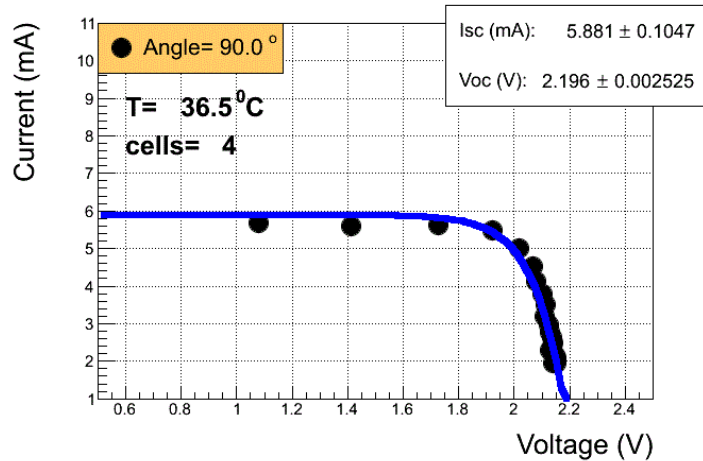


Εικόνα 61 Polynomial Fit I/V

Το **fit_IV.c** (Εικόνα 62) χρειάζεται σαν παράμετρο την διαδρομή του προσωρινού αρχείου δεδομένων και την θερμοκρασία στην οποία πάρθηκαν. Το script αυτό προσαρμόζει στα πειραματικά δεδομένα το μοντέλο ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού σύμφωνα με την εξίσωση

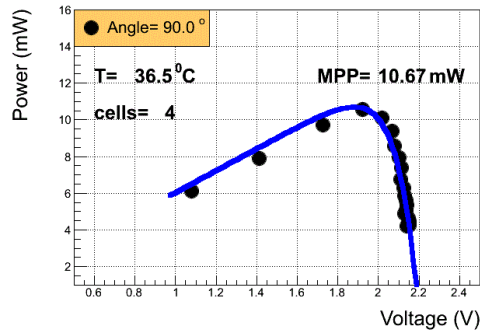
$$I(V) = I_L - I_d - \frac{V + R_s I}{R_p} = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_d k T N_s}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad [1]$$

όπου I_L είναι το ρεύμα που παράγεται από το φωτοβολταϊκό, I_d είναι το ρεύμα διόδου για φωτοβολταϊκό που αποτελείται από N_s στοιχεία σε σειρά, I_0 είναι το ρεύμα αντίστροφου κορεσμού του φωτοβολταϊκού, $q=1.6 \times 10^{-19}$ C είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, $k=1.38 \times 10^{-23}$ είναι η σταθερά Boltzmann, T είναι η απόλυτη θερμοκρασία του στοιχείου, n_d είναι ο ιδεατός παράγοντας διόδου που εκφράζει τον βαθμό στον οποίο η διόδος συμπεριφέρεται σαν ιδανική ($n_d = 1$ για ιδανική διόδο). Η ισοδύναμη αντίσταση σειράς (R_s) αντιπροσωπεύει τις εσωτερικές απώλειες λόγω ρεύματος ενώ η ισοδύναμη αντίσταση παραλληλίας (R_p) αντιπροσωπεύει το ρεύμα διαρροής προς την γείωση.

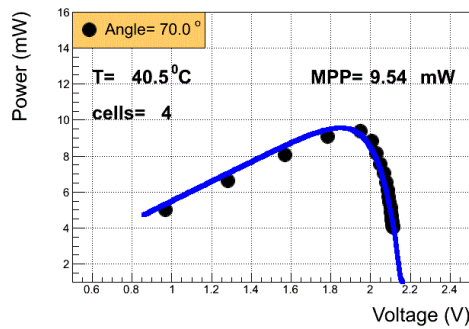


Εικόνα 62 Fit με μοντέλο Φωτοβολταϊκού

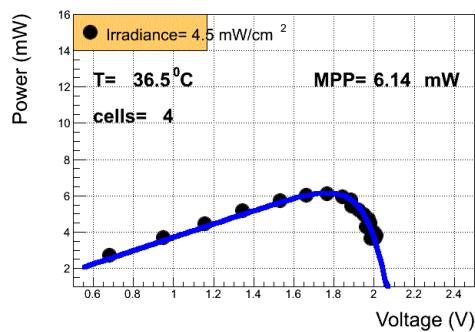
Στο καμβά εμφανίζει το ρεύμα βραχυκυκλώματος **Isc** και την τάση ανοιχτού κυκλώματος **Voc** που υπολογίζεται από την προσαρμογή της καμπύλης στα πειραματικά δεδομένα καθώς και την θερμοκρασία **T** και τον αριθμό των στοιχείων του φωτοβολταϊκού **cells** τα οποία έχει λάβει σαν παράμετρο από τον χρήστη και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της καμπύλης σύμφωνα με το μοντέλο.



Εικόνα 65 Fit P/V



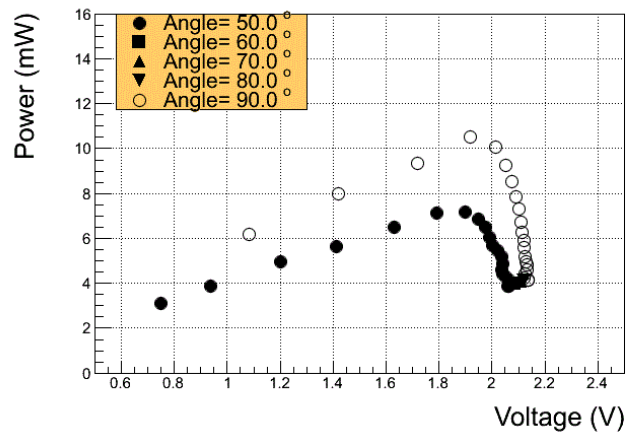
Εικόνα 64 Fit P/V σε διαφορετική γωνία



Εικόνα 63 Fit P/V σε διαφορετική ένταση ακτινοβολίας

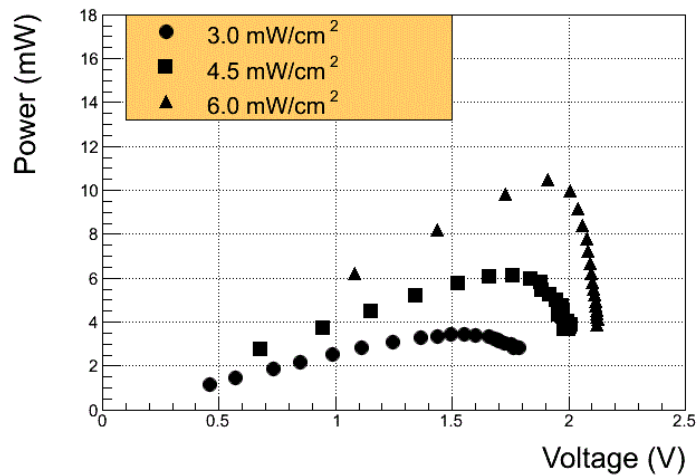
Χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο φωτοβολταϊκού [1] με το script `fit_IV.c` πραγματοποιείται η προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα ισχύος – τάσης από τα `fit_PV.c` (Εικόνα 65), `fit_PVA.c` (Εικόνα 64) και `fit_PVIrr.c` (Εικόνα 63). Τα script αυτά παίρνουν σαν παράμετρο την διαδρομή του προσωρινού αρχείου μετρήσεων στον δίσκο και εκτυπώνουν το γράφημα P/V υπολογίζοντας και εμφανίζοντας επάνω στον καμβά τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού, P_{max} . Το

σημείο της καμπύλης στο οποίο έχουμε την P_{max} είναι σημαντικό γιατί εκεί μεγιστοποιείται η απόδοση του φωτοβολταϊκού και ονομάζεται **MPP** (Maximum Power Point). Το σημείο αυτό εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας και η ηλικία του φωτοβολταϊκού. Η επίδραση της θερμοκρασίας, της γωνίας του φωτοβολταϊκού σε σχέση με την φωτεινή πηγή και της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας στο MPP εξετάζεται σε κάποια από τα επόμενα script.



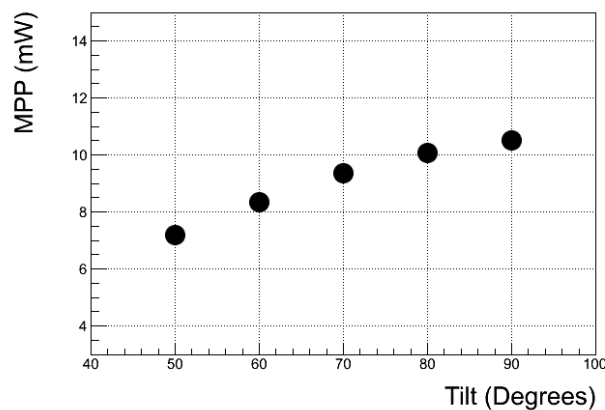
Εικόνα 66 P/V για διαφορετικές γωνίες

Για την μελέτη της επίδρασης της γωνίας του φωτοβολταϊκού σε σχέση με την φωτεινή πηγή επάνω στην παραγόμενη ισχύ καλείται το script **plot_angle.c** (Εικόνα 66). Δέχεται σαν παράμετρο την διαδρομή του προσωρινού αρχείου δεδομένων στον δίσκο. Στο αρχείο αυτό, που καταγράφεται η γωνία που έχει γίνει κάθε μέτρηση, υπάρχουν οι μετρήσεις ισχύος και τάσης για διαφορετικές γωνίες του φωτοβολταϊκού. Το script εισάγει αυτές τις μετρήσεις και αφού τις ταξινομήσει σύμφωνα με την γωνία, τις τυπώνει επάνω στο ίδιο γράφημα. Τα σημεία για κάθε γωνία σχεδιάζονται με διαφορετικό σχήμα που επεξηγείται στο υπόμνημα επάνω αριστερά.



Εικόνα 67 P/V για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας

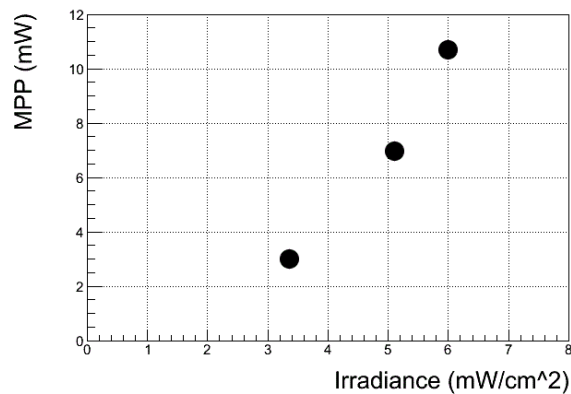
Με παρόμοιο τρόπο τυπώνεται και το γράφημα ισχύος – τάσης σε σχέση με την ένταση της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας επάνω στο φωτοβολταϊκό από το script **plot_irradiance.c** (Εικόνα 67). Το script δέχεται σαν παράμετρο την διαδρομή του προσωρινού αρχείου μετρήσεων μέσα στο οποίο υπάρχουν μετρήσεις με διαφορετικές εντάσεις φωτεινής ακτινοβολίας. Αυτές οι μετρήσεις ταξινομούνται σύμφωνα με την ένταση φωτεινής ακτινοβολίας στην οποία πάρθηκαν και για κάθε μία σχεδιάζονται επάνω στο ίδιο γράφημα όλα τα σημεία που έχουν καταγραφεί. Διαφορετικά σύμβολα χρησιμοποιούνται για κάθε ένταση φωτεινής ακτινοβολίας τα οποία επεξηγούνται στο υπόμνημα που υπάρχει επάνω αριστερά.



Εικόνα 68 MPP/Γωνία φωτοβολταϊκού

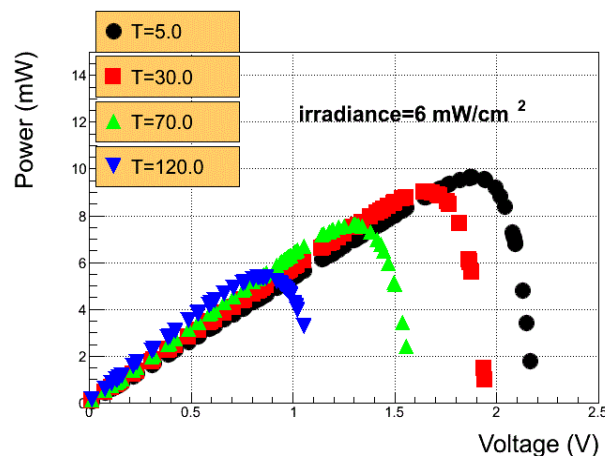
Η Εικόνα 68 παρουσιάζει τις μετρήσεις P_{max} ανάλογα με την γωνία του φωτοβολταϊκού σε σχέση με την φωτεινή πηγή. Δημιουργείται από το script **plot_MPPTilt.c** και παίρνει σαν παράμετρο την διαδρομή του προσωρινού αρχείου δεδομένων που δημιουργείται από το User Interface όταν ο χρήστης συμπληρώσει

τον πίνακα MPP-Tilt στην καρτέλα “Angle Dependence”. Ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει την παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού σε mW ενώ ο οριζόντιος την γωνία σε μοίρες που σχηματίζει το φωτοβολταϊκό με τον νοητό άξονα που είναι κάθετος στην φωτεινή πηγή.



Εικόνα 69 Pmax σε σχέση με την εκπεμπόμενη ακτινοβολία

Το script **plot_MPPIrradiance.c** δέχεται σαν παράμετρο τη διαδρομή του προσωρινού αρχείου δεδομένων που δημιουργείται αφού ο χρήστης συμπληρώσει τον πίνακα MPP-Irradiance στην καρτέλα Irradiance Dependence του User Interface. Στην Εικόνα 69 φαίνονται αποτυπωμένα τα σημεία των μετρήσεων που έχουν εισαχθεί, με τον κατακόρυφο άξονα να αντιπροσωπεύει την Ένταση του φωτός που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό σε mW/cm² και τον κάθετο την μέγιστη παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού για αυτές τις συνθήκες Pmax σε mW.



Εικόνα 70 Simulation P/V για διαφορετικές θερμοκρασίες

Η μελέτη της επιρροής της θερμοκρασίας στην παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού για θερμοκρασίες που απέχουν από αυτές που θα συναντήσει ο ερευνητής στο περιβάλλον του εργαστηρίου γίνεται μέσω εξομοίωσης της απόκρισης ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού που περιγράφεται από την σχέση [1]. Το

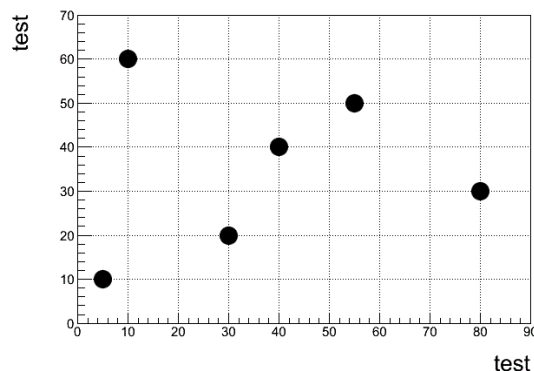
script **Sim_Temperature.c** που παράγει το γράφημα της εξομοίωσης (Εικόνα 70) δέχεται σαν παραμέτρους από τον χρήστη:

- Τον αριθμό των σημείων **n** που θα εκτυπωθούν επάνω στο γράφημα
- Τις θερμοκρασίες **temp_pvn0**, **temp_pvn1**, **temp_pvn2** και **temp_pvn3** στις οποίες θέλουμε να δούμε το γράφημα P/V
- **Ishort_pvn**, το ρεύμα βραχυκυκλώματος του φωτοβολταϊκού
- **Voc**, η τάση ανοιχτού κυκλώματος στα άκρα του φωτοβολταϊκού

Ο αριθμός των ενεργών στοιχείων του φωτοβολταϊκού (4 στοιχεία) και η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του ($6\text{mW}/\text{cm}^2$) θεωρούνται σταθερά. Στον καμβά εκτυπώνεται η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας και στο υπόμνημα επάνω αριστερά οι διαφορετικές θερμοκρασίες T1, T2, T3 και T4.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια script που δεν εκτυπώνουν γραφήματα αποκλειστικά από τις μετρήσεις αλλά από οποιαδήποτε πειραματικά δεδομένα έχει εισάγει ο χρήστης. Αυτά τα script χρειάζονται σαν παράμετρο:

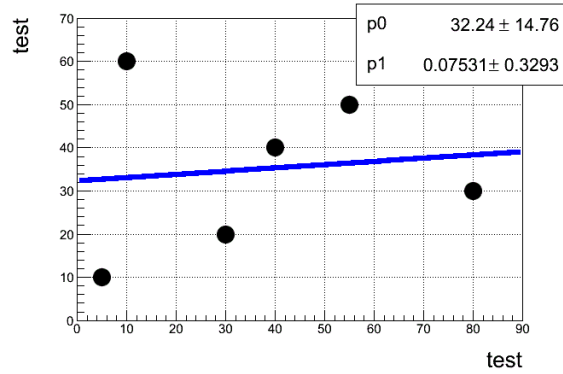
- τη διαδρομή του προσωρινού αρχείου δεδομένων που δημιουργείται από το User Interface
- Τα ονόματα του οριζόντιου και κάθετου άξονα (test σε αυτή την περίπτωση)
- Τα όρια των αξόνων με την μορφή μέγιστης και ελάχιστης τιμής



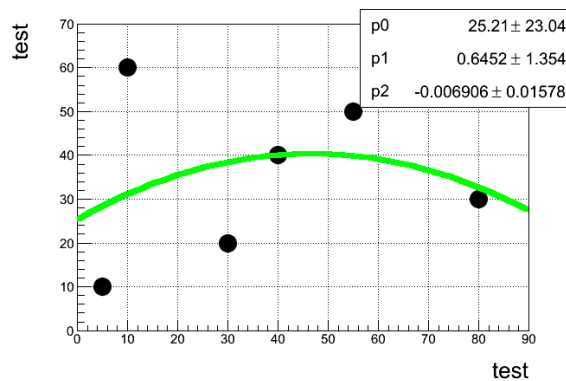
Εικόνα 71 Plot Σημείων

Το script **plot_Design.c** εκτυπώνει τα σημεία των πειραματικών μετρήσεων επάνω στο γράφημα.

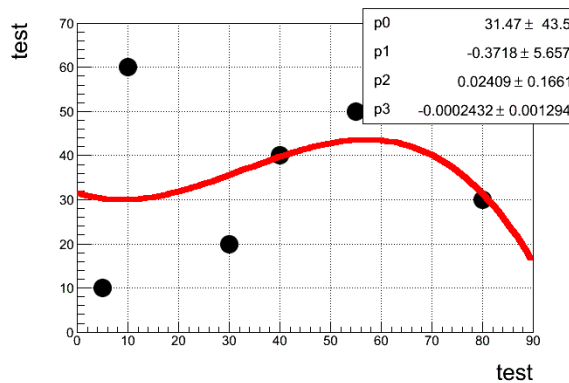
Τα script `fit_Design.c`, `fit_Designpol2.c`, `fit_Designpol3.c` και `fit_DesignExp.c` προσαρμόζουν πολυωνμικές συναρτήσεις 1^{ου} (Εικόνα 72), 2^{ου} (Εικόνα 73), 3^{ου} βαθμού (Εικόνα 74) καθώς και την εκθετική εξίσωση () αντίστοιχα στα πειραματικά δεδομένα.



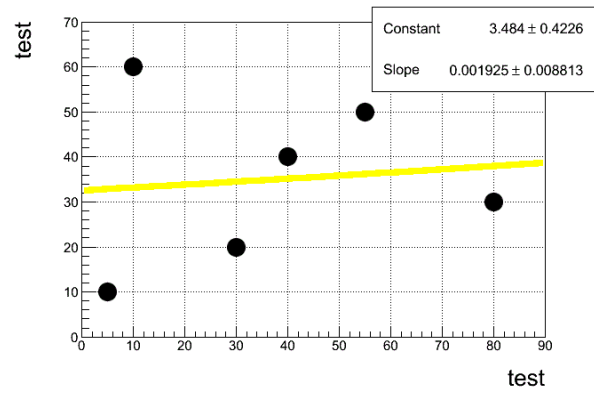
Εικόνα 72 Γραμμικό fit σημείων



Εικόνα 73 Fit με πολυώνυμο 2ου βαθμού



Εικόνα 74 Fit με πολυώνυμο 3ου βαθμού



Εικόνα 75 Fit με εκθετική εξίσωση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΣΧΟΛΙΑ

5.1 Πειραματική Διαδικασία

Προκαταρκτικές ρυθμίσεις

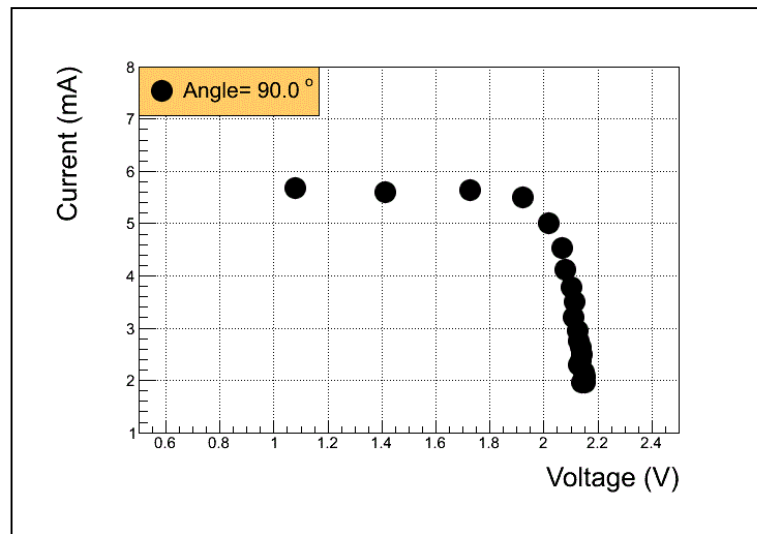
(από τον υπεύθυνο του εργαστηρίου)

1. Ο υπολογιστής πρέπει να είναι σε θέση OFF, το καλώδιο USB από το Arduino να είναι συνδεδεμένο στον υπολογιστή και το καλώδιο τροφοδοσίας του συστήματος να είναι σε θέση OFF.
2. Ανάβουμε τον υπολογιστή, αλλά όχι ακόμα την τροφοδοσία του συστήματος. Καλούμε την εφαρμογή SolarInsight από την επιφάνεια εργασίας.
3. Επιλέγουμε την σειριακή θύρα στην οποία είναι συνδεδεμένο το Arduino και πατάμε το κουμπί **Start Stream** που βρίσκεται στην καρτέλα I-V & P-V. Πατάμε το κουμπί **Temperature** ή/και το κουμπί **Load**. Το σύστημα πρέπει να ανταποκριθεί χωρίς να λαμβάνει μετρήσεις (είναι εκτός τροφοδοσίας).
4. Συνδέουμε το καλώδιο της τροφοδοσίας με την τάση. Θα ανάψει στην πλακέτα το κόκκινο Led. Το σύστημα είναι έτοιμο να λάβει μετρήσεις. Πατάμε το κουμπί **Temperature** οπότε λαμβάνουμε μέτρηση για τη θερμοκρασία του συστήματος.
5. Πατάμε το κουμπί **Clear Data** προκειμένου να καθαρίσουμε τον πίνακα και να αρχίσουμε να παίρνουμε μετρήσεις

5.1.1 Εξάρτηση από την μεταβολή του Φορτίου

1. Επιλέξτε την καρτέλα I-V. Σε αυτή την καρτέλα η φωτεινή πηγή βρίσκεται κάθετα (γωνία 90°) σε σχέση με την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού και η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας είναι μέγιστη.
2. Πάρτε μετρήσεις τάσης-ρεύματος για όλο το εύρος τιμών του φορτίου (πεδίο **Load από 0% έως 100%**) μεταβάλλοντας το φορτίο στα άκρα του φωτοβολταϊκού. Οι μετρήσεις σας αναγράφονται στον αριστερό πίνακα. Χρησιμοποιώντας τα βελάκια του πληκτρολογίου μπορείτε να πλοηγηθείτε στον πίνακα προκειμένου να δείτε τις μετρήσεις σας.
3. Καταγράψτε τις μετρήσεις σας σε αρχείο (κουμπί **Save**) αφού δημιουργήσετε ένα φάκελο με το όνομα του δώρου που παρακολουθείτε προκειμένου να αποθηκεύσετε εκεί όλα τα αρχεία και τις γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων σας. Στο όνομα του αρχείου καταχωρίστε και την θερμοκρασία στην οποία έγιναν οι μετρήσεις.

4. Κάντε την γραφική παράσταση του ρεύματος συναρτήσει της τάσης I-V (κουμπί **Plot**) και περιμένετε μέχρι να εμφανιστεί το γράφημα.



Στο γράφημα εμφανίζονται οι τα σημεία των μετρήσεων σαν μαύροι κύκλοι.

5. Βρείτε την «καλύτερη» συνάρτηση που περνάει από τα πειραματικά σας σημεία (διαδικασία fit). Υπάρχουν τρεις διαθέσιμες συναρτήσεις (linear, polynomial και photovoltaic), προκειμένου να επιλέξετε ποια από αυτές προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά σας δεδομένα/Επιλέξτε κάθε μία από αυτές και κάντε προσαρμογή στις μετρήσεις σας (κουμπί **Fit**). Προσοχή: όταν επιλέξετε τη συνάρτηση photovoltaic πρέπει πρώτα να εισάγετε την τιμή της θερμοκρασίας στο πεδίο **Insert Temperature** και μετά να πατήσετε το κουμπί Fit.

6. Επιλέγοντας τη συνάρτηση linear, το πρόγραμμα προσαρμόζει στις μετρήσεις σας δύο γραμμικές συναρτήσεις της μορφής $Y=A+BX$.

Επιλέγοντας τη συνάρτηση polynomial, το πρόγραμμα προσαρμόζει στις μετρήσεις σας μια συνάρτηση της μορφής: $Y=A+BX+CX^2$.

Επιλέγοντας της συνάρτηση photovoltaic, το πρόγραμμα προσαρμόζει στις μετρήσεις σας τη συνάρτηση:

$$I(V) = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{qV}{n_d k T N_s}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

όπου I_L είναι το φωτο-ρεύμα που παράγεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, I_0 είναι το ρεύμα κόρου του φωτοβολταϊκού, $q=1.6 \times 10^{-19}$ C είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, $k=1.38 \times 10^{-23}$ είναι η σταθερά Boltzmann, T είναι η απόλυτη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο, n_d είναι ένας παράγοντας που εκφράζει κατά πόσο η δίοδος συμπεριφέρεται ως ιδανική ($n_d = 1$ για ιδανική δίοδο) και N_s είναι ο αριθμός

των κυψελίδων από τα οποία αποτελείται το φωτοβολταϊκό στοιχείο ($N_s=4$, για την περίπτωση του φωτοβολταϊκού στοιχείου που χρησιμοποιείται στην άσκηση.)

Εισάγετε διαφορετικές τιμές για τη θερμοκρασία στο πεδίο **Insert Temperature** και παρατηρήστε πώς η θερμοκρασία επηρεάζει την προσαρμογή της συνάρτησης photovoltaic στις μετρήσεις σας.

Παρατηρήστε ότι στη συνάρτηση photovoltaic υπάρχουν δύο μεγέθη που χαρακτηρίζουν την απόκριση του φωτοβολταϊκού στοιχείου:

A) Η τιμή του ρεύματος όταν η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου μηδενίζεται ($V=0$). Η τιμή αυτή ονομάζεται **ρεύμα βραχυκύκλωσης** (short circuit: I_{sc}).

B) Η τιμή της τάσης στα άκρα του φωτοβολταϊκού όταν το ρεύμα είναι μηδενικό ($I=0$). Η τάση αυτή ονομάζεται **τάση ανοιχτού κυκλώματος** (open circuit: V_{oc}).

Το πρόγραμμα που πραγματοποιεί την προσαρμογή της καλύτερης καμπύλης της μορφής που δίδεται στην εξίσωση (1) η οποία διέρχεται από τις πειραματικές μετρήσεις σας, υπολογίζει την τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) καθώς και την τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{sc}) και τις αναγράφει επάνω στον καμβά του γραφήματος. Αναγνωρίστε τις επάνω στη γραφική παράσταση των μετρήσεών σας.

7. Κρατήστε αντίγραφο της γραφικής παράστασης σε αρχείο (κουμπί **Save**)
8. Κάντε τη γραφική παράσταση της ισχύος συναρτήσει της τάσης (P-V) (κουμπί **Plot**).
9. Κάντε προσαρμογή των μετρήσεών σας με βάση την εξίσωση (1) (κουμπί **Fit**). Το πρόγραμμα υπολογίζει την τιμή της μέγιστης ισχύος (P_{max}) και την αναγράφει επάνω στον καμβά της γραφικής παράστασης.
10. Δημιουργήστε αντίγραφο της γραφικής παράστασης P-V στο δίσκο του υπολογιστή (κουμπί **Save**).
11. Υπολογίστε τη μέγιστη απόδοση του φωτοβολταϊκού (efficiency), με δεδομένο ότι η φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφάνειας (irradiance) των LEDs που φωτίζουν το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι $6W/cm^2$. Εισάγετε στο πεδίο P_{MAX} την τιμή της μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point) η οποία έχει υπολογιστεί στο βήμα 7. Το πρόγραμμα υπολογίζει (κουμπί efficiency) την τιμή της απόδοσης του φωτοβολταϊκού, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της φωτεινής ροής ανά μονάδα επιφάνειας και το εμβαδό της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού, από τον τύπο:
$$efficiency = \frac{P_{max}}{\Phi}$$
, όπου Φ είναι η ολική φωτεινή ροή που δέχεται η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου (ίση με $1600mm^2$). Σημειώστε την τιμή της απόδοσης στο φύλλο μετρήσεών σας γιατί θα την χρειαστείτε στο επόμενο βήμα.

5.1.2 Εξάρτηση απόδοσης από την Γωνία Πρόσπτωσης

12. Επιλέξτε την καρτέλα **Angle Dependence**.

13. Μετακινήστε το φωτοβολταϊκό στις 70 μοίρες (κουμπί **Tilt Degrees**) και πριν πάρετε μετρήσεις καθαρίστε τον πίνακα μετρήσεων (κουμπί **Clear Data**).
14. Πάρτε μετρήσεις μεταβάλλοντας το φορτίο στα άκρα του φωτοβολταϊκού (κουμπί **Load**). Οι μετρήσεις σας αναγράφονται στον αντίστοιχο πίνακα. Καταγράψτε τις μετρήσεις σας σε αρχείο (κουμπί **Save Data**). Στο όνομα του αρχείου γράψτε την γωνία και την θερμοκρασία που αντιστοιχούν στις μετρήσεις σας.
15. Κάντε το γράφημα P-V (κουμπί **MultiPlot**).
16. Δημιουργήστε αντίγραφο της γραφικής παράστασης στον δίσκο (κουμπί **Save**).
17. Κάντε προσαρμογή (fit) στις μετρήσεις σας (κουμπί **Fit**) αφού εισάγετε κατάλληλη τιμή της θερμοκρασίας στο πεδίο **Temperature**. Το πρόγραμμα που κάνει την προσαρμογή επιστρέφει την τιμή της μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point P_{MAX}) πάνω στο γράφημα. Συμπληρώστε στον κατάλληλο πίνακα της καρτέλας την τιμή P_{MAX} της μέγιστης ισχύος και την τιμή της γωνίας στην οποία αντιστοιχεί.
18. Αλλάξτε τη γωνία στις 60 μοίρες (κουμπί **Tilt Degrees**) και μετά πατήστε **Clear Data** πριν πάρετε νέες μετρήσεις.
19. Επαναλάβετε τα βήματα 2 έως 6 και εισάγετε) στον κατάλληλο πίνακα τη νέα τιμή P_{max} που υπολογίζεται από την προσαρμογή (fit).
20. Εισάγετε στον πίνακα την τιμή P_{max} που είχατε βρει στην προηγούμενη καρτέλα όταν το φωτοβολταϊκό ήταν στις 90 μοίρες.
21. Κάντε τη γραφική παράσταση της μέγιστης ισχύος συναρτήσε της γωνίας (κουμπί **Plot**)
22. Κρατήστε αντίγραφο του παραπάνω γραφήματος(κουμπί **Save**).
23. Προκειμένου να συγκρίνετε όλες τις παραπάνω μετρήσεις σας σε κάθε διαφορετική γωνία, φορτώστε (κουμπί **Open**) τα αρχεία των μετρήσεων σας υπό διαφορετική γωνία στον πίνακα των μετρήσεων και στη συνέχεια κάνετε τη γραφική παράσταση των συγκριτικών μετρήσεων (κουμπί **Multiplot**). Κρατήστε αντίγραφο του συγκριτικού γραφήματος (κουμπί **Save**).
24. Σχολιάστε τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας σχετικά με την εξάρτηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού από τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός.
- 25.

5.1.3 Εξάρτηση απόδοσης από την Ένταση Φωτεινής Ακτινοβολίας

1. 2 Επιλέξτε την καρτέλα **irradiance dependence**.
2. Φωτίστε το φωτοβολταϊκό με 85% της πλήρους φωτεινότητας (κουμπί **Brightness**). (Στο πεδίο **irradiance** αναγράφεται αυτόματα η φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφάνειας που αντιστοιχεί σε αυτό το ποσοστό). Πριν πάρετε μετρήσεις ανανεώστε τον πίνακα μετρήσεων (κουμπί **Clear**). Καταγράψτε τις μετρήσεις σας σε αρχείο (κουμπί **Save Data**). Στο όνομα του αρχείου γράψτε τη φωτεινότητα και την θερμοκρασία που αντιστοιχούν στις μετρήσεις σας.
3. Κάντε το γράφημα P-V (κουμπί **MultiPlot**).
4. Σώστε το γράφημα (κουμπί **Save**) και αλλάξτε το όνομα του αρχείου.
5. Κάντε προσαρμογή (fit) στις μετρήσεις σας (κουμπί **Fit**) αφού εισάγετε κατάλληλη τιμή για την θερμοκρασία στο πεδίο **Temperature**. Το πρόγραμμα που κάνει την προσαρμογή επιστρέφει την τιμή της μέγιστης ισχύος (P_{max}) πάνω στο γράφημα. Συμπληρώστε στον κατάλληλο πίνακα της καρτέλας την τιμή της μέγιστης ισχύος και την τιμή της γωνίας στην οποία αντιστοιχεί.
6. Αλλάξτε τη φωτεινότητα στο 79% (κουμπί **Brightness**) και πατήστε **Clear Data** πριν πάρετε νέες μετρήσεις.
7. Επαναλάβετε τα βήματα 2 έως 5 και εισάγετε στον κατάλληλο πίνακα τη νέα τιμή P_{max} που έχετε βρει από το fit.

8. Εισάγετε στον πίνακα και την τιμή P_{max} που ειχατε βρει όταν η φωτεινότητα ήταν στο 100% (παράγραφος 2.1)
9. Κάντε τη γραφική παράσταση της μέγιστης ισχύος συναρτήσει της φωτεινότητας (κουμπί **Plot**).
10. Κρατήστε αντίγραφο της παραπάνω γραφικής παράστασης (κουμπί **Save**) αλλάζοντας το όνομα του αρχείου.
11. Προκειμένου να συγκρίνετε όλες τις παραπάνω μετρήσεις σας σε κάθε διαφορετική φωτεινότητα, φορτώστε τα αρχεία των μετρήσεών σας υπό διαφορετική φωτεινότητα στον πίνακα των μετρήσεων (κουμπί **Open**) και στη συνέχεια πατήστε το κουμπί **Multiplot**. Κρατήστε αντίγραφο του συγκριτικού γραφήματος (κουμπί **Save**).
12. Σχολιάστε τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας σχετικά με την εξάρτηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού από την φωτεινή ροή .

5.1.4 Εξάρτηση απόδοσης από την Θερμοκρασία

1. 3 Επιλέξτε την καρτέλα **simulation**.
2. Ανοίξτε (κουμπί **Open**) το αρχείο των μετρήσεων που έχουν ήδη συλλεχθεί και αντιστοιχούν στις εξής συνθήκες: Το φωτοβολταϊκού στοιχείο να βρίσκεται υπό γωνία 90° σε σχέση με τη φωτεινή πηγή, να φωτίζεται με φωτεινή ροή ίση με $6mW/cm^2$ και η θερμοκρασία του να είναι $T=25^\circ C$.
3. Κάντε τη γραφική παράσταση των μετρήσεων τάσης και ρεύματος που αντιστοιχούν στις παραπάνω συνθήκες (κουμπί **Plot data**).
4. Εισάγετε στο πεδίο **Temperature** την τιμή 25 που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού. Πατήστε το κουμπί **Data validation** για να δείτε πάνω στο γράφημα το θεωρητικό μοντέλο που προσομοιώνει τα πειραματικά δεδομένα σας. Το πρόγραμμα επιστρέφει πάνω στον καμβά του γραφήματος την τιμή του ρεύματος κόρου (I_{sc}) και τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) που αντιστοιχούν στις συνθήκες: γωνία 90° , φωτεινή ροή ίση με $6mW/cm^2$ και θερμοκρασία $T=25^\circ C$. Εισάγετε αυτές τις τιμές στον πίνακα **Fit Outputs** προκειμένου το πρόγραμμα να δημιουργήσει με βάση τις παραπάνω τιμές το θεωρητικό μοντέλο που προσομοιώνει την εξάρτηση της απόκριση του φωτοβολταϊκού στοιχείου από την θερμοκρασία.
5. Εισάγετε πόσες μετρήσεις θέλετε το πρόγραμμα να προσομοιώσει στο πεδίο **Number of Events** .
6. Εισάγετε στον πίνακα **Insert Temperature** τέσσερις τιμές θερμοκρασίας για τις οποίες θέλετε να δείτε ποια θα είναι η απόκριση του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
7. Πατήστε το κουμπί **Temperature Dependence**.
8. Κρατήστε αντίγραφο του γραφήματος (κουμπί **Save**).
9. Σχολιάστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσής σας. Πώς εξαρτάται η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου με την αύξηση της θερμοκρασίας;

Βιβλιογραφία

- Michael R. Starr Sir William Halcrow and Partners, 2015, “Photovoltaic Power for Europe”

- <http://www.imerisia.gr/article.asp?catid=27198&subid=2&pubid=10325137>
- Martin Kaltenbrunner, 2011, “Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility”
- Φυσική, Θερμότητα – Ηλεκτρισμός, σελ 198-199, Δ.Σ. Κυριάκος, αναπληρωτής καθηγητής, Γ.Λ. Μπλήρης, καθηγητής τμήματος Φυσικής Α.Π.Θ. εκδόσεις Ζήτη 1998 Θεσσαλονίκη
- Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για δυνητικούς χρήστες, Σύνοψη Τομέας εκπαίδευσης ΚΑΠΕ, 2006 Αθήνα
- Solar Generation IV Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020 Crispin Aubrey - European Photovoltaic Industry Association– 2007
- Φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα: παρούσα κατάσταση και προοπτικές Γ. Βόκας & Χρ. Πρωτογερόπουλος 10ο Εθνικό Συνέδριο για την Ενέργεια
- “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ”, Ζερβός Α., Πολυτεχνειακές Εκδόσεις, Αθήνα 2005.
- The current state of the PV markets and PV technologies Dr. STATHIS TSELEPIS Proceedings of International Conference: “The Integration of the Renewable Energy Systems (R.E.S.) into the Building Structures”, 7-10 July 2005, Patra, Greece
- Toby Couture, Yves Gagnon. “An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment”. Elsevier, 18 November 2009
- Chi-Jen Yang. “Reconsidering solar grid parity”. Elsevier, 24 March 2010
- A.M. Papadopoulos, M.M. Karteris. “An assessment of the Greek incentives for photovoltaics”. Elsevier, 9 March 2009