

**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ- ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**



**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ-ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ
ΤΑΣΕΩΣ ΑΠΟ ΣΥΝΕΧΗ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗ (230V-50Hz)**



ΚΩΔΙΚΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: 08127ΕΣ

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΑΝΑΛΗΨΗΣ: 5/03/2008

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ: 9/02/2009

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΟΥΣΙΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΔΗΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ Κ.Α.Σ 503066
ΜΙΣΑΗΛΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ Κ.Α.Σ 503037

Ευχαριστούμε

Τον Γουσιόπουλο Αθανάσιο
Και τον Γιακουμή Άγγελο

Πρόλογος

Η πρώτη παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου έγινε το 1839, από τον πειραματικό Φυσικό Edmund Becquerel, σε ηλεκτρολυτικά υγρά. Πέρασαν περισσότερο από εκατό χρόνια παρατηρήσεων και πειραματικών προσπαθειών για την ανάδειξη της σημασίας και του ρόλου του φαινομένου αυτού και την αξιοποίησή του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Έκτοτε εντατικοποιήθηκαν οι προσπάθειες για δημιουργία ΦΒ στοιχείων υψηλής και σταθερής απόδοσης. Όταν το ΦΒ στοιχείο φωτίζεται προκαλείται στο εσωτερικό του ηλεκτρικό ρεύμα (φωτόρευμα). Με κατάλληλη κατασκευή ηλεκτρικού κυκλώματος μπορεί να γίνει μετατροπή τάσης από συνεχή (DC) σε εναλλασσόμενη (230V-50HZ).

Στο πρακτικό τμήμα της πτυχιακής μας αυτό ακριβώς διαπραγματευόμαστε, δηλ την αναζήτηση και την κατασκευή του κυκλώματος που με την κατάλληλη συνδεσμολογία οδηγεί στην μετατροπή της τάσης από συνεχή (12VDC) σε εναλλασσόμενη (230VAC-50HZ).

Σήμερα, η τεχνολογία των ΦΒ στοιχείων έχει φτάσει σε υψηλά επίπεδα ωριμότητας, που προδιαγράφουν με σιγουριά την ευρεία διείσδυση τους, μέσα στην τρέχουσα δεκαετία, στο ενεργειακό δυναμικό κάθε χώρας.

Στις αναπτυσσόμενες βιομηχανικά χώρες, έχει δοθεί ήδη σημαντική βαρύτητα τόσο στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης της τεχνολογίας του βασικού κυττάρου μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, όσο και της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, που συμπληρώνουν μια ολοκληρωμένη ΦΒ εγκατάσταση.

Παράλληλα, οι υψηλοί ρυθμοί εργοστασιακής παραγωγής ΦΒ πλαισίων διεθνώς καθώς και οι αυξανόμενοι ρυθμοί εγκατάστασής τους σε παγκόσμια κλίμακα, ενισχύουν την προοπτική ανάπτυξης νέων επαγγελματικών δραστηριοτήτων στο συγκεκριμένο τομέα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Περίληψη</u>	6
------------------------------	---

Εισαγωγή

I. Η ενέργεια ως στόχος και ως προοπτική ανάπτυξης.....	8
II. Οι πηγές ενέργειας σήμερα.....	8
III. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια).....	9

1^ο Κεφάλαιο

1.1 Ο ήλιος.....	11
1.2 Η ενέργεια του Ηλίου.....	11
1.3 Μέση, ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον ήλιο.....	12

2^ο Κεφάλαιο

2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου.....	14
2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων υλικών, λεπτών επιστρώσεων.....	18
2.3 Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	21
2.4 Τεχνικές δημιουργίας των επαφών p-n ΦΒ στοιχείων.....	23
2.5 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του ΦΒ στοιχείου. Αντιανακλαστική επίστρωση...27	
2.6 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου.....	29
2.7 Η καμπύλη I-V ενός ΦΒ στοιχείου.....	31
2.8 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων. Η έννοια της ισχύος αιχμής.....	32
2.9 Η απόδοση του ΦΒ στοιχείου.....	34
2.10 Αναλυτικός προσδιορισμός του ιδανικού ορίου απόδοσης των ΦΒ στοιχείων...35	
2.11 Τρόποι σύνδεσης ΦΒ στοιχείων.....	36
2.12 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	39
2.13 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.....	39
2.14 Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα.....	41
2.15 Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα.....	44

3° Κεφάλαιο

3.1 Ο μετατροπέας DC-AC (Inverter).....	46
3.2 Επιλογή του μετατροπέα DC/AC.....	50
3.3 Επιλογή μετασχηματιστή.....	55
3.4 Πρόταση για πρακτική εφαρμογή του inverter.....	57

4° Κεφάλαιο

4.1 Εισαγωγή.....	58
4.2 Λειτουργία κυκλώματος.....	58
4.3 Σχεδίαση κυκλώματος μέσω σχεδιαστικού προγράμματος (multisim).....	61
4.4 Βήματα κατασκευής του κυκλώματος inverter.....	63
4.5 Σύγκριση μετρήσεων (πολυμέτρου με multisim).....	67
4.6 Κυματομορφές του inverter.....	68
4.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά του inverter.....	69

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	70
------------------------	-----------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71
--------------------------	-----------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	72
-----------------------	-----------

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσης πτυχιακής εργασίας μελετήθηκε ο τρόπος κατασκευής και χρήσης φωτοβολταϊκών στοιχείων όπως και τα είδη τους. Ακόμα, μας απασχόλησε η κατασκευή κυκλώματος μετατροπής της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη, στο οποίο γίνεται η μετατροπή των 12V συνεχούς τάσης σε 230V εναλλασσόμενης τάσης με συχνότητα 50HZ. Η παρουσίαση αυτών των θεμάτων γίνεται εντός 4 κεφαλαίων, τα οποία απαρτίζουν δυο θεματικές ενότητες, τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (τρία τμήματα) και την πρακτική εφαρμογή (ένα τμήμα). Η δομή της εργασίας ακολουθεί την εξής λογική:

Στο πρώτο τμήμα της εργασίας, το εισαγωγικό Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στον ήλιο, ως μια μορφή ενέργειας φιλικά διακείμενη προς το περιβάλλον.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται εκτενής αναφορά στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, και συγκεκριμένα στα είδη τους, στην κατασκευή τους και στην ενεργειακή απόδοση του καθενός από αυτά.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται βιβλιογραφία σχετικά με μετατροπέα τάσεως από συνεχή σε εναλλασσόμενη (230V-50HZ).

Το δεύτερο μέρος της εργασίας που αντιστοιχεί στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η κατασκευή του κυκλώματος στο οποίο γίνεται η μετατροπή των 12V συνεχούς τάσης σε 230V εναλλασσόμενης τάσης με συχνότητα 50HZ.

Summary

Within the bounds of the present graduate project there was a close study of the way of the photovoltaic cells manufacture, use as well as their kinds. In addition we dealt with the making of a circuit inverter, where there is conversion of 12V DC to 230V 50Hz AC. The above subjects are presented into four chapters, which constitute two thematic unities, the bibliographical review (three parts) and the practical implementation. The structure of the project is as following.

In the first part of the project in the introduction Chapter 1 we talk about sun, as a source of energy friendly, towards the environment.

In Chapter 2 there is an extensive description of the photovoltaic cells and their kinds in particular their manufacture and the energetic efficiency of each one of them.

In Chapter 3 we present bibliography concerning the inverter (230V-50Hz).

The second part of the project, which is Chapter 4, there is a description of the presentation of the circuit manufacture where there is modification of 12V DC to 230V- 50Hz AC.

I. Η ενέργεια ως στόχος και ως προοπτική ανάπτυξης

Η ενέργεια αποτέλεσε και αποτελεί τον κινητήριο μοχλό κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας. Σ' όλη την ιστορική του πορεία, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε με εφευρετικότητα τις δυνατότητες που του παρέχει απλόχερα η ίδια η φύση, τη δύναμη της φωτιάς, του νερού, του ανέμου και του ήλιου, με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών της διαβίωσης του.

Στους πιο πρόσφατους αιώνες, χρησιμοποίησε την ενέργεια από την καύση του κάρβουνου και του πετρελαίου και βρήκε τρόπο να την μετατρέπει στην περισσότερο εξευγενισμένη των μορφών της, τον ηλεκτρισμό.

Συνάμα, άρχισαν να επιβεβαιώνονται, με επιστημονικά τεκμηριωμένο τρόπο, οι προβλέψεις για σημαντικές επιβαρυντικές συνέπειες της μέχρι σήμερα συμπεριφοράς του ανθρώπου στο οικοσύστημα, εξαιτίας της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών καυσίμων και πολλών, τεχνολογικών προϊόντων.

Είναι γεγονός αδιαμφισβήτητο, η σημαντική συμβολή των πηγών ενέργειας μεγάλης ισχύος στην τεχνολογική πρόοδο, απ' την οποία προέκυψαν πολλά θετικά αποτελέσματα. Μέσα από την ιστορική αναγκαιότητα των συμβατικών καυσίμων ξεπήδησαν νέες και συνεχώς βελτιώνονται παλαιότερες μέθοδοι, εξευγενισμένης παραγωγής ενέργειας, χωρίς πρακτικά οικολογικές επιβαρύνσεις. Ο ήλιος και ο άνεμος θα έχουν τον πρώτο λόγο στις επόμενες δεκαετίες σαν εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

II. Οι πηγές ενέργειας σήμερα

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σ' αυτές που

καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια.

Οι δεύτερες, έχουν βασική τους προέλευση τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη απ' τον Ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης.

III. Μια από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: φωτοβολταϊκή

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (photovoltaic cell) είναι, γενικά, ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η βιομηχανική παραγωγή έχει προωθηθεί, είναι αυτά που βασίζονται στη δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή. Τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τύπου p. Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια.

Όταν το ΦΒ στοιχείο φωτίζεται προκαλείται στο εσωτερικό του ηλεκτρικό ρεύμα (φωτόρρευμα), το οποίο αποδεικνύεται ευθέως ανάλογα της πυκνότητας ισχύος του ηλιακού φωτός, που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Η αναπτυσσόμενη σε ένα τυπικό ΦΒ στοιχείο, συνεχής ηλεκτρική τάση, ανοικτού κυκλώματος, είναι περίπου 0,5 μέχρι 0,7 V, ενώ το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή των 10 μέχρι 40 mA/cm², για πυκνότητα ισχύος ηλιακού φωτός 1 kW/m².

Η τεχνολογία των ΦΒ στοιχείων αναπτύχθηκε ραγδαία το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, παρ' ότι το ΦΒ φαινόμενο είχε παρατηρηθεί από τον Becquerel, το 1839. Το 1954 ανακοινώθηκε η πρώτη κατασκευή ηλιακού στοιχείου Si, με σχηματισμό επαφής p-n, με διάχυση και με απόδοση 6%, από τους Fuller, Pearson και Chapin. Οι αρχικές εμπορικές κατασκευές, πολύ υψηλού κόστους (1000 \$/Wp το 1956), με σχετική μικρή απόδοση της τάξης του 5-10 %, παρασκευάστηκαν από κρυσταλλικά υλικά, κυρίως από κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si).

Σήμερα οι αποδόσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων από κρυσταλλικό πυρίτιο βρίσκονται στα επίπεδα του 22%, για ΦΒ πλαίσια διαστημικών κατασκευών και στο επίπεδο του 14-16% για βιομηχανική-οικιακή χρήση, το δε κόστος των τελευταίων κυμαίνεται περί τα 5 \$/Wp, για εγκαταστάσεις μικρών συγκροτημάτων, της τάξεως του 1 kWp. Στις εγκαταστάσεις σχετικά μεγάλης ισχύος αιχμής, 50-100kWp, το κόστος αγοράς ΦΒ πλαισίων, ανά Wp, μειώνεται σχεδόν στο μισό του αντίστοιχου των εγκαταστάσεων μικρής ισχύος.

Κατά τη διάρκεια του 1980, η τάση μείωσης του κόστους βιομηχανικής παραγωγής των ΦΒ στοιχείων, οδήγησε στη χρησιμοποίηση οικονομικότερων μεθόδων παρασκευής του ενεργού υλικού. Οι μέθοδοι αυτές χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία πολύ λεπτών στρωμάτων ή υμενίων υλικού (films) κυρίως πυριτίου, σε επιμελημένα καθαρισμένη επιφάνεια, που επιτρέπει την πρόσφυση του αποτιθέμενου υλικού (άμορφο πυρίτιο, a-Si).

Οι προσπάθειες μείωσης του κόστους κατασκευής ενός ΦΒ στοιχείου οδήγησαν, τελικά, σε νέες διαφορετικές μεθόδους εναπόθεσης, με πολύ καλά αποτελέσματα π.χ με σχηματισμό ταινιών υλικού, από λειωμένη φάση, παρασκευάστηκαν ΦΒ στοιχεία, με εργαστηριακή απόδοση ~15%. Η επιφάνειά τους εμφανίζει μονοκρυσταλλικότητα κατά περιοχές, το δε υλικό ονομάζεται πολύ-κρυσταλλικό. Το πολύ-κρυσταλλικό πυρίτιο (mc-Si), χρησιμοποιείται για την παρασκευή ΦΒ στοιχείων, που μπορούν να καλύψουν μεγάλη επιφάνεια, με βιομηχανική απόδοση (ΦΒ πλαίσιο) 12-13%, πολύ κοντά στη βιομηχανική απόδοση των ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου.

Η Ολοκληρωμένη φωτοβολταϊκή διάταξη ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module), αποτελεί δε τη βασική μονάδα σύνθεσης μεγαλύτερων συστημάτων. Χρησιμοποιείται επίσης η ορολογία, φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Photovoltaic generator), όταν αναφερόμαστε στο κύριο τμήμα του ΦΒ σταθμού, το οποίο παράγει τη ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια. Η εμπρός επιφάνεια του πλαισίου προστατεύεται από γυάλινη πλάκα, ενώ η πίσω πλευρά καλύπτεται από υγρομονωτική ουσία, υψηλής αντοχής στο χρόνο.

Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει ένα ΦΒ πλαίσιο σε ένα στοιχείο κατανάλωσης, κάτω από δεδομένη πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να πάρει μέγιστη ισχύ, όταν συνδεθεί στα άκρα του καταναλωτής κατάλληλης αντίστασης. Η μέγιστη

ισχύς, σε καθορισμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου (πρότυπες συνθήκες) , αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του και ονομάζεται *ισχύς αιχμής*. Στο εμπόριο διατίθενται ΦΒ πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου, σε ευρεία περιοχή τιμών ισχύος αιχμής.

1.1 Ο ήλιος

Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι, με μάζα $2 \cdot 10^{30}$ kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία $5 \cdot 10^9$ χρόνια. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι ~ 5.800 K, ενώ η εσωτερική, περίπου 15.000.000 K. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικού του κατά τις οποίες μετατρέπεται το υδρογόνο σε ήλιο.



Εικόνα 1.1 Ο ήλιος

1.2 Η ενέργεια του Ηλίου

Ο Ήλιος δεν είναι τίποτε άλλο παρά μια τεράστια σφαίρα από διάφορα αέρια κυρίαρχα των οποίων είναι το υδρογόνο και το ήλιος. Η θερμοκρασία που επικρατεί στον Ήλιο είναι τόσο μεγάλη ώστε να εξαερώνονται ακόμη και τα μέταλλα. Η ποσότητα ενέργειας που παράγεται είναι απίστευτη. Έχει προσδιοριστεί πως σε κάθε δευτερόλεπτο ο Ήλιος εκπέμπει τόση ενέργεια όση θα έδινε μια έκρηξη 4 δισεκατομμυρίων βομβών υδρογόνου των 100 μεγατόνων η κάθε μία! Δηλαδή κάπου με μερικές εκατοντάδες

δισεκατομμύρια τρισεκατομμυρίων κιλοβατώρες! (Συγκριτικά αν αυτό το χρέωνε η ΔΕΗ θα έπρεπε ο ελληνικός λαός να πληρώνει τον ετήσιο προϋπολογισμό της Ελλάδας για 10.000 τρισεκατομμύρια χρόνια!). Και όλα αυτά για ένα μόνο δευτερόλεπτο, ενώ ο Ήλιος εκπέμπει εδώ και 5 δισεκατομμύρια χρόνια και θα συνεχίσει τουλάχιστον για άλλα τόσα.

1.3 Μέση, ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον ήλιο

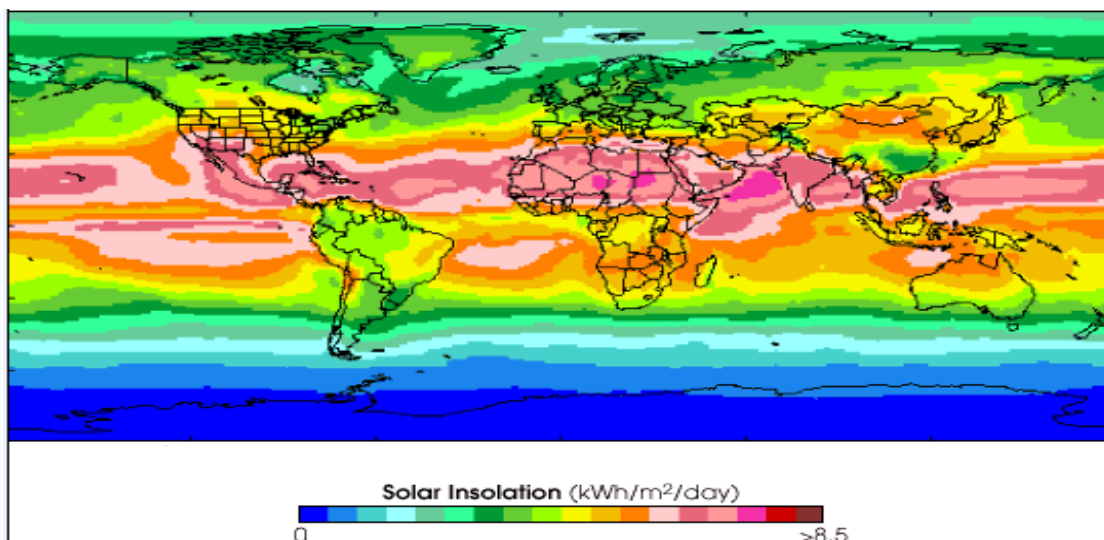
Η ενέργεια ανά m^2 , που φτάνει στην επιφάνεια της Γης μέσα σε μια μέρα, εξαρτάται από την κλίση της συλλεκτικής επίπεδης επιφάνειας, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, τη μέρα του χρόνου και από τις συγκεντρώσεις των διάφορων αερίων, υγρών και στερεών συστατικών και αιωρημάτων της ατμόσφαιρας κατά την ημέρα εκείνη. Οι συλλεκτικές επιφάνειες των μετρικών οργάνων (αισθητήρων), μπορεί να προσανατολιστούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πειράματος και τις προδιαγραφές των οργάνων αυτών. Προκειμένου, όμως, να υπάρχουν συγκρίσιμα στοιχεία, σε διεθνή κλίμακα, αναφερόμαστε σε μετρήσεις με αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται με τη συλλεκτική τους επιφάνεια, οριζόντια. Τυπικές μορφές εξέλιξης μέσα στην ημέρα, της πυκνότητας ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (G (kW/m^2)), απεικονίζονται στο σχήμα 1.1. Στο ίδιο σχήμα αναγράφονται και οι αντίστοιχες ενεργειακές πυκνότητες H (σε kWh/m^2), οι οποίες προκύπτουν ως ολοκλήρωμα ή «εμβαδόν» κάτω απ' την αντίστοιχη καμπύλη. Σημειώνεται πάντως, ότι, κατά τη διάρκεια μερικής παρουσίας σύννεφων, γύρω απ' την κατεύθυνση του ήλιου, μπορεί να παρατηρηθούν τιμές της πυκνότητας ισχύος μεγαλύτερες των τιμών που θα καταγράφονταν χωρίς την παρουσία τους. Οι συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις προέρχονται από μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο "Φωτοβολταϊκό Πάρκο", στο Ηράκλειο της Κρήτης, με γεωγραφικό πλάτος $35,5^\circ$ και γεωγραφικό μήκος $\sim 25^\circ$. Στον τόπο αυτό, η μέση, καθ' όλο το έτος, ημερήσια τιμή της ηλιακής ενέργειας, σε οριζόντιο επίπεδο για μια σειρά πέντε ετών, έχει προκύψει ίση με μέση τιμή $H=5 kWh/m^2d$. Η ημερήσια μέση πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας την συγκεκριμένη ημέρα, προκύπτει διαιρώντας το αντίστοιχο ολοκλήρωμα H (εκφρασμένο π.χ σε $kWh/m^2 day$), δια των 24 h (μέση τιμή G , όπου $T=24 h$). Η μέση

τιμή της πυκνότητας ισχύος αντιπροσωπεύει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν ο τόπος φωτίζεται όλο το 24ωρο, με ηλιακή ακτινοβολία σταθερής πυκνότητας ισχύος. Αποτελεί τυπικό συγκριτικό στοιχείο ηλιακής ακτινοβολίας, για διαφορετικούς τόπους.

Σχήμα

1.1 Καταγραφή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, σε πυρανόμετρο με οριζόντια επιφάνεια στο Ηράκλειο της Κρήτης ($\lambda=35,5^\circ$), σε τρεις χαρακτηριστικές μέρες κατά τη διάρκεια του έτους

Σε περιοχές κοντά στον Ισημερινό, η τιμή είναι μεγαλύτερη (μέχρι και $7\text{kWh/m}^2\text{d}$) και αντίστοιχα, σε περιοχές στα όρια των Εύκρατων ζωνών, είναι μικρότερη ($<3\text{kWh/m}^2\text{d}$). Ο χάρτης, παρακάτω (εικόνα 1.2) δείχνει την κατανομή της μέσης, ετησίως, ημερήσιας ενεργειακής απολαβής από τον ήλιο. Άξιο παρατήρησης είναι η ελαττωμένη τιμή της σε περιοχές της Τροπικής ζώνης (γύρω από τον Ισημερινό). Η υψηλή υγρασία των περιοχών αυτών, με την έντονη βλάστηση, έχει ως αποτέλεσμα την ισχυρή ελάττωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 1.2 Χάρτης παγκόσμιας ενεργειακής απολαβής ηλιακής ακτινοβολίας

2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου

Η πυκνότητα της ισχύος που παρέχει ο ήλιος στην εξωτερική ατμόσφαιρα της γης είναι περίπου 1.37kW/m^2 . Ένα τμήμα της ηλιακής ενέργειας απορροφάτε και διαχέεται στην ατμόσφαιρα, οπότε η μέγιστη τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής πυκνότητας ισχύος είναι περίπου 1kW/m^2 το μεσημέρι στον ισημερινό. Η ολική ηλιακή ισχύς που φθάνει στην επιφάνεια της γης είναι εξαιρετικά υψηλή και θα μπορούσε να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη, αν μετατρέπονταν σε ηλεκτρική.

Στην άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκές μονάδες (photovoltaic modules), οι οποίες παρέχονται από αρκετούς κατασκευαστές σε διάφορες μορφές. Το μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών μονάδων είναι ο μικρός βαθμός απόδοσης περίπου 5-17% και το υψηλό κόστος. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες συνδέονται μεταξύ τους, για την λήψη της απαιτούμενης τάσης και ισχύος, σχηματίζοντας μία φωτοβολταϊκή διάταξη (photovoltaic array). Η μεγάλη επιφάνεια που απαιτείται για την εγκατάσταση μιας φωτοβολταϊκής διάταξης, η οποία είναι $8\text{-}12\text{m}^2$ ανά kW παρεχόμενης ισχύος, αποτελεί σε ορισμένες περιπτώσεις ένα επιπλέον περιορισμό στην χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο βαθμός απόδοσης και η ισχύς μιας φωτοβολταϊκής μονάδας, η οποία εκφράζεται σε Watt peak (Wp), ορίζονται σε ορισμένες τυποποιημένες συνθήκες (Standard Test Conditions,

STC), οι οποίες αναφέρονται σε θερμοκρασία μονάδας 25°C, πυκνότητα ισχύος της φωτεινής ακτινοβολίας 1kW/m² και φασματική κατανομή AM 1.5. Στις πρακτικές εφαρμογές η ένταση της ακτινοβολίας είναι πολύ μικρότερη, συνήθως 200-500 W/m², η φασματική κατανομή και η θερμοκρασία της μονάδας αρκετά μεγαλύτερη 40 με 60° C. Στην μέτρηση της φωτεινής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ένα ειδικό όργανο, το οποίο ονομάζεται πυρόμετρο.

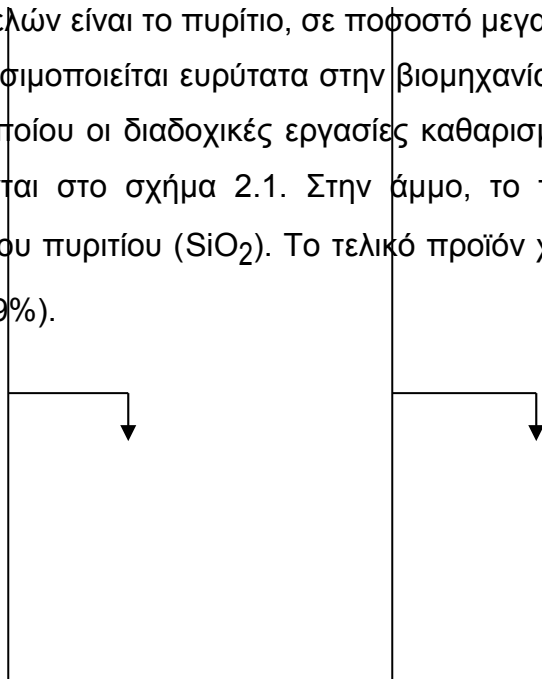
Το δομικό στοιχείο των φωτοβολταϊκών μονάδων είναι οι φωτοβολταϊκές ή ηλιακές κυψέλες (photovoltaic cells, solar cells), οι οποίες αναπτύχθηκαν στα εργαστήρια Bell το 1954, με αρχικό προορισμό τις διαστημικές εφαρμογές. Συνήθως οι φωτοβολταϊκές μονάδες κατασκευάζονται για τάσεις 12V, 24V, 48V.

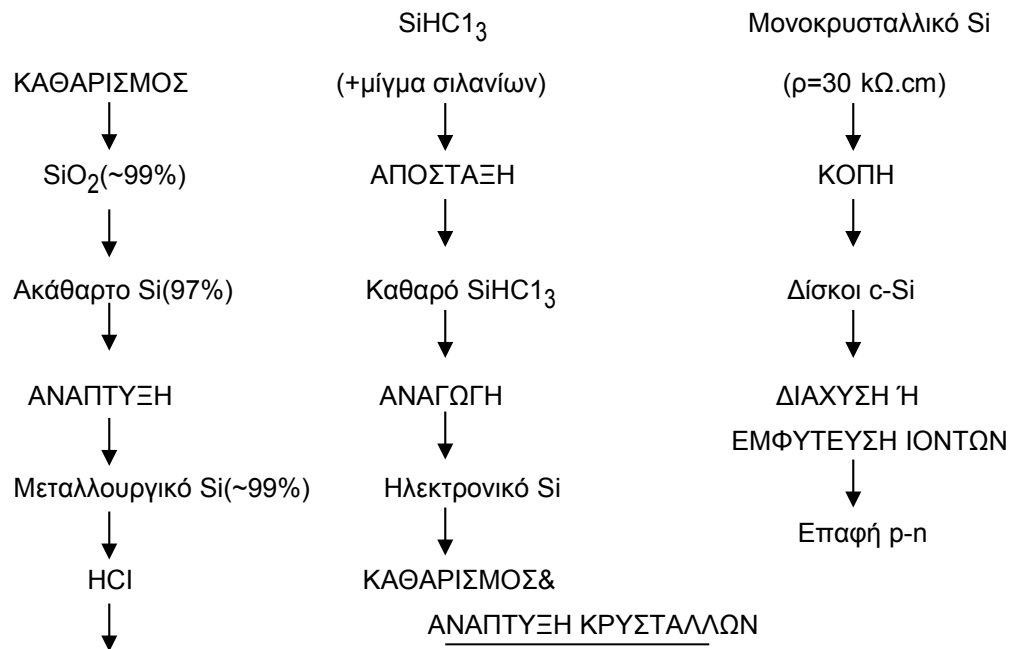
Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, με βάση έναν κβαντικό μηχανισμό, ο οποίος διατυπώθηκε το 1939 από τον Γάλλο φυσικό Edmund Bequerel και είναι γνωστός ως φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σύμφωνα με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όταν η φωτεινή ακτινοβολία προσπίπτει σε ορισμένα υλικά, απελευθερώνονται εντός των υλικών ηλεκτρικά φορτία, όταν η ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από μια τιμή χαρακτηριστική για το κάθε υλικό. Η ενέργεια E και η συχνότητα f των φωτονίων συνδέονται με τη σχέση $E=h \cdot f$ όπου h είναι σταθερά του Planck. Αν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας υπερβαίνει μια τιμή, χαρακτηριστική για το κάθε υλικό, παράγονται φορείς αγωγιμότητας.

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι συνήθως επαφές p-n, όπως οι δίοδοι κατασκευασμένες από κατάλληλα ημιαγωγά υλικά. Το πλέον χρησιμοποιούμενο υλικό κατασκευής των κυψελών είναι το πυρίτιο, σε ποσοστό μεγαλύτερο από 95%.

Το υλικό, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία των ΦΒ κυψελίδων, είναι το Πυρίτιο(Si), του οποίου οι διαδοχικές εργασίες καθαρισμού της πρώτης ύλης, της άμμου, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1. Στην άμμο, το πυρίτιο περιέχεται με την μορφή του οξειδίου του πυριτίου (SiO₂). Το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα(99,99999%).

Άμμος
↓





Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής εργασιών παραγωγής ηλεκτρονικά καθαρού πυριτίου, με πρώτη ύλη την άμμο

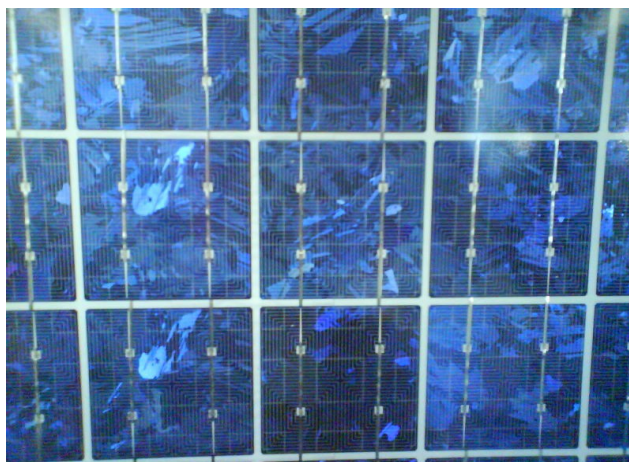
Τα ΦΒ στοιχεία πυριτίου, διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με την δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής. Οι διάφοροι τύποι είναι οι εξής:

1. ΦΒ στοιχεία κρυσταλλικού Πυριτίου(Single-crystal Silicon): Το βασικό υλικό είναι μονο-κρυσταλλικό. Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer ~300μm). Η απόδοση τους με την μορφή κυψελίδας, κυμαίνεται από ~21% έως ~24%, ενώ με την μορφή των ΦΒ πλαισίων, μεταξύ 13 έως 16%. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής. Χρώμα σκούρο μπλε.



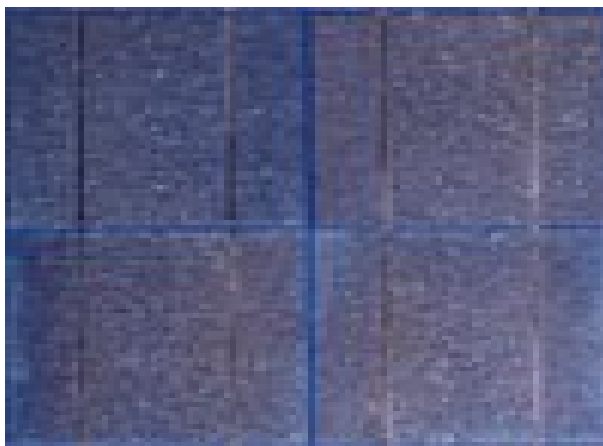
Εικόνα 2.1 Μορφή ΦΒ κυψελίδας μονοκρυσταλλικού Πυριτίου

2. ΦΒ στοιχεία πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (Multicrystalline Silicon mc-Si): Δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Συνήθως κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία. Αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα, πάχους 10 έως 50 μm . Στην επιφάνεια της κυψελίδας, διακρίνονται οι διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Τα όρια τους αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων. Άρα όσο μικρότερο μήκος των οριακών περιοχών μέσα στο δεδομένης διάστασης ΦΒ στοιχείο, τόσο καλύτερη η ηλεκτρική αγωγιμότητα τους. Γενικά, όσο μεγαλύτερες οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού ΦΒ στοιχείου, τόσο υψηλότερη η απόδοση του, η οποία κυμαίνεται από 17% έως ~20%, σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας και από 10% έως 14% σε βιομηχανική μορφή ΦΒ πλαισίου. Χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα. Το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το χρώμα τους είναι γαλάζιο.



Εικόνα 2.2 Μορφή ΦΒ κυψελίδας πολυκρυσταλλικού Πυριτίου

3. ΦΒ στοιχείο ταινίας (Ribbon Silicon): Δημιουργία λεπτής ταινίας από τηγμένο υλικό. Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο με απόδοση περίπου το 13%. Μέθοδος υψηλού κόστους και προς το παρόν, περιορισμένης βιομηχανικής παραγωγής.



Εικόνα 2.3 Μορφή ΦΒ κυψελίδας στοιχεία ταινίας

4. ΦΒ στοιχεία άμορφου Πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon): Τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων (films), θεωρητικά πολύ χαμηλού κόστους παραγωγής, εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Το λεπτό επίστρωμα σχηματίζεται πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους. Η απόδοση των ΦΒ στοιχείων αυτών μειώνεται έντονα, στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 6 έως 8%. Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την Παρασκευή σύνθετων ΦΒ στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος π.χ παρασκευάζονται ΦΒ στοιχεία από κράμα Πυριτίου με Άνθρακα και Γερμάνιο, τριών επαφών, a-SiGe (~1,4eV), a-SiC(1,85eV), με σταθεροποιημένη απόδοση ~ 13%. Το ιδιαίτερο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδοχικών ΦΒ στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες ΦΒ πλαισίων



Εικόνα 2.4 Μορφή ΦΒ κυψελίδας άμορφου Πυριτίου

2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων υλικών, λεπτών επιστρώσεων

Στην κατηγορία αυτή, εκτός από τα ΦΒ στοιχεία Πυριτίου, λεπτής επίστρωσης (a-Si:H), τα οποία σήμερα αποτελούν τα περισσότερα διαδεδομένα στον κόσμο, εξαιτίας των πράγματι αξιόλογων χαρακτηριστικών τους, κατασκευάζονται ΦΒ στοιχεία από άλλα υλικά. Γενικά, τα ΦΒ στοιχεία αυτά, παρά τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματά τους σε σχέση με το πυρίτιο, παρουσιάζουν ακόμη, μειονεκτήματα, τα οποία στην καλύτερη περίπτωση, περιορίζουν την χρήση τους σε ειδικές εφαρμογές. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα ΦΒ λεπτών επιστρώσεων:

1) Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS με προσθήκη γαλλίου CIGS)

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των τεχνολογιών λεπτής επίστρωσης . Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.



Εικόνα 2.5 Μορφή ΦΒ δισεληνοϊνδιούχου χαλκού

2) Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

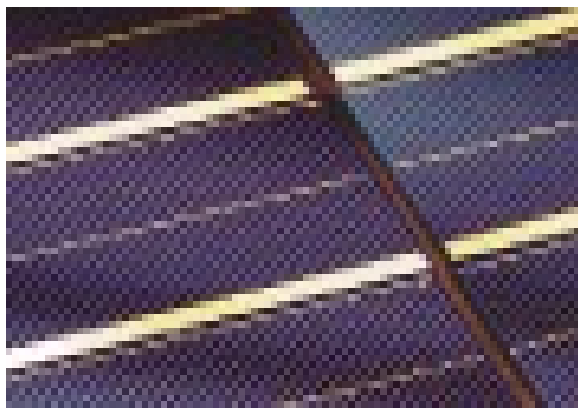
Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει φθάσει το 16%. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic).



Εικόνα 2.6 Μορφή ΦΒ Τελουριούχου Κάδμιου (CdTe)

3) Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση του σε εφαρμογές ηλιακών concentrators. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι αντέχει σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.



Εικόνα 2.7 Μορφή ΦΒ Αρσενικούχου Γάλλιου (GaAs)

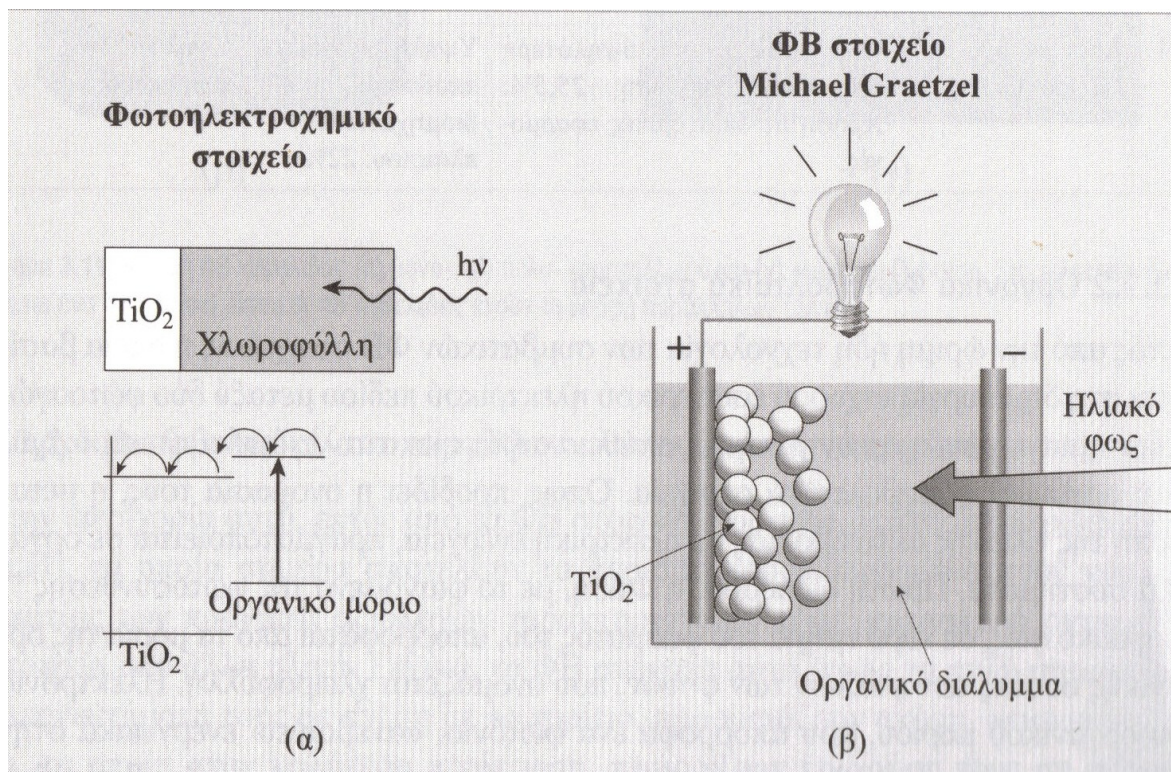
2.3 Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Εκτός από την ώριμη ήδη τεχνολογία των συμβατικών ΦΒ στοιχείων, η οποία βασίζεται στη δημιουργία ισχυρού εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ δύο φωτοαγώγιμων ημιαγωγών, η ερευνητική προσπάθεια στράφηκε στα λεγόμενα ηλεκτροχημικά ή οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Όπως, προδίδει η ονομασία τους, η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, πραγματοποιείται σε οργανικά συστήματα. Πρώτη διδάξασα, η Φύση, με το φαινόμενο της φωτοσύνθεσης.

Το ηλιακό φως, σε ευρύ τμήμα του φάσματος του, απορροφάται από τα μόρια της οργανικής ουσίας των φύλλων των φυτών, που ονομάζεται χλωροφύλλη. Ηλεκτρόνιο του οργανικού μορίου, που απορροφά ένα φωτόνιο, «ανεβαίνει» ενεργειακά στην επόμενη ενεργειακή στάθμη του μορίου και περνά σε γειτονικό πρωτεϊνικό σύμπλοκο του φύλλου, συμμετέχοντας στις αντιδράσεις που συμβαίνουν σ' αυτά, κατά τις οποίες δημιουργούνται υδρογονάνθρακες, με ταυτόχρονη παραγωγή οξυγόνου.

Μια παρόμοια ηλεκτρονική διαδικασία μπορούμε να αναπαράγουμε στο εργαστήριο, σε διάταξη αποτελούμενη από ηλεκτρολυτικό διάλυμα που περιέχει έγχρωμη οργανική ουσία (Dye, π.χ. χλωροφύλλη), σε επαφή με ημιαγωγό πλάκα TiO_2 (Σχήμα 2.2α). Τα φωτόνια του ηλιακού φωτός απορροφώνται από τα μόρια της οργανικής ουσίας, δημιουργούμενων διεγερμένων ηλεκτρονίων σε ενεργειακή στάθμη του οργανικού μορίου, που βρίσκεται ψηλότερα από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Τα ηλεκτρόνια περνούν στον ημιαγωγό, ως ηλεκτρόνια της ζώνης του και καταλήγουν στο αρνητικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Το ηλεκτρικό κύκλωμα κλείνει, με μεταφορά φορτίου από το αρνητικό ηλεκτρόδιο στα μόρια που έχασαν το ηλεκτρόνιό τους, μέσω των ιόντων του ηλεκτρολύτη (συνήθως, ιόντων $Iωδίου$). Το 1961, ο Melvin Calvin δημιούργησε ένα ΦΒ στοιχείο βασιζόμενο στην προηγούμενη περιγραφή, με πολύ χαμηλή απόδοση, ~0,01%.

Το σημαντικό βήμα στον τομέα αυτό έγινε από τον Ελβετό ερευνητή Michael Graetzel, το 1991. Αντικατέστησε το συμπαγή ημιαγωγό TiO_2 με ίδιο, σε λεπτό διαμερισμό, ώστε να αυξάνεται η επιφάνεια επαφής των οργανικών μορίων με τον ημιαγωγό (Σχήμα 2.2β). Το αποτέλεσμα ήταν θεαματικό. Η απόδοση του φωτοηλεκτροχημικού αυτού στοιχείου έφτανε στο 10%. Το κύριο μειονέκτημα των ΦΒ στοιχείων αυτών έγκειται στην ευπάθειά τους στο φως και η συνακόλουθη ταχεία γήρανσή τους.



Σχήμα 2.2 (α) Βασική λειτουργία φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου. Αρχικός μηχανισμός φωτοσύνθεσης. (β) Το φωτοηλεκτροχημικό στοιχείο Graetzel. Απόδοση $n=10\%$

Έκτοτε, πολλά εργαστήρια ανά τον κόσμο, επικεντρώνουν την προσπάθειά τους σε δοκιμές και τροποποιήσεις που αποσκοπούν στη βελτίωση της αποδοτικότητας και του χρόνου ζωής (μείωση του φαινομένου της γήρανσης) των ΦΒ στοιχείων της νέας αυτής τεχνολογίας, με στόχο τη βιομηχανική τους παραγωγή. Για να παρακαμφτεί το μειονεκτήματα της ευπάθειας των έγχρωμων ουσιών, που περιέχονται στα οργανικά ΦΒ στοιχεία, στο ηλιακό φως, προτάθηκαν λύσεις που βασίζονται στη χρήση υλικών σύγχρονης τεχνολογίας, όπως τα πολυμερή, καθώς και ειδικών τεχνικών βελτίωσης της αντοχής των οργανικών ουσιών στη δράση του ηλιακού φωτός. Η απόδοση των πολυμερών οργανικών ΦΒ στοιχείων έχει φτάσει σήμερα στο 2,5%. Το βασικό πλεονέκτημα των ΦΒ στοιχείων αυτής της τεχνολογίας είναι το εξαιρετικά χαμηλό κόστος παρασκευής τους, γεγονός που επιτρέπει να θεωρούμε δυνατή την αξιοποίησή τους ακόμα και με το μειονέκτημα του πολύ μικρότερου χρόνου ζωής τους σε σχέση με συμβατικά ΦΒ στοιχεία.

2.4 Τεχνικές δημιουργίας των επαφών p-n ΦΒ στοιχείων

Η Διαδικασία της δημιουργίας μιας επαφής p-n, θα μπορούσε να συνοψιστεί στο παραστατικό σχήμα 2.1 : προετοιμασία του βασικού υλικού (δηλαδή, του ενδογενούς ημιαγωγού), παρασκευή των δύο τμημάτων ημιαγωγού με προσμείξεις τύπου p και n και συνένωση των δύο τμημάτων. Στην πράξη, παρασκευάζεται, αρχικά, ο ένας εκ των δύο ημιαγωγών πρόσμειξης, π.χ ο ημιαγωγός τύπου p. Προκύπτει από τον ενδογενή ημιαγωγό, λ.χ το Πυρίτιο, το Γερμάνιο κ.α, στον οποίο προστίθεται πρόσμειξη στοιχείου από την ομάδα των αποδεκτών. Στο επόμενο στάδιο δημιουργείται, με κάποια από τις μεθόδους, που περιγράφονται στη συνέχεια, η περιοχή τύπου n, με προσθήκη στοιχείου από την ομάδα των δότες χρησιμοποιούνται, συνήθως, το Λίθιο Li, ο Φώσφορος P, το Αρσενικό As, το Αντιμόνιο Sb, το Βισμούθιο Bi, κ.α και ως αποδέκτες το Βόριο B, το Αλουμίνιο Al, το Γάλλιο Ga, το Ίνδιο In κ.α

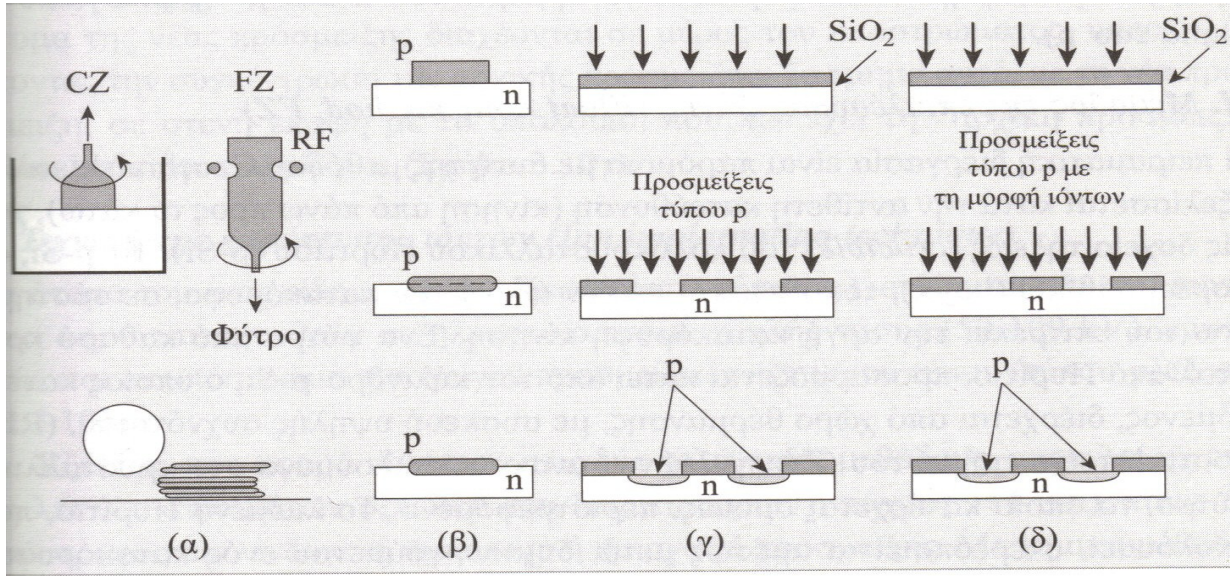
Το Πυρίτιο είναι από τα πλέον διαδεδομένα στοιχεία, στη φύση (αποτελεί, περίπου το 28% του στερεού φλοιού της γης), με τη μορφή διαφόρων ενώσεων του. Το οξείδιο του Πυριτίου (SiO_2), αποτελεί το κύριο συστατικό της άμμου. Το σχήμα 2.1 δείχνει τα βασικά στάδια παραγωγής καθαρού πυριτίου, με πρώτη ύλη, την άμμο. Γενικά, για την παρασκευή ενός καθαρού ημιαγωγού και την εισαγωγή των διαφόρων προσμείξεων, χρησιμοποιούνται οι επόμενες μέθοδοι :

I. Μέθοδος αναπτύξεως μονοκρυστάλλου ή μέθοδος Czochralski (CZ)

Κατά τη μέθοδο Czochralski, μικρό τμήμα του κρυσταλλικού υλικού χρησιμοποιείται ως φύτρο κρυστάλλωσης, τιθέμενο σε επαφή με την επιφάνεια τήγματος του ίδιου κρυσταλλικού υλικού και στη συνέχεια ανασύρεται περιστρεφόμενο πολύ αργά, με ταχύτητα μερικών mm ανά λεπτό.

Κρύσταλλοι από το τήγμα προσκολλώνται προσανατολιζόμενοι στο φύτρο και έτσι πίσω του σχηματίζεται σταδιακά, ένας μονοκρύσταλλος, σε κυλινδρική μορφή, μεγάλης σχετικά διαμέτρου (~6 in) και μήκους περίπου 1 m. Μετά το πέρας της εργασίας, ο κύλινδρος κόβεται σε φέτες κατάλληλου πάχους (Wafers), ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται. Στην περίπτωση παρασκευής ΦΒ στοιχείων

κρυσταλλικού Πυριτίου οι φέτες αυτές, έχουν πάχος, συνήθως 300 μm .



Σχήμα 2.3 Μέθοδοι σχηματισμού κρυσταλλικού υποστρώματος και επαφών p-n. (α) Μέθοδος ανάπτυξης μονοκρυσταλλικού υποστρώματος μεγάλης διαμέτρου. (β) Μέθοδος κραματοποίησης. (γ) Μέθοδος διάχυσης προσμείξεων. (δ) Μέθοδος εμφύτευσης προσμείξεων με τη μορφή ιόντων.

Για την δημιουργία των κρυσταλλικών ημιαγωγών τύπου n ή p, ακολουθείται η ίδια εργασία, σε τήγμα ημιαγωγού στο οποίο έχουν προστεθεί οι κατάλληλες για κάθε περίπτωση, προσμείξεις. Δημιουργείται ο κρύσταλλος τύπου n, από τήγμα πολυκρυσταλλικού Si, στο οποίο προστίθεται συνήθως Φώσφορος P. Αφού στερεοποιηθεί πλήρως, κόβεται σε λεπτές φέτες και με τη μορφή αυτή υποβάλλεται σε ειδική κατεργασία εισαγωγής των προσμείξεων αποδεκτών, που για το πυρίτιο είναι, συνήθως το Βόριο B. Θεωρητικά, η επόμενη εργασία είναι η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, εκ των οποίων το τοποθετούμενο στην όψη της διάταξης, έχει τη μορφή σχάρας. Στην πράξη, προηγείται η δημιουργία περιοχών εμπλουτισμένων σε περιεκτικότητα των αντιστοίχων προσμείξεων, ώστε τα δύο εξωτερικά στρώματα να χαρακτηρίζονται από σχεδόν μεταλλική αγωγιμότητα (Τμήματα n⁺ [n plus] από τη μεριά του n και p⁺ [p plus] από τη μεριά του p). (Σχήμα 2.3α)

II. Μέθοδος της επιπλέουσας ζώνης (Float Zone method, FZ)

Η πειραματική διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή της μεθόδου Czochralski, αλλά εξελίσσεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση (κίνηση από πάνω προς τα κάτω), χωρίς δοχείο τήξεως του Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (p-Si). Το p-Si, σε μορφή ράβδου (ingot), τοποθετείται με τον άξονα του κατακόρυφο, σε σύστημα που του επιτρέπει την αργή κατακόρυφη κίνηση. Ένα φύτρο από καθαρό κρυσταλλικό Πυρίτιο, προσαρμόζεται κάτω από τον κύλινδρο p-Si, ο οποίος κατερχόμενος, διέρχεται από χώρο θέρμανσης, με συσκευή υψηλής συχνότητας, (R-F). Το αντίστοιχο τμήμα του λιώνει, ανακρυσταλλούμενο στο κρυσταλλικό φύτρο, το οποίο κατέρχεται ομοίως, περιστρεφόμενο. Το λιωμένο Πυρίτιο, που ακολουθεί, στερεοποιείται αμέσως μετά, δημιουργούμενου ενός κατακόρυφου κυλίνδρου καθαρού κρυσταλλικού Πυριτίου, διαμέτρου μερικών cm (~10 cm). Το τελικό προϊόν είναι υψηλότερης καθαρότητας σε σχέση με αυτό της μεθόδου CZ και τα παρασκευαζόμενα ΦΒ στοιχεία κρυσταλλικού Πυριτίου, βιομηχανικής παραγωγής, με την μέθοδο FZ, χαρακτηρίζονται από υψηλότερη απόδοση (17-18%), έναντι απόδοσης 13-14%, των ΦΒ στοιχείων της μεθόδου CZ. Πάντως, η μέθοδος CZ αποδεικνύεται οικονομικότερη και δίδει μεγαλύτερης διαμέτρου κυλίνδρους (Μεγαλύτερης διαμέτρου Wafers).

III. Μέθοδος κράματος (Alloying technique)

Στην επιφάνεια λεπτού πλακιδίου ημιαγωγού τύπου n τοποθετείται ποσότητα άλλης ουσίας, που συμπεριφέρεται ως αποδέκτης, για τον ημιαγωγό του πλακιδίου. Παραδείγματος χάριν, πάνω σε λεπτό πλακίδιο Γερμανίου, Ge, τύπου n, τοποθετείται ποσότητα Ινδίου In, το οποίο είναι εξαιρετικά εύτηκτο. Το σύστημα θερμαίνεται μέχρι να λιώσει το In. Η διείσδυση του στο Ge, δημιουργεί μια περιοχή εύτηκτου κράματος, όπου οι προσμίξεις p υπερτερούν των προσμίξεων n, δημιουργούμενου του ημιαγωγού Ge τύπου p. Το απομένον τμήμα του Ινδίου αποτελεί την μεταλλική επαφή της πλευράς αυτής. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει το μειονέκτημα της αδυναμίας ακριβούς καθορισμού των διαφόρων στρωμάτων και μάλιστα με επαναλήψιμο τρόπο. (Σχήμα 2.3β)

IV. Τεχνική της διάχυσης (Diffusion technique)

Το υπόστρωμα, δηλαδή ο ημιαγωγός ορισμένου τύπου πρόσμειξης, τοποθετείται σε κατάλληλο θάλαμο, στον οποίο εισάγεται νέα πρόσμειξη, με την μορφή ατμών σε

υψηλή θερμοκρασία, αντίθετου τύπου από την υπάρχουσα στο υπόστρωμα. Τα άτομα της νέας πρόσμειξης διαχέονται σε μέρος του υποστρώματος, υπερκαλύπτοντας την συγκέντρωση της αρχικής πρόσμειξης. Το τμήμα αυτό, με την νέα πρόσμειξη, σε στενή επαφή με το υπόλοιπο, που περιέχει την αρχική πρόσμειξη, αποτελούν την επαφή p-n. (Σχήμα 2.3γ)

V. Τεχνική της εμφύτευσης ιόντων (Ion implantation technique)

Τα άτομα του ενός είδους προσμείξεων (έστω τύπου n) ιονίζονται και στη συνέχεια αφού επιταχυνθούν σε ηλεκτρικό πεδίο υψηλής τάσης (50-100kV), εμφυτεύονται σε υπόστρωμα ημιαγωγού προσμείξεων αντίθετου τύπου (τύπου p). (Σχήμα 2.3δ)

Εξέλιξη, που αφορά ιδιαίτερα στις δύο τελευταίες μεθόδους, αποτελεί η χρήση λεπτών στρωμάτων οξειδίου του Πυριτίου (SiO_2 , πάχους $\sim 1\mu\text{m}$), πάνω σε υπόστρωμα, από ενδογενή ημιαγωγό ή ημιαγωγό πρόσμειξης. Με χημικό μέθοδο, το οξείδιο απομακρύνεται από ορισμένα τμήματα του καλυμμένου υποστρώματος, και αποκαλύπτονται εκείνα τα τμήματα του, στα οποία επιθυμούμε να εισάγουμε αντίθετου είδους προσμείξεις. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε νέα επίστρωση ημιαγωγικού υλικού ή μεταλλικής επαφής. Η μέθοδος αυτή, ονομάζεται λιθογραφία (φωτολιθογραφία, ακτίνων x, δέσμης ηλεκτρονίων, Laser κ.α., ανάλογα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του οξειδίου) και χαρακτηρίζεται από αποτελέσματα εξαιρετικής γεωμετρικής ακρίβειας.

Η λιθογραφία χρησιμοποιείται κατ' εξοχήν στη μικροηλεκτρονική για την δημιουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, σε συνδυασμό με την υψηλής ποιότητας λεπτών ημιαγωγικών υποστρωμάτων, μέθοδο της επιταξίας (Επί+τάσσω). Σύμφωνα με την τεχνολογία αυτή, το υλικό εξαερώνεται με θέρμανση σε περιβάλλον λίαν χαμηλής πίεσης και οι ατμοί του εναποτίθενται σε υπόστρωμα, σχηματίζοντας ένα ή περισσότερα αλληπάλληλα λεπτά στρώματα (περίπτωση πολυστρωματικών διατάξεων, super lattices). Το πάχος έκαστου στρώματος καθορίζεται με χρήση σκιάστρων που παρεμβάλλονται στις δέσμες, η λειτουργία των οποίων ελέγχεται ηλεκτρονικά. Η διεργασία αυτή γίνεται μέσα σε ειδικούς θαλάμους υψηλού κενού (10^{-11}torr), ώστε να ελαχιστοποιείται η οξειδωση του παρασκευαζόμενου υλικού και η

ενσωμάτωση ξένων ατόμων, και έτσι τελικά, η δομή του να χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα.

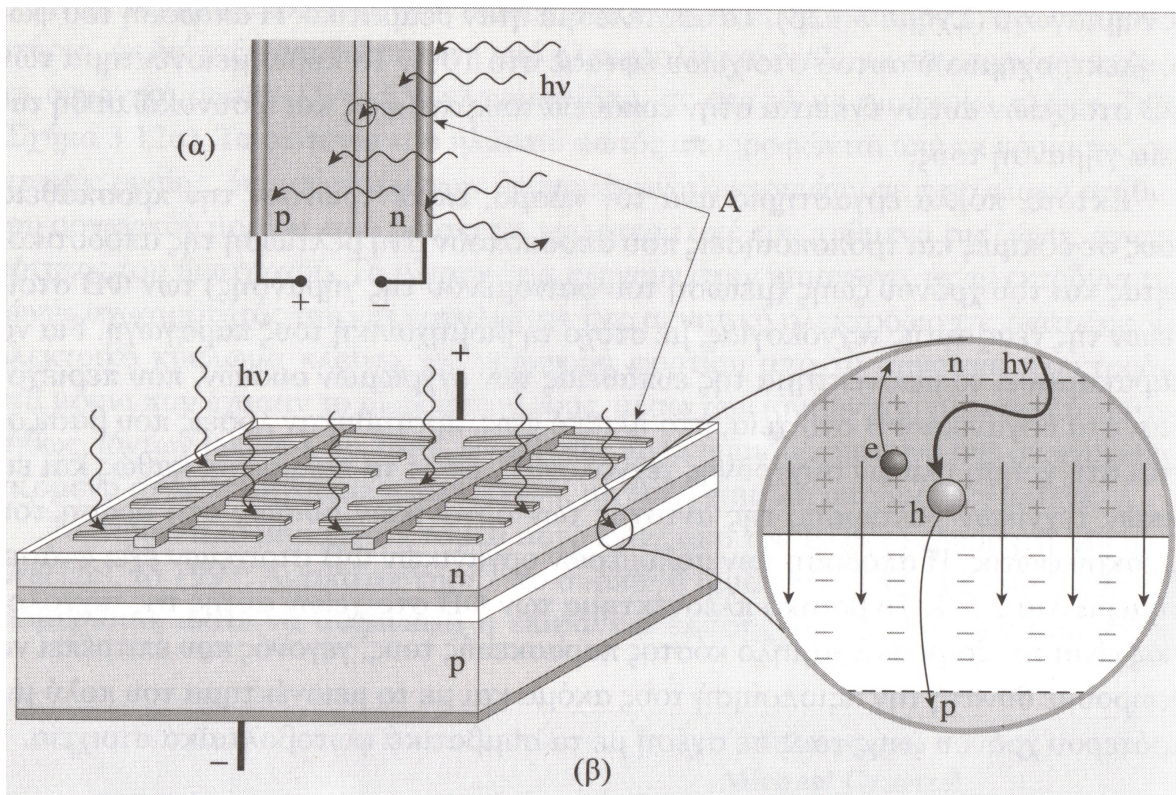
Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελεί η τεχνολογία των ημιαγωγικών διατάξεων με την μορφή λεπτών υμενίων (films), που έχουν μεγάλη εφαρμογή στον τομέα των ηλεκτρονικών μικροκυκλωμάτων καθώς και στην Παρασκευή ΦΒ στοιχείων άμορφου Πυριτίου (a-Si:H). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία αυτή, είναι 1) η μέθοδος φωτεινής εκκένωσης (Glow Discharge, GD) και 2) η θερμική ή χημική διάσπαση αερίου ενώσεως και εναπόθεση των ατόμων του υλικού που θα αποτελέσει το ενδογενές ημιαγωγό της επαφής p-n, (Chemical Vapor Deposition, CVD).

2.5 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του ΦΒ στοιχείου. Αντιανακλαστική επίστρωση.

i. Η όψη του ΦΒ καλύπτεται από διαφανή ουσία (π.χ. SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Si_3N_4 , MgF_2), η οποία χαρακτηρίζεται από δείκτη διάθλασης τέτοιο ώστε, για μια περιοχή μηκών κύματος, συνήθως γύρω από τα 600nm, κοντά στο μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας (480nm), να ελαχιστοποιείται η ανακλώμενη συνιστώσα του φωτός (αντιανακλαστική επίστρωση).

ii. Το πάχος του ΦΒ στοιχείο περιορίζεται, στην ενεργό περιοχή του, στην οποία δηλαδή, η απορροφούμενη ΗΜ ακτινοβολία δίδει το ΦΒ φαινόμενο. Αυτή, που ήδη αναφέρθηκε, είναι η περιοχή απογύμνωσης αυξημένη κατά το άθροισμα των μηκών διάχυσης κατά Debye, για τα ηλεκτρόνια και τις οπές, στα τμήματα που αυτά αποτελούν φορείς μειονότητας, L_e και L_h .

iii. Τα μεταλλικά ηλεκτρόδια συλλογής των φορέων (Σχήμα 2.4α) πρέπει να βρίσκονται κοντά στην ενεργό περιοχή. Το πίσω ηλεκτρόδιο καλύπτει όλη την έκταση του ΦΒ και συνήθως αποτελείται, για λόγους κόστους και βάρους της διάταξης, από λεπτό και σχετικά πυκνό μεταλλικό πλέγμα.



Σχήμα 2.4 Δομή ενός τυπικού ΦΒ στοιχείου. (α) Εγκάρσια τομή της κυψελίδας, όπου δείχνονται διάφορες θέσεις απορρόφησης φωτονίων καθώς επίσης τα διαδοχικά στρώματα, απ' τα οποία αποτελείται. Το ηλεκτρόδιο όψεως, το αντανάκλαστικό στρώμα, A, τα δύο στρώματα n και p του ημιαγωγού και τέλος το ηλεκτρόδιο πίσω πλευράς. Δείχνονται επίσης οι διάφορες θέσεις πιθανής απορρόφησης-ανάκλασης των φωτονίων που προσπίπτουν σ' αυτή. (β) Σχηματική παράσταση σε τρεις διαστάσεις, του ΦΒ στοιχείου. Το τμήμα μέσα στο μικρό κύκλο δείχνεται σε μεγέθυνση στο μεγάλο κύκλο. Σημειώνεται η απορρόφηση ενός φωτονίου μέσα στην περιοχή απογύμνωσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ηλεκτρονίου και μιας οπής, που ωθούνται, από το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής, προς τους χώρους μειωμένης επανασύνδεσης.

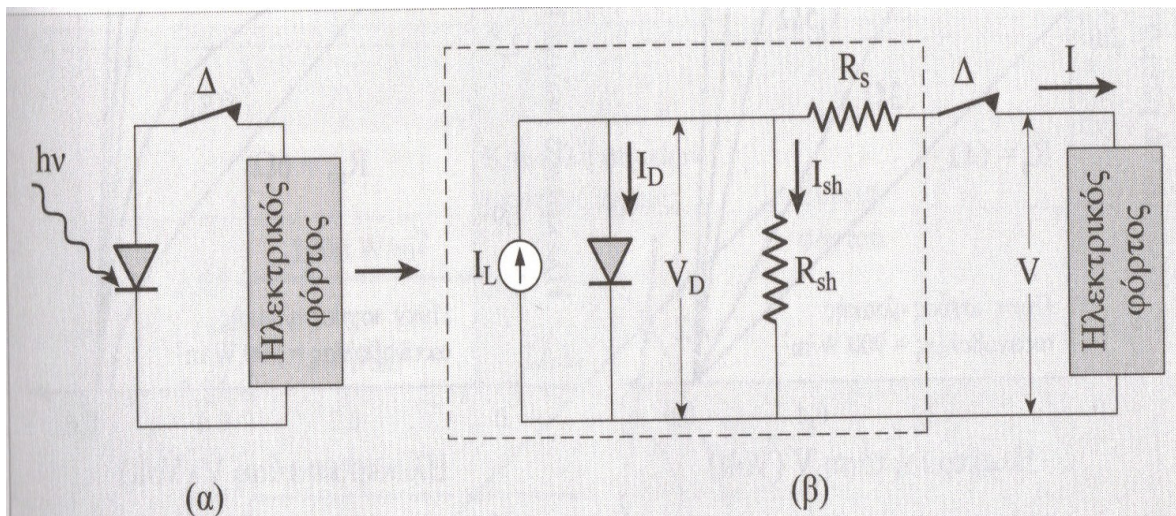
Το πλέγμα, που τοποθετείται στην όψη του ΦΒ στοιχείου, όπου προσπίπτει το φως, πρέπει να έχει το σχήμα αραιής μεταλλικής σχάρας, με μορφή χτενιού ή σκελετού φαριού, έτσι ώστε, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς να συλλέγονται απ' όλη την έκταση της επιφάνειας του, προκαλώντας ταυτόχρονα, την δυνατή μείωση στην διέλευση του φωτός (μείωση ~5-10%). Η εταιρεία BP SOLAR εισήγαγε, το 1997, ειδικό τρόπο δημιουργίας μεταλλικών ηλεκτροδίων όψεως, που περιορίζει τη μείωση, λόγω της «σκίασης» των ηλεκτροδίων, στην απόδοση ΦΒ στοιχείου, σε 2%. Η διατομή των τελικών μεταλλικών απολήξεων είναι μεγαλύτερη απ' αυτή των απομακρυσμένων τμημάτων, επειδή πως αυτή την κατεύθυνσή τους αυξάνει το συλλεγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

2.6 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου, δίδεται στο παρακάτω σχήμα μέσα στο πλαίσιο διακεκομμένης γραμμής. Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος (I_L) σε συνδυασμό με μια ιδανική δίοδο. Στη συνέχεια τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του ΦΒ στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός, την αντίσταση απωλειών διαρροής ρεύματος μεταξύ των άκρων του ΦΒ στοιχείου, η οποία τίθεται παράλληλα συνδεδεμένη, στα άκρα της διόδου αφετέρου, την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με την δίοδο. Όταν οι ακροδέκτες της κυψέλης είναι βραχυκυκλωμένοι, η τάση εξόδου V_o είναι μηδενική, ενώ το ρεύμα εξόδου I_o λαμβάνει τη μέγιστη τιμή $I_o = I_{sc} = I_L$. Όταν οι ακροδέκτες της κυψέλης είναι ανοιχτοκυκλωμένοι, το ρεύμα εξόδου είναι μηδέν, ενώ η τάση εξόδου λαμβάνει τη μέγιστη τιμή $V_o = V_{oc}$. Το φωτόρρευμα ρέει μέσω της διόδου, επομένως ισχύει $I_d = I_L$. Συνδέοντας ένα φορτίο στα άκρα της κυψέλης, το ρεύμα I_L κατανέμεται μεταξύ της διόδου D και του φορτίου, ανάλογα με την ωμική αντίσταση R_L του φορτίου. Η σχέση μεταξύ του ρεύματος εξόδου και της τάσης εξόδου είναι

$$I_o = I_L - I_d = I_L - I_s (e^{V_d/V_T} - 1) - V_d/R_p$$

$$V_d = V_o + I_o R_s = V_o (1 + R_s/R_L)$$



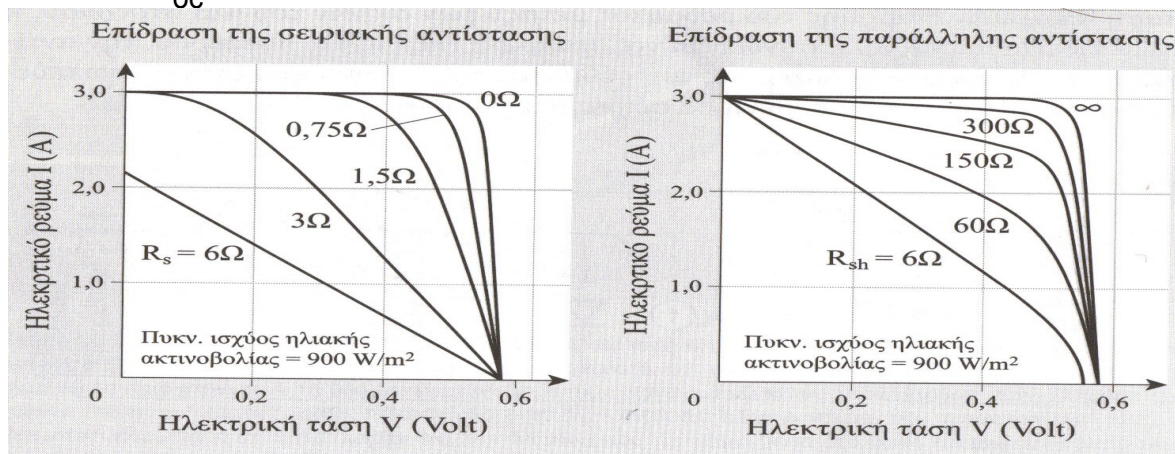
Σχήμα 2.5 (α) Απλό και (β) πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου. Η εσωτερική αντίσταση διαρροής της επαφής είναι η R_{sh} και η εσωτερική αντίσταση σε σειρά, η R_s .

1. Παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση διαρροής, R_{sh} (Shunt resistance).

Η αντίσταση αυτή συνδέεται με τη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Αναλυτικότερα, οι διαδρομές αυτές αφορούν ρεύματα:

- i. Διαμέσου του σώματος της διάταξης επαφής
- ii. Δια των εξωτερικών επιφανειών της επαφής, παράλληλα προς το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής και
- iii. Διαμέσου ηλεκτρικής διάβασης που δημιουργούν οι προσμίξεις της επαφής.

Η τιμή της σε πολύ καλής απόδοσης ΦΒ στοιχεία είναι μεγαλύτερη των $10^3 \Omega$. Τιμές χαμηλότερες των 500Ω , προκαλούν έντονη ελάττωση του ρεύματος καθώς προχωρούμε προς την τάση ανοικτού κυκλώματος, V_{oc} . Η ελάττωση είναι εντονότερη όσο η R_{sh} ελαττώνεται (Σχήμα 2.6). Μικρή R_{sh} χαρακτηρίζει καμπύλη I-V με αντίστοιχα μικρό παραλληλόγραμμο $Im \cdot Vm$, μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, P_m και άρα χαμηλότερη τιμή του παράγοντα πλήρωσης, FF (περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του ΦΒ στοιχείου, ως πηγή σταθερού ρεύματος, δίδει το μέτρο προσέγγισης αυτής της λειτουργίας της επαφής, οι τιμές του που καθορίζονται από το υλικό του ΦΒ στοιχείου και τις συνθήκες είναι μεταξύ 0 και 1, όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του FF τόσο περισσότερο η λειτουργία του ΦΒ στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος, στην περιοχή τάσεων $0-V_{oc}$



Σχήμα 2.6 Επίδραση της σε σειρά αντίστασης R_s και της παράλληλα εμφανιζόμενης R_{sh} , σε ένα ΦΒ στοιχείο.

2. Σειριακή αντίσταση R_s (Series resistance)

Η σειριακή αντίσταση αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή:

- i. Κατά τη δίοδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το σώμα της διόδου
- ii. Στις ωμικές αντιστάσεις των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους

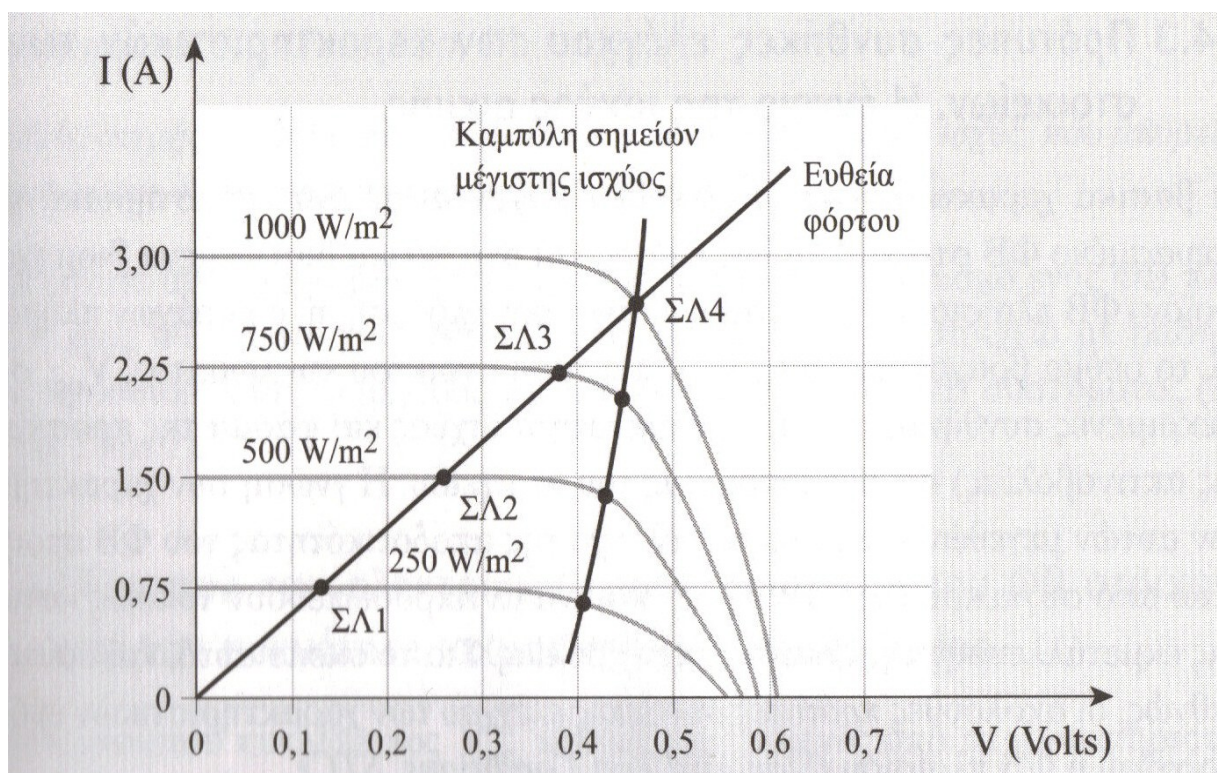
Αύξηση της R_s περιορίζει την περιοχή τάσεων στην οποία αντιστοιχεί σταθερό ρεύμα βραχυκύκλωσης, ίσο με αυτό που αντιστοιχεί στην ιδανική περίπτωση. Άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης της R_s είναι η δραστική ελάττωση της αντίστοιχης μέγιστης ισχύος που αποδίδει το στοιχείο. Τυπικές τιμές της R_s , για καλής ποιότητας ΦΒ στοιχεία: 0,1 Ω έως 0,3 Ω .

2.7 Η καμπύλη I-V ενός ΦΒ στοιχείου

Για τον έλεγχο της αποδοτικής λειτουργίας ενός ΦΒ στοιχείου αλλά και για τον σχεδιασμό των ηλεκτρονικών που συνδυάζονται μ' αυτό, προσδιορίζουμε τα σημεία μέγιστης ισχύος, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου. Επιδιώκουμε το σημείο λειτουργίας του σε κάθε διαφορετική κατάσταση, που θα προκύψει π.χ. από μεταβολή της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας, E , να αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος, P_m , για τη δεδομένη κατάσταση (Σχήμα 2.7, για την καμπύλη I-V, με $E=1 \text{ kW/m}^2$).

Στις υπόλοιπες καμπύλες I-V, τα δύο σημεία δεν συμπίπτουν. Για να συμβεί κάτι τέτοιο, πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση, έτσι ώστε η νέα ευθεία φόρτου, να περνά από το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της νέας καμπύλης I-V. Το σημείο αυτό μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά, αν παραστήσουμε γραφικά την παρεχόμενη από το ΦΒ στοιχείο, ηλεκτρική ισχύ, $P=I \cdot V$, υπό δεδομένη πυκνότητα ισχύος, E , πάνω σε μία μεταβλητή ηλεκτρική αντίσταση, ως συνάρτηση της τάσης V , στα άκρα της αντίστασης. Παρουσιάζει ένα μέγιστο, που όπως μπορείτε να διακρίνετε στο κοινό διάγραμμα των I-V και P-V, εντοπίζεται στο "γόνατο" της καμπύλης I-V. Οι τιμές ρεύματος-τάσης, στο σημείο μέγιστης ισχύος, συμβολίζονται με I_m και V_m . Η

μέγιστη δυνατή ισχύς, που μπορεί να δώσει το ΦΒ στοιχείο, υπό δεδομένη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας, E , ισούται με: $P_m = I_m \cdot V_m$



Σχήμα 2.7 Όταν αλλάζει η ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει σ' ένα ΦΒ στοιχείο, που τροφοδοτεί μια ηλεκτρική αντίσταση, το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται. Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αποδίδεται στην αντίσταση μόνο για ορισμένο επίπεδο ακτινοβολίας. Σε διαφορετικές τιμές αποδίδεται ισχύς μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη ισχύ. ΣΛ1, ΣΛ2, ΣΛ3 και ΣΛ4: τέσσερα σημεία λειτουργίας, αντίστοιχα των τεσσάρων τιμών έντασης της ακτινοβολίας. Μόνο το ΣΛ4 συμπίπτει με το ΣΜΙ της I-v, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας $E = 1 \text{ kW/m}^2$.

2.8 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων. Η έννοια της ισχύος αιχμής.

Τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα εργαστηριακά παρασκευασμένο ΦΒ στοιχείο καθώς επίσης και στο τελικά διατιθέμενο βιομηχανικό προϊόν, είναι η ενεργειακή απόδοση, η , ο παράγων πλήρωσης, FF, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sc} και η τάση ανοικτού κυκλώματος, V_{oc} , σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού (πυκνότητα ισχύος και φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας) και θερμοκρασίας του στοιχείου. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών επιτρέπει τον έλεγχο της αποδοτικότητας του ΦΒ στοιχείου» κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες,

που να αντιπροσωπεύουν τυπικές καταστάσεις εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, καθορίστηκαν διεθνώς, οι ακόλουθες *πρότυπες συνθήκες ελέγχου* των χαρακτηριστικών ενός ΦΒ στοιχείου ή ΦΒ πλαισίου (Standard Test Conditions, STC).

Πρότυπες συνθήκες ελέγχου

- i. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος 1 kW/m^2 και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με AM1,5 (κάθετη πρόσπτωση)
- ii. Θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου ίση με $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

Στα ειδικά εργαστήρια ελέγχου και πιστοποίησης των χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων, ο χώρος ελέγχου βρίσκεται στην προκαθορισμένη θερμοκρασία των $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Το φάσμα εκπομπής της χρησιμοποιούμενης πηγής φωτισμού, προσομοιάζει προς το ηλιακό, του συγκεκριμένου φάσματος (AM1,5). Η πηγή αυτή λειτουργεί στιγμιαία (Flash), ώστε η θερμοκρασία του υλικού του ΦΒ στοιχείου να παραμένει στα προκαθορισμένα όρια των πρότυπων συνθηκών. Επιπλέον η ακτινοβολία από την τεχνητή πηγή προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου. Συνεπώς, οι πρότυπες συνθήκες αφορούν εργαστηριακό περιβάλλον. Στην πράξη, τα ΦΒ στοιχεία, ενσωματωμένα στη μονάδα που ονομάζεται ΦΒ πλαίσιο, λειτουργούν κάτω από φυσικό ηλιακό φως του οποίου τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας καθ' όλο το έτος και η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και από ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες του τόπου εγκατάστασης. Σε μερικά εργαστήρια (π.χ στο National Renewable Energy Laboratory, NREL, USA), πραγματοποιούνται μετρήσεις χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων-πλαισίων χρησιμοποιώντας φυσικό ηλιακό φως με τα χαρακτηριστικά των πρότυπων συνθηκών.

Με βάση τις πρότυπες συνθήκες, εισάγεται η έννοια της ισχύος αιχμής, P_p (Peak Power), ως χαρακτηριστικό του ΦΒ στοιχείου, η δε μονάδα της στο SI, γράφεται emphaticά W_p (Peak Watt, Watt αιχμής).

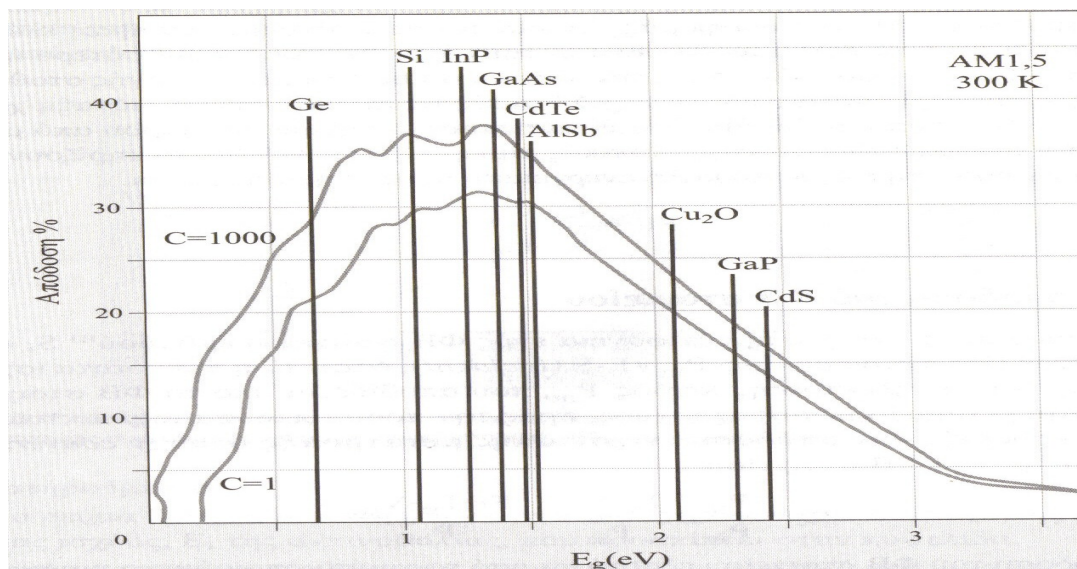
<< Ισχύς αιχμής ενός ΦΒ στοιχείου, είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που μπορεί να αποδώσει, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). >>

2.9 Η απόδοση του ΦΒ στοιχείου

Ας θεωρήσουμε ότι πάνω στην επιφάνεια ενός ΦΒ στοιχείου εμβαδού S , προσπίπτει ισχύς H_M ακτινοβολίας, $P_{in}=E \cdot S$ (incident), όπου E , η πυκνότητα ισχύος της. Το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύος P_m , που αποδίδεται από το ΦΒ στοιχείο, στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος, προς την προσπίπτουσα ισχύ ακτινοβολίας, P_{in} , καθορίζει την απόδοση ενεργειακής μετατροπής (energy conversion efficiency), η_c , του ΦΒ στοιχείου:

$$\eta_c = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}}$$

Η απόδοση του ΦΒ στοιχείου εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό, αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας, E (διατηρώντας τη θερμοκρασία της κυψελίδας σταθερή) και μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Η περισσότερο αποδοτική περιοχή ενεργειακού χάσματος είναι περί την τιμή 1,3 eV, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 Απεικόνιση των ιδανικών αποδόσεων των πιο σημαντικών ΦΒ στοιχείων, ως συνάρτηση του ενεργειακού χάσματος των αντίστοιχων ημιαγωγών, στους 300 K. Η εσωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε ένα ήλιο AM1,5, ενώ η εξωτερική σε συγκεντρωμένο φως, αντίστοιχο 1000 ήλιων.

Η ονομαστική του τιμή καθορίζεται κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), την οποία, στο σύγγραμμα αυτό, θα συμβολίζουμε με $\eta_{c,STC}$. Τα εργαστήρια παρασκευής ΦΒ στοιχείων καθώς και τα κέντρα πιστοποίησης των χαρακτηριστικών τους, αναφέρουν πάντα τις συνθήκες προσδιορισμού της απόδοσής τους. Σε συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες, η τιμή του προσδιορίζεται από τη διαφορά $\theta_c - \theta_{STC}$, των θερμοκρασιών της κυψελίδας και της θερμοκρασίας αναφοράς (STC, 25 °C) και από την πυκνότητα ισχύος, E , της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η εξάρτηση αυτή, σε κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας, παρέχεται από τη σχέση

$$\eta_c = \eta_T \cdot \eta_{c,STC}$$

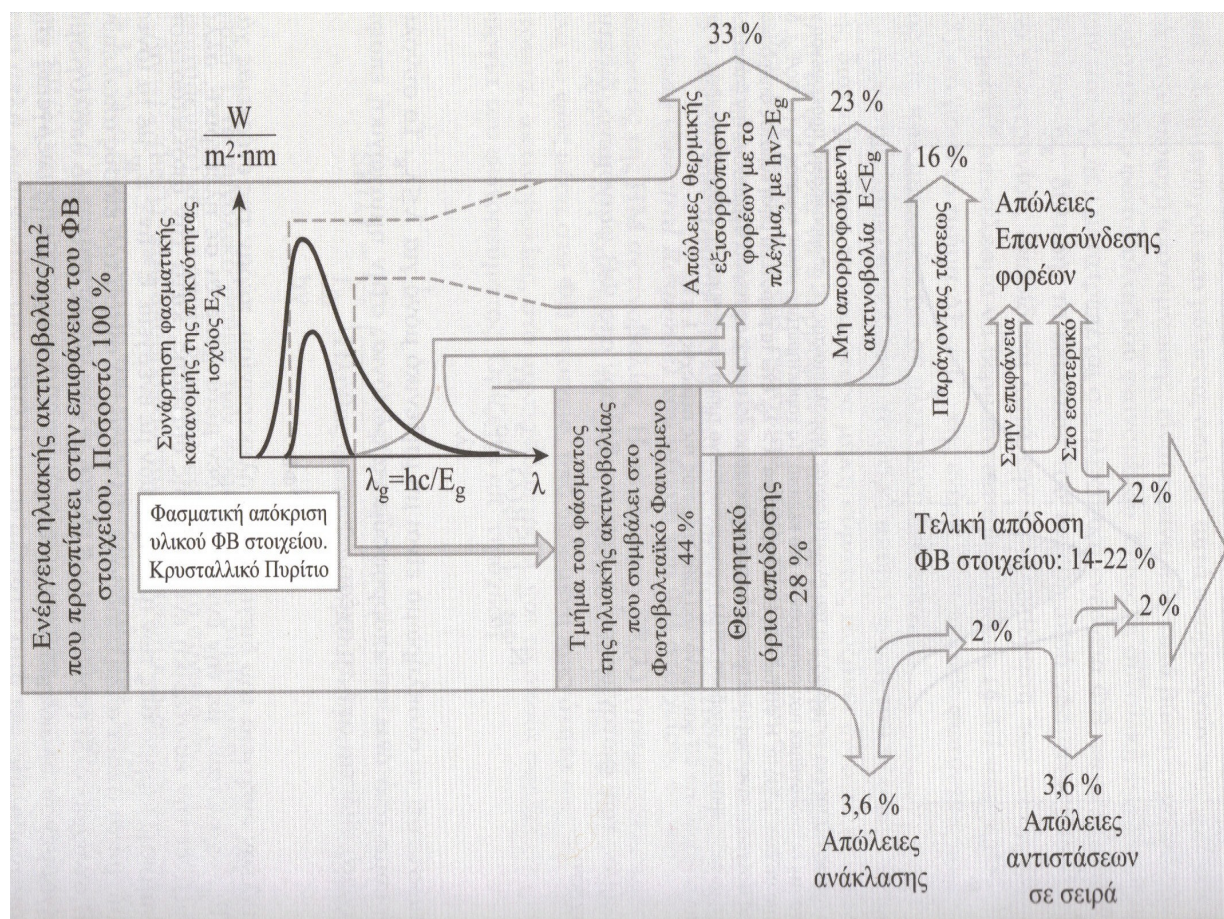
όπου ο παράγων η_T , που ονομάζεται *συντελεστής ή παράγων θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου*, εκφράζει την επίδραση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψελίδας, σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς (25 °C), στην απόδοσή της.

2.10 Αναλυτικός προσδιορισμός του ιδανικού ορίου απόδοσης των ΦΒ στοιχείων

Προκειμένου να σχηματίσουμε μια εικόνα για τον τρόπο και το βαθμό εξάρτησης του συντελεστή απόδοσης ενός ΦΒ στοιχείου, από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του, όπως το ενεργειακό χάσμα υλικού E_g και ο συντελεστής απορρόφησης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος λ , παραθέτουμε την επόμενη ανάλυση, τα συμπεράσματα της οποίας συνοψίζονται στο σχήμα 2.9 (διάγραμμα Sankey). Υπολογίζονται αρχικά, οι απώλειες του φωτός, από ανάκλαση και θέρμανση της διάταξης. Έστω, $E_{o,\lambda}$ η πυκνότητα ισχύος HM ακτινοβολίας ως συνάρτηση του μήκους κύματος λ και ρ_λ , η αντίστοιχη ανακλαστικότητα του ημιαγωγού. Η πυκνότητας ισχύος του ηλιακού φωτός, μήκους κύματος λ , που εισέρχεται στον ημιαγωγό, δίδεται από τη σχέση

$$E_\lambda = E_{o,\lambda} \cdot \{1-\rho_\lambda\}$$

Η ανακλαστικότητα του ηλιακού φωτός, σε κάθετη πρόσπτωση στην επιφάνεια πυριτίου, η οποία είναι επικαλυμμένη με αντιανακλαστικό επίστρωμα, περιορίζεται από ~30% σε ~3%.

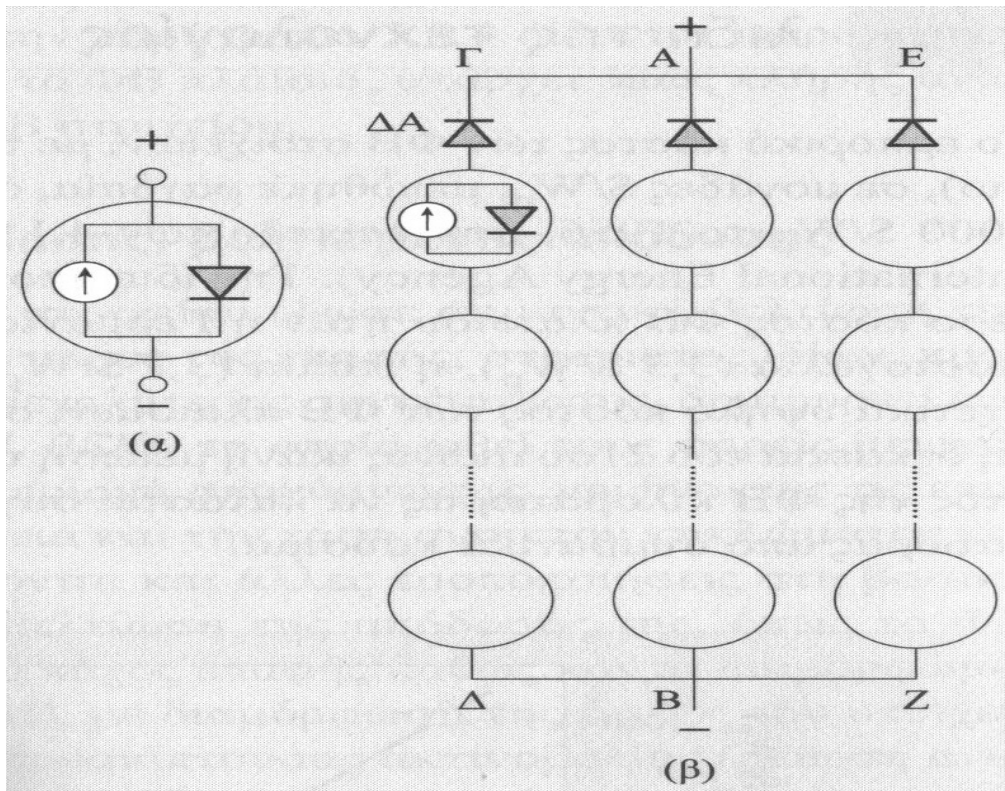


Σχήμα 2.9 Διάγραμμα ροής ενέργειας κατά τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια (Διάγραμμα Sankey)

2.11 Τρόποι σύνδεσης ΦΒ στοιχείων

Τα ΦΒ στοιχεία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα, ανάλογα με τον επιδιωκόμενο σκοπό, κατά τρόπο ανάλογο της σύνδεσης των ηλεκτρικών πηγών. Η σύνδεση σε σειρά N (σύνδεση του θετικού ηλεκτροδίου του ενός ΦΒ στοιχείου με το αρνητικό του επόμενου), καθ'όλα όμοιων ΦΒ στοιχείων, οδηγεί σε σύστημα με ανάλογα πολλαπλάσια τάση ανοικτού κυκλώματος ($V_{toc}=NV_{oc}$).

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ισούται με το αντίστοιχο του ενός ($I_{tsc} = I_{sc}$). Η παράλληλη σύνδεση N (σύνδεση των θετικών ηλεκτροδίων των ΦΒ στοιχείων, όλων μαζί, ομοίως, για τα αρνητικά ηλεκτρόδια) όμοιων ΦΒ στοιχείων, δίδει ένα σύνολο με την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος ($V_{toc}=V_{oc}$), ενώ το ρεύμα

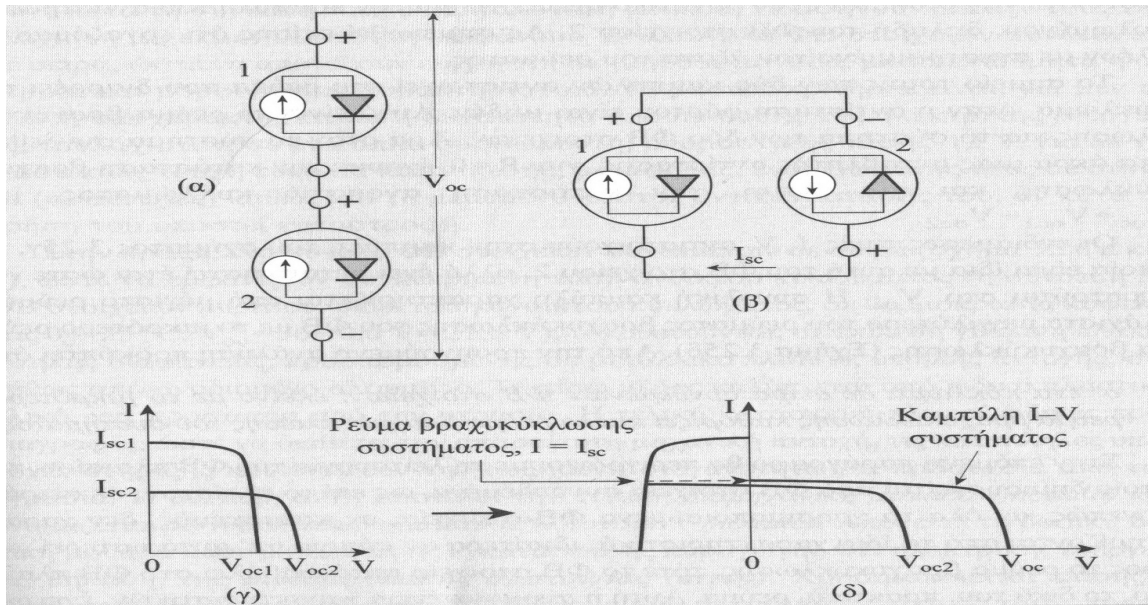


Σχήμα 2.10 (α) Ισοδύναμο ηλεκτρικό διάγραμμα ΦΒ στοιχείου. (β) φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεμένα σε σειρά (κλάδοι) και παράλληλα, δημιουργώντας μια ΦΒ συστοιχία. Οι δίοδοι σε κάθε κλάδο, ΔΑ (Δίοδοι Απομόνωσης ή Αντεπιστροφής), αποκλείουν τη δημιουργία ρευμάτων στους κλάδους, όταν τα ΦΒ στοιχεία φωτίζονται ή την εκφόρτιση των ηλεκτρικών συσσωρευτών μέσω των κλάδων, κατά τη διάρκεια της νύχτας.

βραχυκύκλωσης του ισούται N φορές το ρεύμα βραχυκύκλωσης εκάστου ($I_{tsc}=NI_{sc}$, Σχήμα 2.10β). Αν τα συνδεόμενα ΦΒ στοιχεία έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά (I_{sc} και V_{oc}), τότε η εσωτερική διάταξη των N στοιχείων παρουσιάζει σημαντική απόκλιση. Στην περίπτωση της σύνδεσης σε σειρά, το στοιχείο με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης επιβάλλει στο κύκλωμα, πρακτικά, το δικό του ρεύμα.

Η χαρακτηριστική καμπύλη I - V , για δύο ΦΒ στοιχεία μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής. Το σημείο που αντιστοιχεί σε ανοιχτό κύκλωμα (Σχήμα 2.11α), έχει τάση $V_{oc}=V_{oc1}+V_{oc2}$, όπου V_{oc1} και V_{oc2} , οι τάσεις ανοικτού κυκλώματος εκατοστού. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης του συστήματος προκύπτει, λαμβάνοντας υπ' όψη ότι το καθένα απ' τα δύο πολώνει το άλλο σε ανάστροφη τάση (Σχήμα 2.11β). Σημειώστε ότι όταν το ΦΒ στοιχείο πολώνεται ανάστροφα, οι εφαρμοζόμενες τάσεις βρίσκονται στον αρνητικό ημιάξονα των τάσεων και άρα η καμπύλη του ΦΒ που παίζει τον ρόλο της πηγής, έστω το ΦΒ στοιχείο 1, πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να βρίσκεται στον αρνητικό ημιάξονα για την καμπύλη του ανάστροφα πολωμένου, δηλαδή του ΦΒ στοιχείου 2, Ας σημειωθεί επίσης ότι εργαζόμαστε πλέον με ανεστραμμένο τον άξονα του ρεύματος.

Το σημείο τομής των δύο καμπύλων αντιστοιχεί στο ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα, όταν η αντίσταση φορτίου είναι μηδέν. Αυτό είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης για το σύστημα των δύο ΦΒ στοιχείων. Άρα όταν το σύστημα συνδεθεί στα άκρα μιας μεταβλητής αντίστασης, για $R=0$ έχουμε την κατάσταση βραχυκύκλωσης και για $R=\infty$, την κατάσταση ανοικτού κυκλώματος, με $V_{oc}=V_{oc1}+V_{oc2}$.



Σχήμα 2.11 Ηλεκτρική συμπεριφορά δύο ανόμοιων ΦΒ στοιχείων. (α) Παραστατικό διάγραμμα σύνδεσης σε σειρά. (β) Το ΦΒ στοιχείο 1 (I_{sc1}, V_{oc1}), μπορεί να θεωρηθεί ότι πολώνει ανάστροφα το στοιχείο 2 (I_{sc2}, V_{oc2}). (γ) Οι χαρακτηριστικές των δύο ΦΒ στοιχείων. (δ) Αναστρέφεται η καμπύλη του 1, ως προς τον άξονα των ρευμάτων. Η τομή της νέας καμπύλης του 1 με την καμπύλη του 2, δίνει το κοινό ρεύμα στην κατάσταση βραχυκύκλωσης (ρεύμα βραχυκύκλωσης). Αφού το προσδιορίσουμε, κατασκευάζουμε την τελική καμπύλη του συστήματος των δύο, με χαρακτηριστικά σημεία I_{sc} και $V_{oc}=V_{oc1}+V_{oc2}$

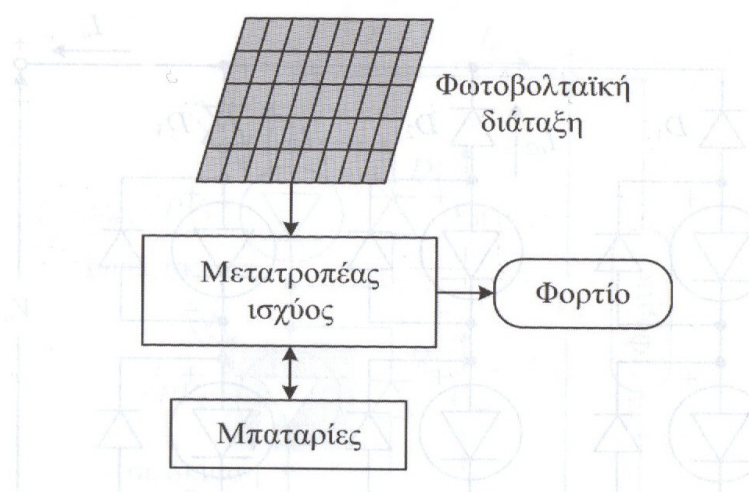
Οι ενδιάμεσες τιμές I, V , αντιστοιχούν στην καμπύλη του σχήματος (Σχήμα 2.11γ), η οποία είναι ίδια με αυτή του ΦΒ στοιχείου 2, αλλά έχει μετατοπιστεί έτσι ώστε να περατούται στο V_{oc} . Η συνολική καμπύλη χαρακτηρίζεται από μέγιστο ρεύμα. Ελάχιστο μεγαλύτερο του ρεύματος βραχυκύκλωσης του ΦΒ με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης (Σχήμα 2.11δ). Από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτει ότι *σ' ένα κύκλωμα σε σειρά συνδεδεμένων ΦΒ στοιχείων, εκείνο με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης καθορίζει και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του συστήματος.*

2.12 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε αυτόνομα (stand-alone), σε υβριδικά (hybrid) και σε διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο (grid-connected). Τα αυτόνομα και τα υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές, στις οποίες το ηλεκτρικό δίκτυο δεν είναι διαθέσιμο.

2.13 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

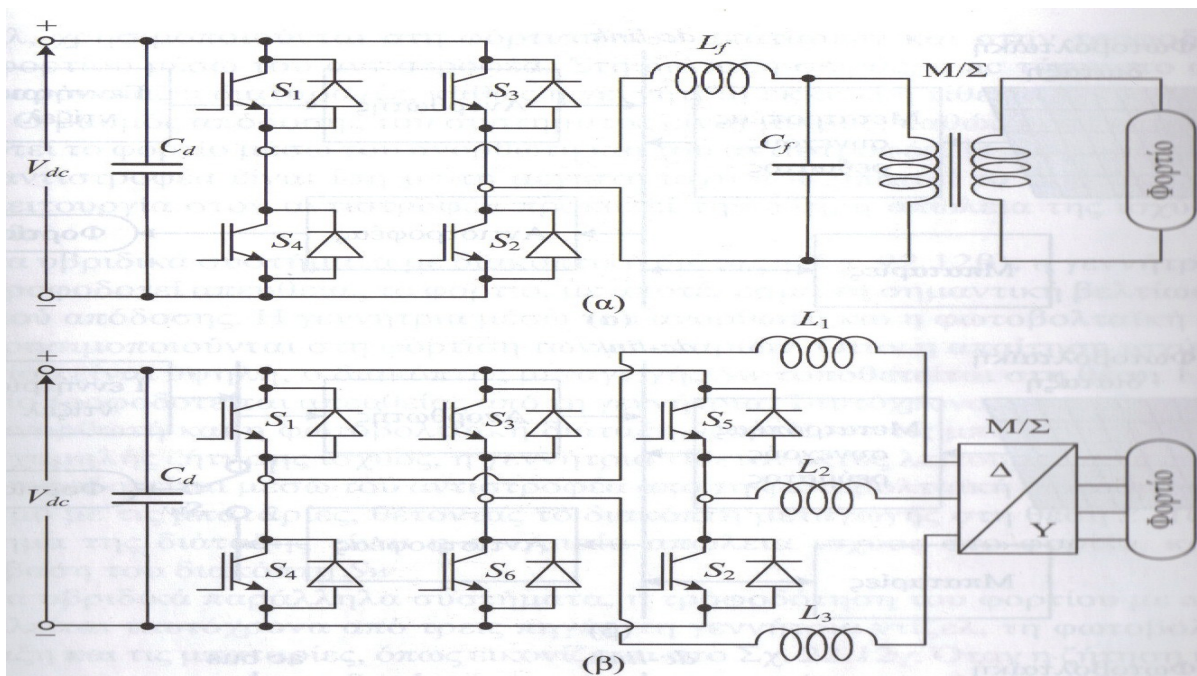
Σ' ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα (Σχήμα 2.12) απαιτείται η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να καλύπτεται η απαίτηση ισχύος του φορτίου σε περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας και το βράδυ. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι μπαταριών, με πλέον διαδεδομένη τη μπαταρία μόλυβδου (lead-acid). Οι απαιτήσεις από τις μπαταρίες είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, η μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας, η αντοχή σε βαθιά εκφόρτιση και σε μεταβλητούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, η ελάχιστη συντήρηση και το μικρό κόστος. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα οι κυριότερες αιτίες μείωσης της διάρκειας ζωής των μπαταριών είναι η ημιτελής φόρτιση και η παρατεταμένη λειτουργία σε κατάσταση χαμηλής φόρτισης.



Σχήμα 2.12 Λειτουργικό διάγραμμα ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

Στα αυτόνομα συστήματα, ο μετατροπέας ισχύος περιλαμβάνει ένα ρυθμιστή φόρτισης (charge regulator) και ένα αντιστροφέα. Ως ρυθμιστής φόρτισης χρησιμοποιείται συνήθως ένας μετατροπέας συνεχούς ρεύματος, ο οποίος είναι υποβιβασμού της τάσης (step-down), ανύψωσης της τάσης (step-up), ή υποβιβασμού-

ανύψωσης της τάσης (buck-boost). Ο ρυθμιστής φόρτισης εξασφαλίζει τη βέλτιστη φόρτιση της μπαταρίας και την προστασία της από βαθιά εκφόρτιση και από υπερφόρτιση αντίστοιχα. Ο αντιστροφέας μετατρέπει τη συνεχή τάση που λαμβάνει από τις μπαταρίες και τη φωτοβολταϊκή διάταξη, σε εναλλασσόμενη τάση με σταθερό πλάτος και συχνότητα. Ανάλογα με την κυκλωματική δομή του αντιστροφέα, η εναλλασσόμενη τάση είναι μονοφασική (Σχήμα 2.13α), ή τριφασική (Σχήμα 2.13β). Τα στοιχεία L_f - C_f στο μονοφασικό αντιστροφέα και οι επαγωγές L_1 - L_2 - L_3 στον τριφασικό, αποκόπτουν τις αρμονικές υψηλής συχνότητας που προκαλεί η διακοπτική λειτουργία των ημιαγωγών ισχύος του μετατροπέα, από την ac τάση εξόδου. Οι αντιστροφείς συνήθως λειτουργούν με κάποια PWM τεχνική, για τη λήψη ημιτονοειδούς τάσης στο φορτίο. Οι μετασχηματιστές παρέχουν τη γαλβανική απομόνωση από το δίκτυο και την αλλαγή στο επίπεδο της τάσης, όταν απαιτείται.



Σχήμα 2.13 Δομή ενός μονοφασικού (α) και ενός τριφασικού (β) αντιστροφέα, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.

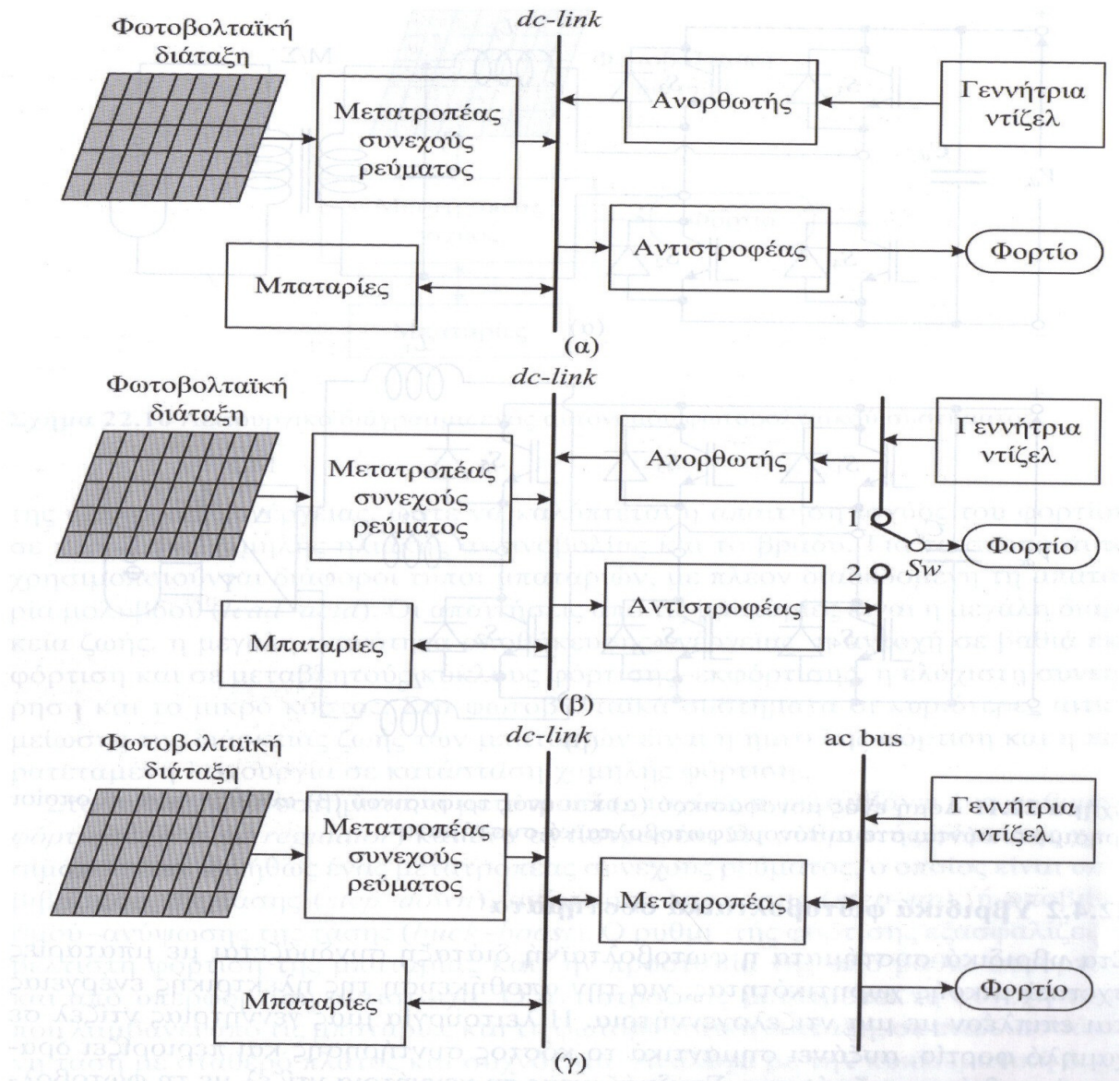
2.14 Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα

Στα υβριδικά συστήματα η φωτοβολταϊκή διάταξη συνδυάζεται με μπαταρίες σχετικά μικρής χωρητικότητας, για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας και επιπλέον με μια ντιζελογεννήτρια. Η λειτουργία μιας γεννήτριας ντίζελ σε χαμηλό φορτίο, αυξάνει σημαντικά το κόστος συντήρησης και περιορίζει δραστικά τη διάρκεια ζωής της. Συνδυάζοντας τη γεννήτρια ντίζελ με τη φωτοβολταϊκή διάταξη και τις μπαταρίες, εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας στο φορτίο με το βέλτιστο τρόπο. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ισχύος, η γεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας. Η ισχύς παρέχεται στο φορτίο είτε μόνο από την φωτοβολταϊκή διάταξη είτε όταν απαιτείται σε συνδυασμό με τις μπαταρίες.

Τα υβριδικά συστήματα υλοποιούνται σε διάταξη σειράς, σε διακοπτική και σε παράλληλη διάταξη. Στα υβριδικά συστήματα σειράς, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 2.14α, η ac ισχύς παρέχεται στο φορτίο μέσω ενός αντιστροφέα από το dc-link, στο οποίο διασυνδέονται η φωτοβολταϊκή διάταξη, η γεννήτρια ντίζελ και οι μπαταρίες. Η συνεχής τάση που παράγει η φωτοβολταϊκή διάταξη μέσω ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος και η ανορθωμένη ac τάση από την γεννήτρια ντίζελ, χρησιμοποιούνται στην φόρτιση των μπαταριών και στην τροφοδότηση του φορτίου μέσω του αντιστροφέα. Στη διάταξη σειράς, η ac τάση στο φορτίο δεν παρουσιάζει διαταραχές, καθώς η γεννήτρια εκκινεί ή τίθεται εκτός λειτουργίας. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι μικρός, καθώς η γεννήτρια τροφοδοτεί το φορτίο μέσω του ανορθωτή και του αντιστροφέα. Η ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα είναι ίση με την μέγιστη ισχύ που απαιτεί το φορτίο, ενώ μια δυσλειτουργία στον αντιστροφέα προκαλεί την πλήρη απώλεια της ισχύος στο φορτίο.

Στα υβριδικά συστήματα με διακοπτική διάταξη (Σχήμα 2.14β), η γεννήτρια ντίζελ τροφοδοτεί απευθείας το φορτίο, με αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση του βαθμού απόδοσης. Η γεννήτρια μέσω του ανορθωτή και η φωτοβολταϊκή διάταξη, χρησιμοποιούνται στη φόρτιση μπαταριών. Όταν απαίτηση ισχύος του φορτίου είναι υψηλή, ο διακόπτης μεταγωγής S_w τοποθετείται στη θέση 1 και το φορτίο τροφοδοτείται απευθείας από την γεννήτρια. Ταυτόχρονα, η γεννήτρια μέσω του ανορθωτή και η φωτοβολταϊκή διάταξη, φορτίζουν τις μπαταρίες. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ισχύος, η γεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας και το φορτίο

τροφοδοτείται μέσω του αντιστροφέα από την φωτοβολταϊκή διάταξη, σε συνδυασμό με τις μπαταρίες, θέτοντας το διακόπτη μεταγωγής στη θέση 2. Το μειονέκτημα της διάταξης είναι η στιγμιαία απώλεια ισχύος στο φορτίο, κατά τη μετάβαση του διακόπτη Sw.

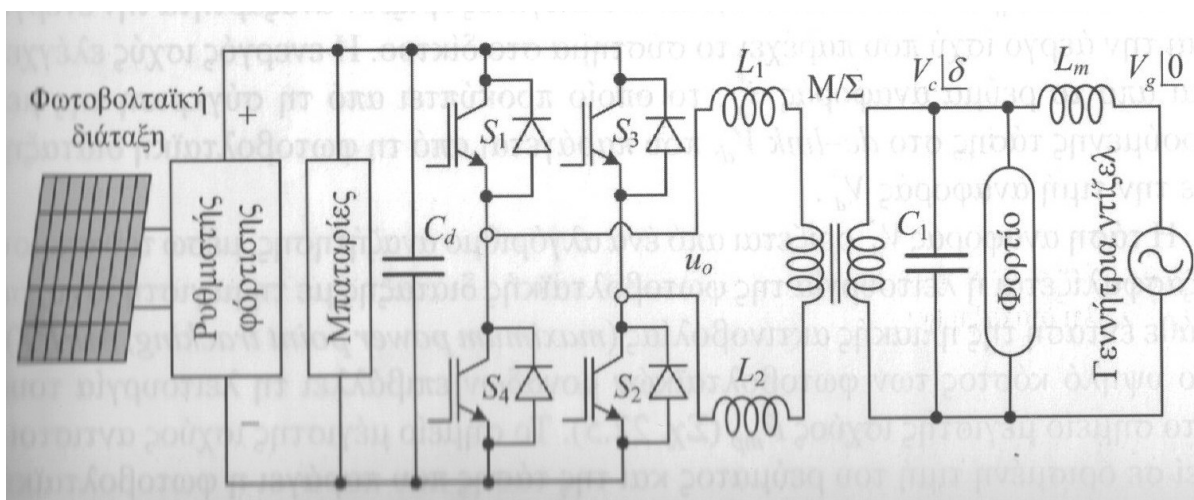


Σχήμα 2.14 Υβριδικά συστήματα σε διάταξη σειράς (α), σε διακοπτική διάταξη (β) και σε παράλληλη διάταξη (γ)

Στα υβριδικά παράλληλη συστήματα, η τροφοδότηση του φορτίου με ac ισχύ επιτελείται ταυτόχρονα από τρεις πηγές, τη γεννήτρια ντίζελ, τη φωτοβολταϊκή διάταξη και τις μπαταρίες, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 2.14γ. Όταν η ζήτηση ισχύος είναι

μικρή, η γεννήτρια δεν λειτουργεί και το φορτίο τροφοδοτείται από τις μπαταρίες και τη φωτοβολταϊκή διάταξη μέσω του μετατροπέα, ο οποίος λειτουργεί ως αντιστροφέας. Όταν η απαίτηση ισχύος είναι υψηλή, τίθεται σε λειτουργία η γεννήτρια, η οποία τροφοδοτεί το φορτίο και ταυτόχρονα φορτίζει τις μπαταρίες μέσω του μετατροπέα, ο οποίος λειτουργεί ως ανορθωτής. Όταν η ισχύς που απαιτεί το φορτίο υπερβεί την ισχύ της γεννήτριας, η πρόσθετη ισχύς παρέχεται από τις μπαταρίες μέσω του αντιστροφέα.

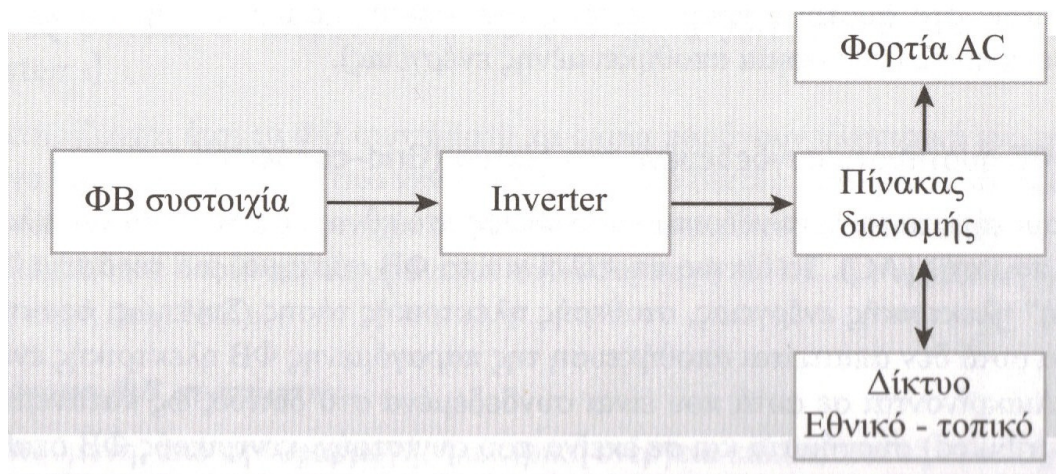
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.15) εικονίζεται η κυκλωματική δομή ενός υβριδικού συστήματος σε παράλληλη διάταξη. Η γεννήτρια ντίζελ και ο μετατροπέας ισχύος συνδέονται παράλληλα, μέσω της επαγωγής ζεύξης L_m , για την τροφοδότηση του φορτίου. Τα στοιχεία L_1 - L_2 - C_1 φιλτράρουν τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας της τάσης εξόδου u_o του μετατροπέα. Ο μετατροπέας λειτουργεί ως πηγή τάσης με ελεγχόμενο πλάτος V_c και φάση δ . Ανάλογα με τη διαφορά φάσης δ , μεταξύ των τάσεων V_c και V_g που παράγει η γεννήτρια, ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας ή ως ανορθωτής. Όταν ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας, τροφοδοτεί με ac ισχύ το φορτίο, σε συνδυασμό με την γεννήτρια ντίζελ. Στη λειτουργία ανορθωτή, η γεννήτρια τροφοδοτεί το φορτίο και παράλληλα φορτίζει τις μπαταρίες. Επιπλέον, ένας ρυθμιστής φόρτισης εξασφαλίζει τη φόρτιση των μπαταριών από τη φωτοβολταϊκή διάταξη.



Σχήμα 2.15 Κυκλωματική δομή ενός υβριδικού συστήματος σε παράλληλη διάταξη

2.15 Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα συστήματα αυτά συνδέονται απ' ευθείας στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής παροχής (AC). Το δίκτυο αποτελεί για το ΦΒ σύστημα, μια τεράστια "δεξαμενή" ηλεκτρικής ενέργειας, σταθερής ηλεκτρικής τάσης. Συνεπώς, στα συστήματα αυτά δεν απαιτείται αποθήκευση της παραγόμενης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας. Διακρίνονται σε αυτά που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, ως κατακεντρωμένα (Distributed) συστήματα και σε εκείνα που συνιστούν κεντρικούς ΦΒ σταθμούς μεγάλης ισχύος, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο (Centralized systems). Με στοιχεία του 2002 (IEA), τα συστήματα αυτά καλύπτουν το 74% της ολικά εγκαταστημένης ισχύος ΦΒ συστημάτων και το ποσοστό αυτό παρουσιάζει συνεχή αύξηση στο διάστημα 1992-2002. Τα κατακεντρωμένα ΦΒ συστήματα αποτελούν το 95% των συνδεδεμένων στο δίκτυο συστημάτων, παγκοσμίως. Στην κατηγορία των κεντρικών ΦΒ συστημάτων ανήκουν και τα μεγάλα ΦΒ συγκροτήματα, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται κατ' ευθείας στο δίκτυο.



Σχήμα 2.16 ΦΒ σύστημα συνδεδεμένο στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο

Τα κατακεντρωμένα ΦΒ συστήματα, διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως βοηθητική πηγή ενέργειας (Grid back-up) και σε εκείνα που λειτουργούν σε συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο, διοχετεύοντας την επιπλέον παραγόμενη

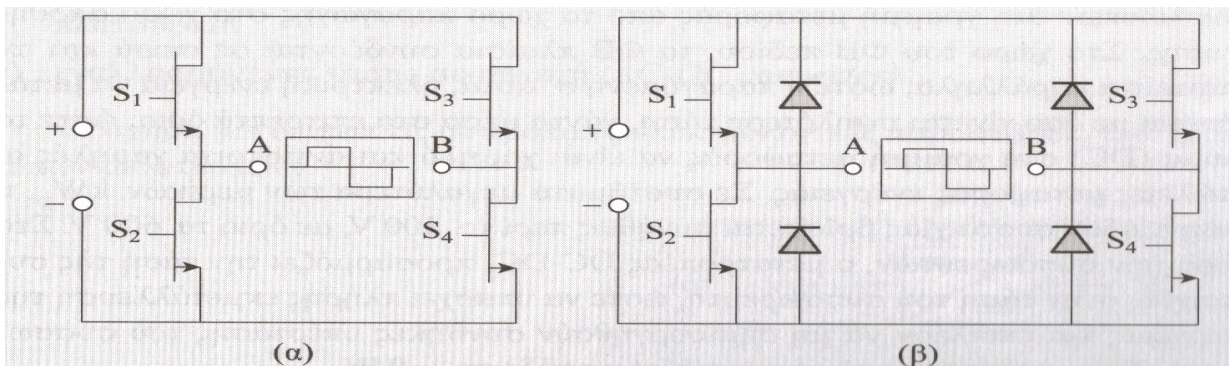
ενέργεια σ' αυτό (Grid interactive). Στην πρώτη περίπτωση το ΦΒ σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει κατά μέσο όρο τις μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Το δίκτυο καλύπτει έκτακτη ενεργειακή ζήτηση ή καταστάσεις αστοχίας του ΦΒ συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση, το βασικότερο κριτήριο αφορά στην επιλογή εκείνης της ΦΒ συστοιχίας η οποία καλύπτει, κατά μέσο όρο, τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Στις χρονικές περιόδους που το ΦΒ σύστημα υστερεί στην κάλυψη των καταναλώσεων της εφαρμογής, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από το δίκτυο. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, μέσα στο έτος, η συνολική ενέργεια από το δίκτυο στην εφαρμογή, προβλέπεται να είναι ίση με τη συνολική ενέργεια από το ΦΒ σύστημα στο δίκτυο. Αν η επιδίωξη μας είναι το ετήσιο οικονομικό ισοζύγιο μεταξύ παραγωγού και ΔΕΗ, κατά τη σχεδίαση του συστήματος λαμβάνεται υπ' όψη η διαφοροποίηση των τιμολογίων παραγωγής και κατανάλωσης.

3.1 Ο μετατροπέας DC-AC (Inverter)

Η χρησιμοποίηση του εναλλασσόμενου ρεύματος επιβάλλεται εξαιτίας της επικράτησής του, κατά γενικό τρόπο, σε κάθε είδος οικιακές χρήσεις και εφαρμογές καθώς και στη βιομηχανία. Εντελώς γενικά, τρεις είναι οι κύριοι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να μετατρέψουμε συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC).

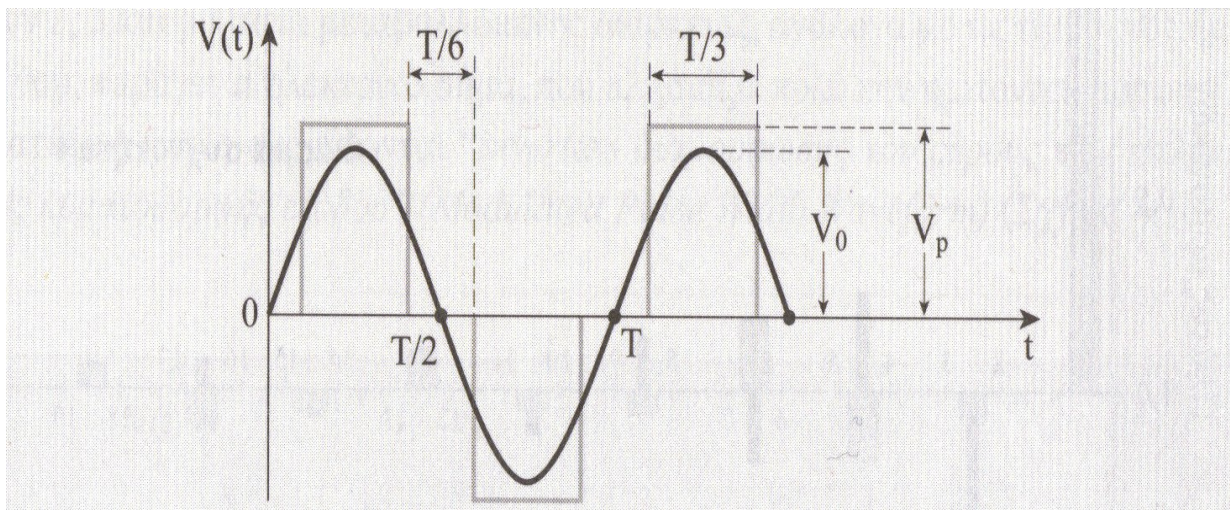
- A) Με συνδυασμό κινητήρα συνεχούς ρεύματος με γεννήτρια εναλλασσόμενου,
- B) Με χρήση του κλασικού μηχανικού ή ηλεκτρονικού διακοπτικού συστήματος σε συνεργασία με μετασχηματιστή (πηνίο Ruhmkorff, διατάξεις τροφοδοσίας των αναφλεκτήρων των μηχανών εσωτερικής καύσης) και
- Γ) Με τον καθαρά ηλεκτρονικό μετατροπέα DC-AC (inverter).

Ο inverter είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική). Η βασική αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στο σχήμα 3.1. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις που διαθέτουμε πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως και καταναλωτές εναλλασσόμενης, όπως συμβαίνει π.χ στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές οικιακής χρήσεως. Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (π.χ bipolar transistors ισχύος, MOSFETs, thyristors κ.λ.π), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σειράς τετραγωνικών παλμών διαδοχικά ορθών και αναστραμμένων (Inversion).



Σχήμα 3.1 (α) Βασική αρχή λειτουργίας του inverter. S1,S2,S3,S4=διακοπτικά στοιχεία. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC conversion), επιτυγχάνεται με κλείσιμο-άνοιγμα των διακοπτικών στοιχείων ανά δύο, χιαστί (1,4 και 2,3). Όσο τα S1,S4 είναι αγωγή και τα S2,S3 σε αποκοπή, τα σημεία A και B έχουν πρόσημο + και - αντίστοιχα. Όταν συμβαίνει το αντίστροφο, τα A και B έχουν πρόσημο - και + αντίστοιχα. Μ' αυτό τον τρόπο δημιουργείται η εναλλασσόμενη τετραγωνική τάση (κέντρο του διαγράμματος). (β) Στο προηγούμενο κύκλωμα προστίθεται, σε κάθε διακοπτικό στοιχείο, από μία δίοδο, ώστε να αποκόπτεται η επιστρεφόμενη ισχύς από μη ωμικά φορτία κατανάλωσης.

Μία βελτιωμένη έκδοση inverter, αποτελεί εκείνος του οποίου η τάση εξόδου παρουσιάζεται με τη μορφή διαμορφωμένου ημιτόνου (modified sine inverter), όπως εμφανίζεται στο σχήμα 3.2.

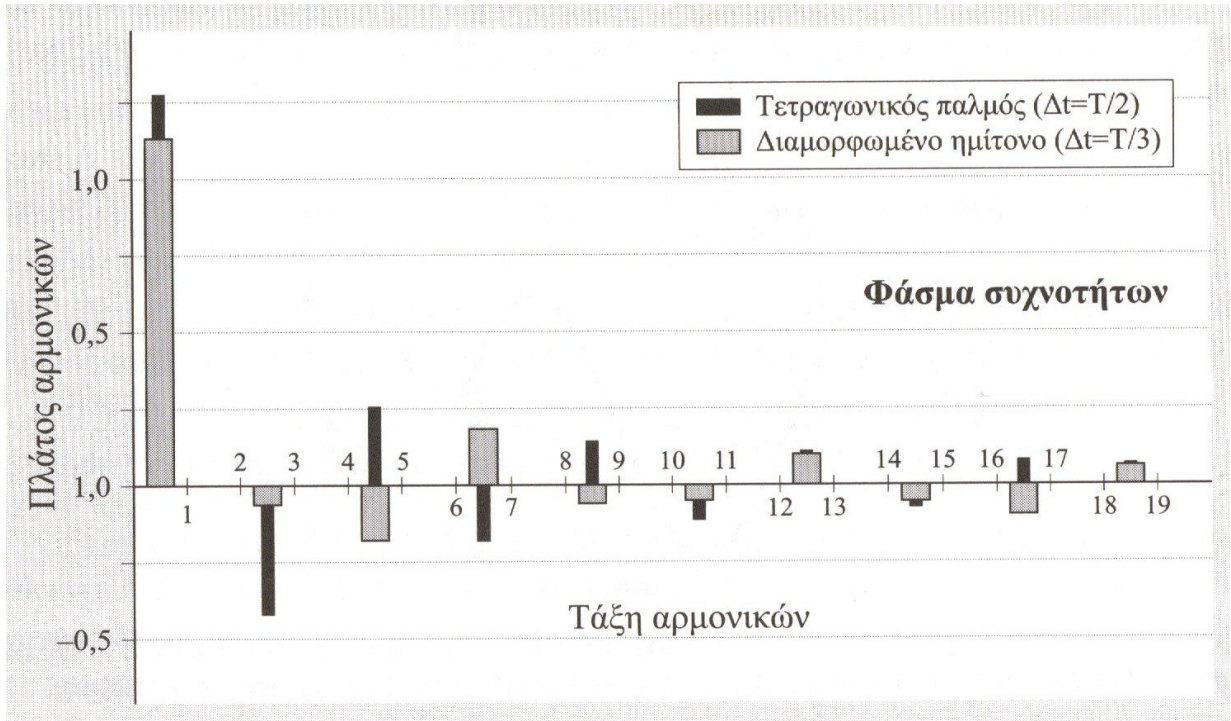


Σχήμα 3.2 Η μορφή του τροποποιημένου ημιτόνου (Quasi-Sine Wave ή modified sine), σε σύγκριση με το καθαρό ημίτονο. V_p =πλάτος τετραγωνικού παλμού. V_0 = πλάτος αντίστοιχου θεμελιώδους ημιτονικής κυματομορφής

Με κατάλληλη ρύθμιση των χρόνων κλεισίματος- ανοίγματος των διακοπών, επιτυγχάνουμε μικρή τροποποίηση της κυματομορφής εξόδου του, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι ο αρνητικός τετραγωνικός παλμός είναι μετατοπισμένος χρονικά, σε σχέση με τον θετικό, κατά $T/6$ της περιόδου της συνολικής κυματομορφής. Το χρονικό εύρος των τετραγωνικών τμημάτων είναι $T/3$.

Το πλεονέκτημα αυτής της διαμορφωμένης τετραγωνικής κυματομορφής, είναι ότι περιορίζεται το μέγεθος των ανωτέρων αρμονικών και άρα περιορίζεται δραστικά η παραμόρφωση σήματος. Πράγματι, όπως παρατηρείτε στο σχήμα 3.3, υπάρχει έντονη διαφορά μεταξύ των πλατών των ανωτέρων αρμονικών του διαμορφωμένου σήματος, σε σχέση με τον απλό τετραγωνικό παλμό.

Η περίπτωση με μετατόπιση $t=T/6$ μεταξύ των ανεστραμμένων παλμών χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη παραμόρφωση που επιβάλουν οι ανώτερες αρμονικές στο σήμα της θεμελιώδους. Οι inverters αυτού του είδους χρησιμοποιούνται ευρέως, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στις συσκευές που τροφοδοτούν και παρουσιάζουν αρκετά καλή απόδοση (μέχρι και 96%, σε πλήρες φορτίο).



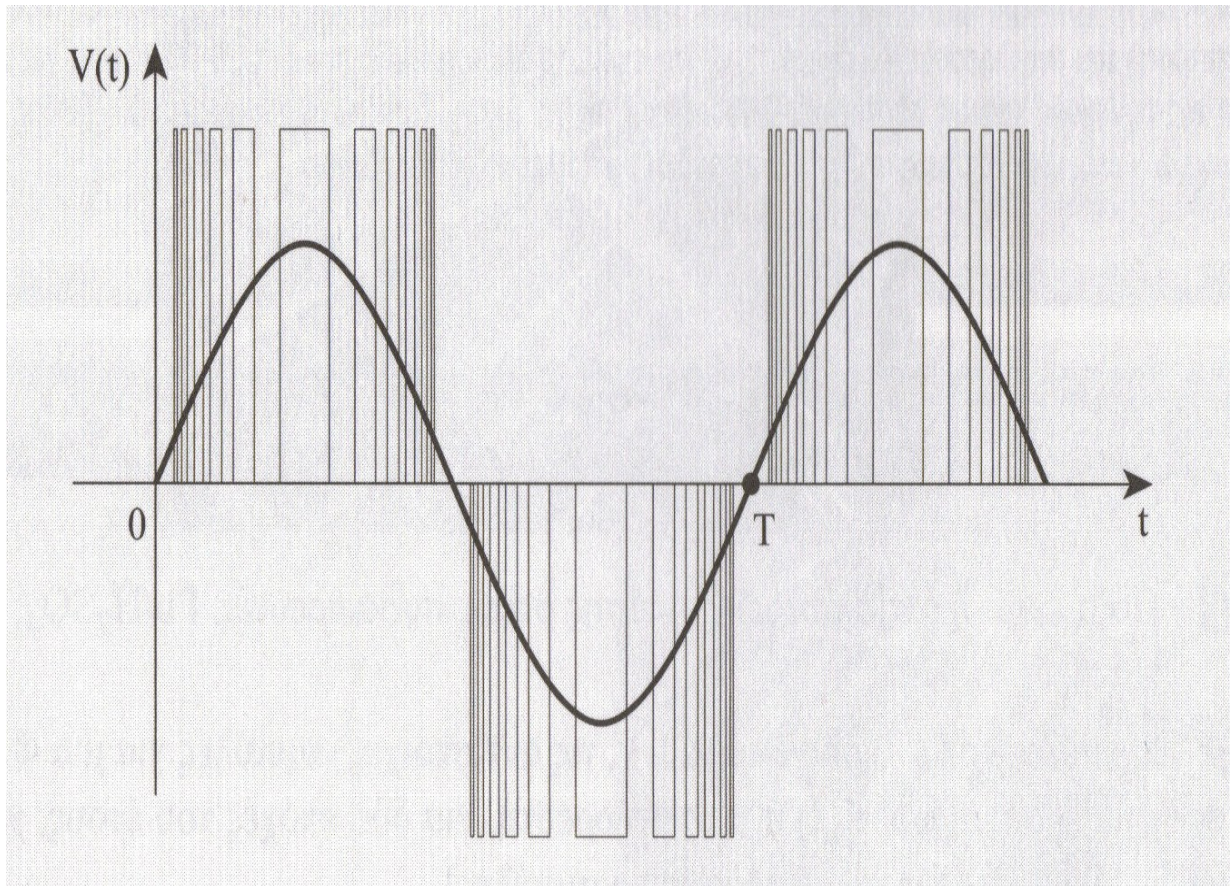
Σχήμα 3.3 Φάσμα συχνοτήτων δύο περιοδικών σημάτων του εναλλασσόμενου τετραγωνικού παλμού (μαύρο παραλληλόγραμμα) και του εναλλασσόμενου διαμορφωμένου τετραγωνικού παλμού. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής (Τάξη $n=1$) είναι $\sim 1,15$ του πλάτους του τετραγωνικού παλμού ($V_0=1,15$ Vp).



Σχήμα 3.4 Μεταβολή της απόδοσης του inverter σε συνάρτηση με το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί

Γενικά, η απόδοση των inverters είναι αρκετά υψηλή (93-96%, σχήμα 3.4), εξαρτώμενη από το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί. Απαιτείται υψηλή απόδοση, όχι μόνο όταν τροφοδοτείται το πλήρες φορτίο (100%), αλλά και όταν αυτό είναι μειωμένο. Συγκεκριμένα, βασικό απαιτούμενο χαρακτηριστικό ενός inverter είναι η υψηλή απόδοση (>90%) ακόμα κι όταν το φορτίο είναι μόνο 10% του πλήρους. Σημειώνεται, επίσης, ότι η λειτουργία τους συνοδεύεται, κατά περίπτωση, από παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλών συχνοτήτων (κυρίως με τον απλό τετραγωνικό παλμό), που περιορίζονται με ειδικά ηλεκτρονικά φίλτρα.

Επιβάλλοντας περισσότερα κλεισίματα των διακοπών 1,4 και στη συνέχεια των 2,3 και μάλιστα μεταβαλλόμενης διάρκειας, ανάλογα με τις τιμές ενός ημιτόνου, παράγεται ηλεκτρικό σήμα, που πλησιάζει πολύ την ημιτονική μορφή. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται “inverters διαμόρφωσης του εύρους των παλμών της κυματομορφής εξόδου” (Modulated Pulse Width Waveform) σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Η κυματομορφή εξόδου ενός inverter διαμόρφωσης εύρους παλμών.

3.2 Επιλογή του μετατροπέα DC/AC

Η επιλογή του μετατροπέα DC/AC εξαρτάται:

α. Από την αποδεκτή ή επιθυμητή κυματομορφή στην έξοδο του που είναι η είσοδος στο φορτίο και

β. Από την απόδοση του μετατροπέα

Ένας ακόμη παράγοντας για την επιλογή ενός μετατροπέα εξαρτάται από το αν βρίσκεται ως αυτοδύναμο στοιχείο στο ΦΒ συγκρότημα ή αποτελεί μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος συνδεδεμένου με το δίκτυο.

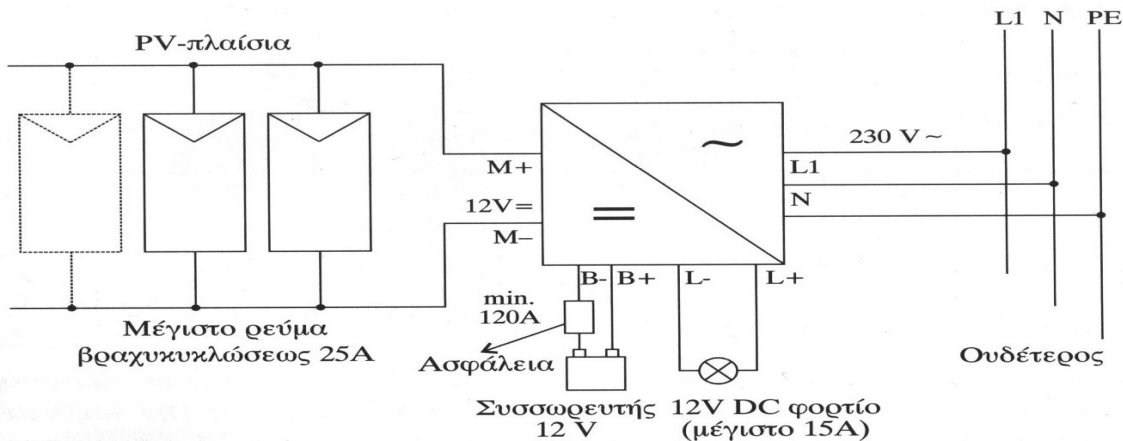
Ο πίνακας 3.1 δείχνει τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων μετατροπέων DC/AC

Παράμετροι DC/AC	Τετραγωνικός παλμός	Διαμορφωμένος ημιτονοειδής παλμός	DC/AC με Διαμόρφωση πλάτους	Καθαρός ημιτονοειδής παλμός
------------------	---------------------	-----------------------------------	-----------------------------	-----------------------------

		παλμού		
Ισχύς Εξόδου σε Watts	Μέχρι 1,000,000	300-2,500	Μέχρι 20,000	Μέχρι 2,000
Αντοχή σε απότομη άνοδο της ισχύος	Μέχρι 20X	Μέχρι 4X	Μέχρι 2.5X	Μέχρι 4X
Τυπική Απόδοση	70-98%	70-85%	>90%	Μέχρι 80%
Παραμόρφωση Αρμονικών	Μέχρι 40%	≈ 5%	<5%	<1%

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά των διαθέσιμων μετατροπέων DC/AC

- Οι αντιστροφείς DC/AC είναι τυποποιημένα ηλεκτρονικά συστήματα που χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών. Είναι πολύ σημαντικά και ευαίσθητα μέρη ενός ΦΒ συγκροτήματος και από την σωστή λειτουργία τους ενισχύεται το αξιόπιστο του ΦΒ συστήματος. Δέχονται είσοδο DC απευθείας από τη ΦΒ συστοιχία ή από τους συσσωρευτές και αποδίδουν στην έξοδο AC απευθείας στα φορτία ή στο δίκτυο, όπως δείχνει το σχήμα 3.6.

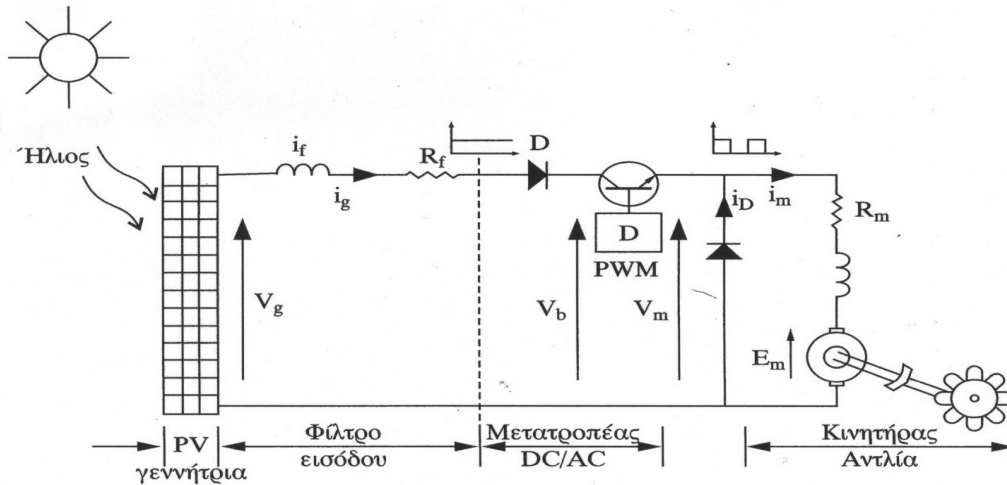


Σχήμα 3.6 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκού πλαισίων με προστατευτικό διαχωρισμό συνδεδεμένων με μετατροπέα DC/AC. Τάση εισόδου 12Volts.

- Η απόδοση του αντιστροφέα DC/AC ποικίλει ανάλογα με το ρεύμα στο φορτίο. Είναι μέγιστη περίπου 95% όταν λειτουργεί περί την ονομαστική τιμή της ισχύος στην έξοδό του. Όταν όμως λειτουργεί υπό μερικό φορτίο, τότε η απόδοση πέφτει στα 75-80%.

- Οι αντιστροφείς DC/AC κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες.

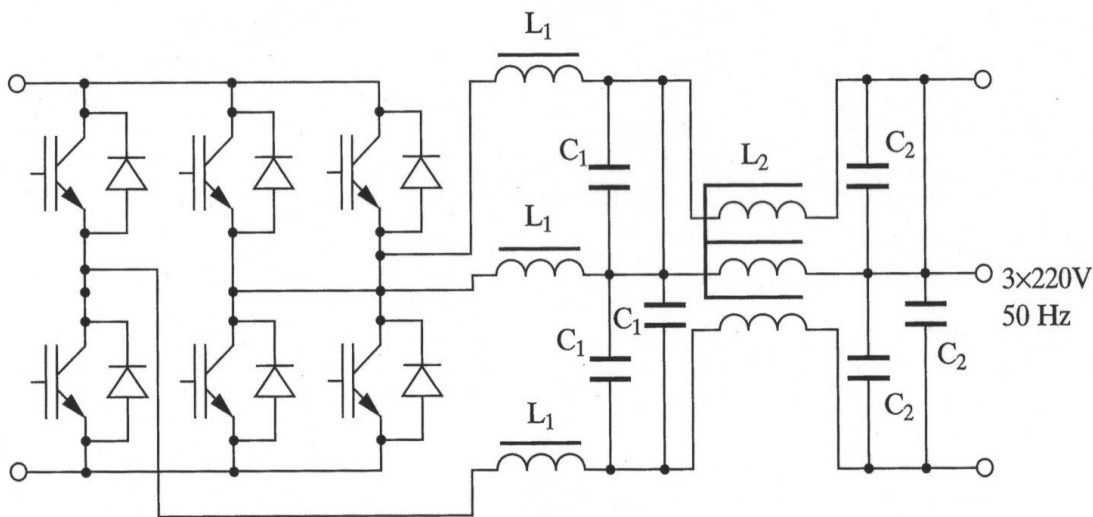
A. Αντιστροφείς με μεταβαλλόμενη συχνότητα που χρησιμοποιούνται για αυτόνομα συστήματα όπου το φορτίο ή μέρος του φορτίου αντιπροσωπεύει κινητήρας ή αντλία κλπ, σχήμα 3.7. Κυρίως χρησιμοποιείται σε αντλητικά ΦΒ συγκροτήματα.



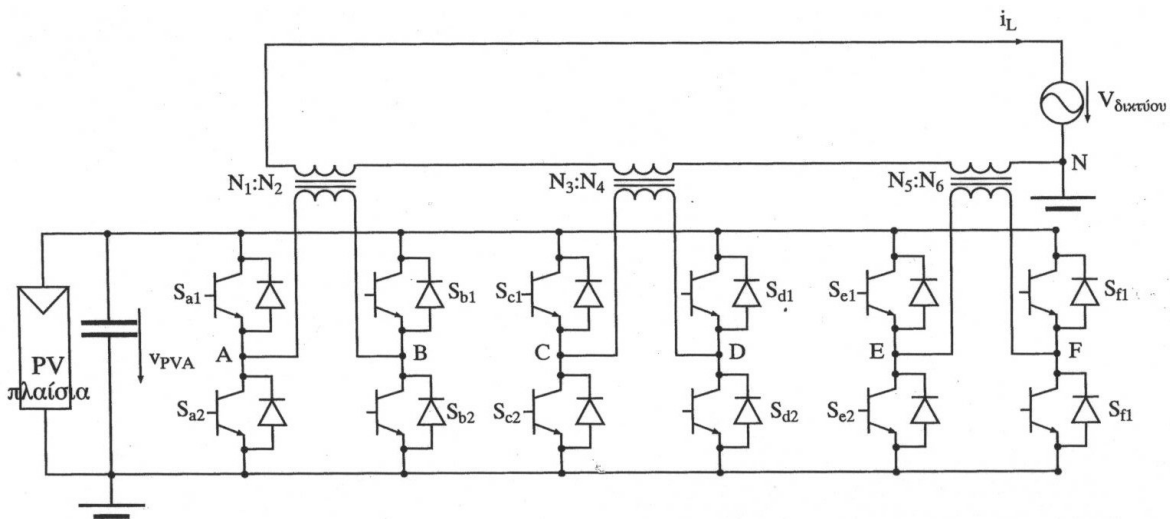
Σχήμα 3.7 Διάταξη ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος για άντληση νερού που χρησιμοποιεί μετατροπέα DC/AC.

B. Αυτορυθμιζόμενοι αντιστροφείς ορισμένης συχνότητας.

Αυτοί έχουν το χαρακτηριστικό ότι μπορούν να συνδεθούν και με το δίκτυο αρκεί να συμπληρωθεί το σύστημα του αντιστροφέα με ένα σύστημα παραλλήλου ελέγχου – συγχρονισμού, σχήμα 3.8 και 3.9.



Σχήμα 3.8 Αντιστροφέας DC/AC με φίλτρα εξόδου με την βοήθεια του οποίου ένα ΦΒ σύστημα συνδέεται με το δίκτυο.



Σχήμα 3.9 ΦΒ σύστημα συνδεδεμένο με το δίκτυο με ένα μαγνητικά συζευγμένο αντιστροφέα, DC/AC.

Γ. Σύγχρονοι αντιστροφεείς (line- commutated) ορισμένης συχνότητας οι οποίοι υπό προϋποθέσεις μπορούν να συνδεθούν και με το δίκτυο. Ωστόσο, δεν είναι τόσο υψηλής και σύγχρονης τεχνολογίας, όσο οι αντιστροφεείς της β κατηγορίας.

• **Αντιστροφέας DC/AC με 4 thyristors, συνδεδεμένος με το Δίκτυο.**

Το σχήμα 3.10α δείχνει ένα κύκλωμα αντιστροφέα DC/AC με τέσσερα thyristors και ένα πηνίο που συνδέει την ΦΒ γεννήτρια με το δίκτυο. Ως γνωστόν, ένα thyristors άγει όταν εφαρμόζεται ένας βραχείας διάρκειας παλμός στην πύλη του που αντιστοιχεί στην βάση ενός thyristors.

Τότε άγει το ρεύμα, όπως και η δίοδος, μέχρις ότου το ρεύμα που διέρχεται δι'αυτού, για κάποιο λόγο, μηδενισθεί. Τότε σταματά να άγει. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.10α τα thyristors άγουν ρεύμα με διεύθυνση προς τα κάτω.

Ας υποθέσουμε ότι η επαγωγή του πηνίου L, είναι μεγάλη έτσι ώστε το ρεύμα, i, που ρέει μέσω των ΦΒ πλαισίων και του L, να είναι κατ'ουσίαν σταθερό.

Το κύκλωμα περιλαμβάνει και ένα σύστημα ελέγχου/ανίχνευσης του σημείου στο οποίο μηδενίζεται η τάση $V_{\delta\text{ικτ}}$ οπότε και ανοίγει τα thyristors T₂ και T₃, με υστέρηση φάσης (180-α), όπου $|\alpha| < 90^\circ$.

Όταν τα T₂ και T₃ άγουν, το i_o είναι αρνητικό, ανεξάρτητα από την πολικότητα της $V_{\delta\text{ικτ}}$. Τούτο διακρίνουμε στο σχήμα 3.10γ.

Σε φάση $\omega t = 360^\circ - \alpha$, τα thyristors T_1 και T_2 , αρχίζουν να άγουν.

Η πολικότητα της $V_{\delta\text{ικτ}}$ είναι αρνητική την στιγμή εκείνη και οδηγεί το ρεύμα μέσω των βραχυκυκλωμένων T_4 και T_2 , (ομοίως για τα T_1 και T_3), κατά τέτοια διεύθυνση ώστε τα T_2 (T_3) να βγούν εκτός.

Στην επόμενη ημιπερίοδο το i_o είναι θετικό. Επειδή το α είναι $< 90^\circ$ και πιθανόν πλησίον των 0° , το i_o είναι σχεδόν σε φάση με το V_o . Έτσι, η ισχύς μεταφέρεται στο Δίκτυο από τη ΦΒ γεννήτρια.

Σημείωση:

Όταν τα T_1 και T_4 , άγουν, τότε $V = V_{\delta\text{ικτ}}$, σχήμα....., ενώ,

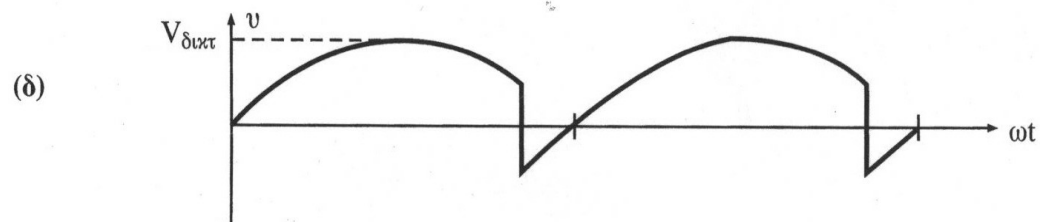
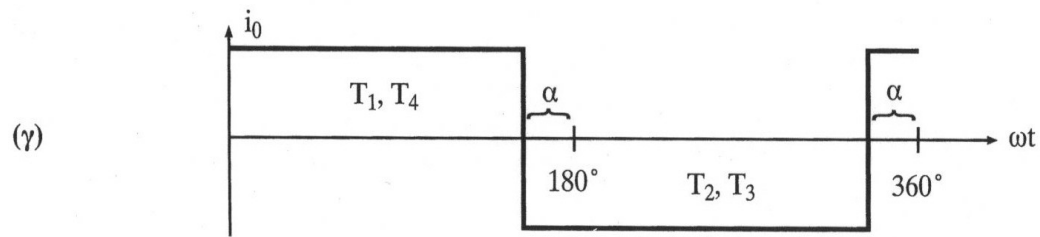
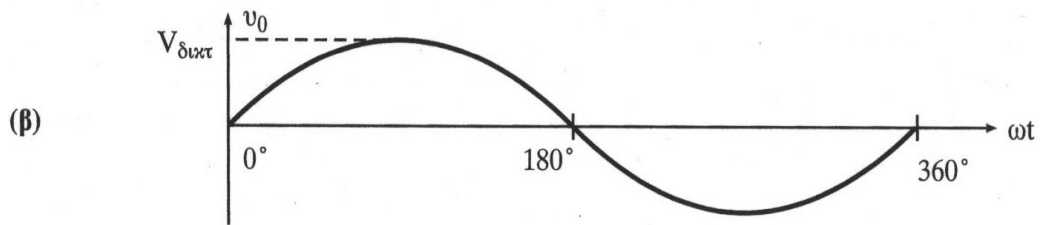
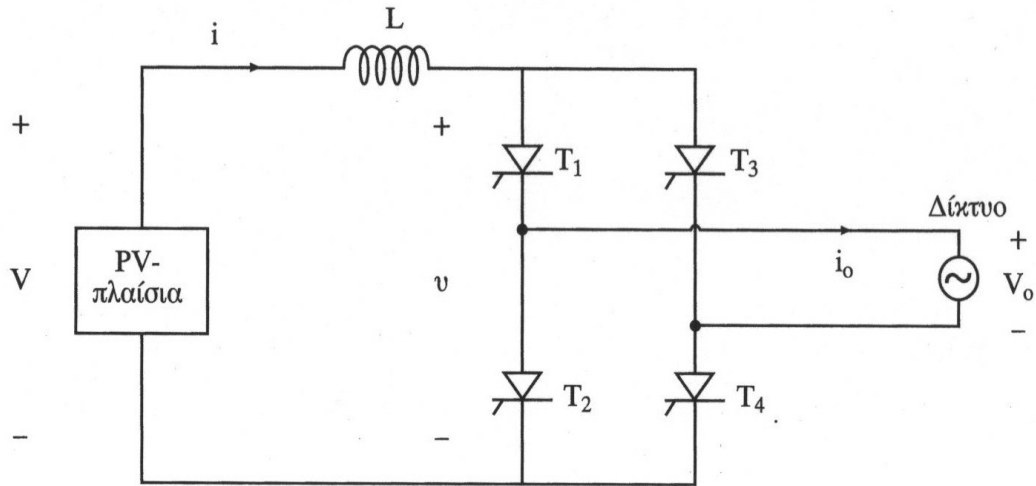
Όταν τα T_2 και T_3 , άγουν, τότε $V = -V_{\delta\text{ικτ}}$

Η μέση τιμή της τάσεως U υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\bar{U} = \frac{1}{\pi} \int_{-\alpha}^{\pi-\alpha} V_o \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2V_o}{\pi} \cos \alpha$$

Τούτη η μέση τιμή της τάσης είναι και η τάση της ΦΒ γεννήτριας, καθώς δεν υπάρχει πτώση τάσης σ'ένα ιδανικό πηνίο, L , με σύνθετη αντίσταση, $Z=0$.

Η μέση τιμή της τάσης που εξαρτάται από το V_o και την υστέρηση α καθορίζουν και την τάση λειτουργίας V της ΦΒ γεννήτριας.



Σχήμα 3.10 (α) Κύκλωμα αντιστροφεία DC/AC με 4 thyristors, συνδεδεμένο με το δίκτυο

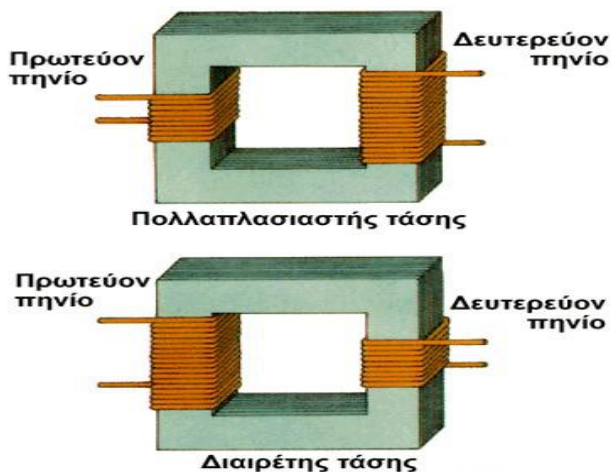
3.3 Επιλογή μετασχηματιστή

Ο μετασχηματιστής είναι μια συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο κυκλωμάτων, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών. Ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο πρώτο κύκλωμα (το "πρωτεύον") δημιουργεί ένα

μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει μεταβαλλόμενη τάση στο δεύτερο κύκλωμα (το "δευτερεύον"). Το φαινόμενο αυτό καλείται αμοιβαία επαγωγή.

Αν ένας ηλεκτρικός καταναλωτής είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα, τότε θα υπάρξει ροή ηλεκτρικού φορτίου στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Αυτό το φορτίο θα μεταφέρει ενέργεια από το πρωτεύον κύκλωμα, στον καταναλωτή που είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα βλ. σχήμα 3.11

Συγκεκριμένα, αν το δευτερεύον πηνίο έχει περισσότερες σπείρες από το πρωτεύον η τάση μεγαλώνει, ενώ στην αντίθετη περίπτωση μειώνεται. Αυτός βέβαια δεν είναι κάποιος μαγικός τρόπος για να κερδίσουμε ενέργεια, μια και μπορεί να μεγαλώνει η τάση, πέφτει όμως η ένταση του ρεύματος έτσι ώστε η ενέργεια να παραμένει σταθερή.



Σχήμα 3.11

Η επαγόμενη τάση V_S στο δευτερεύον ενός ιδανικού μετασχηματιστή, είναι ανάλογη της τάσης V_P στο πρωτεύον κατά ένα συντελεστή ίσο με το λόγο του αριθμού N των περιελίξεων του σύρματος στα αντίστοιχα τυλίγματα:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

Οι δείκτες S , P προέρχονται από τις αγγλικές λέξεις secondary, primary, οι οποίες σημαίνουν αντίστοιχα δευτερεύον και πρωτεύον.

Με κατάλληλη επιλογή του αριθμού των περιελίξεων, ένας μετασχηματιστής επιτρέπει την ανύψωση μιας εναλλασσόμενης τάσης (αν $N_s > N_p$) ή τον υποβιβασμό της (αν $N_s < N_p$).

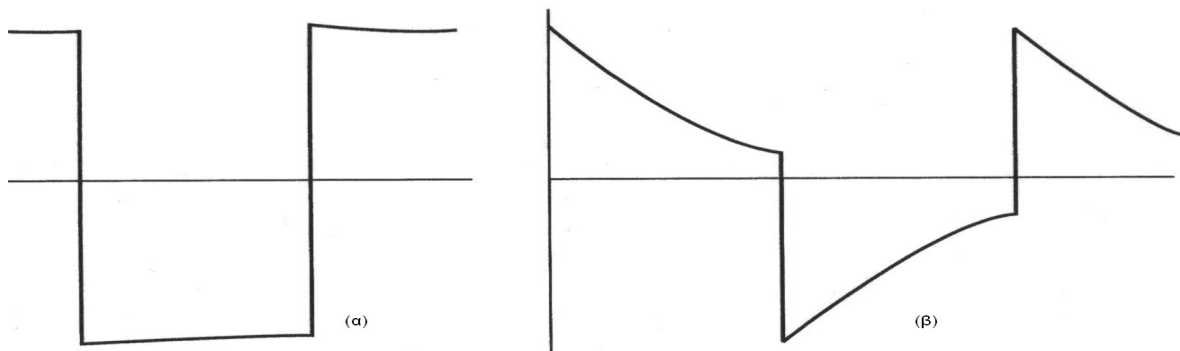
Οι μετασχηματιστές είναι ανάμεσα στις πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές, με κάποιες μεγάλες μονάδες να αποδίδουν έως και το 99.75% της ισχύος εισόδου τους στην έξοδό τους.

Όταν το DC μετατραπεί σε AC είναι επιθυμητό το πλάτος του να φθάσει σε τιμή που να ισοδυναμεί με 230 Volts, rms ημιτονοειδούς κυματομορφής.

Ωστόσο, σε τετραγωνικούς παλμούς η τιμή rms είναι ίση με το πλάτος. Επομένως, εάν ένα ΦΒ πλαίσιο δίνει πλάτος 12 Volts DC τότε για να γίνει ημιτονοειδής με 230 Volts AC rms, απαιτεί μετασχηματιστή με λόγο περιστροφών στα πηνία του 20:1.

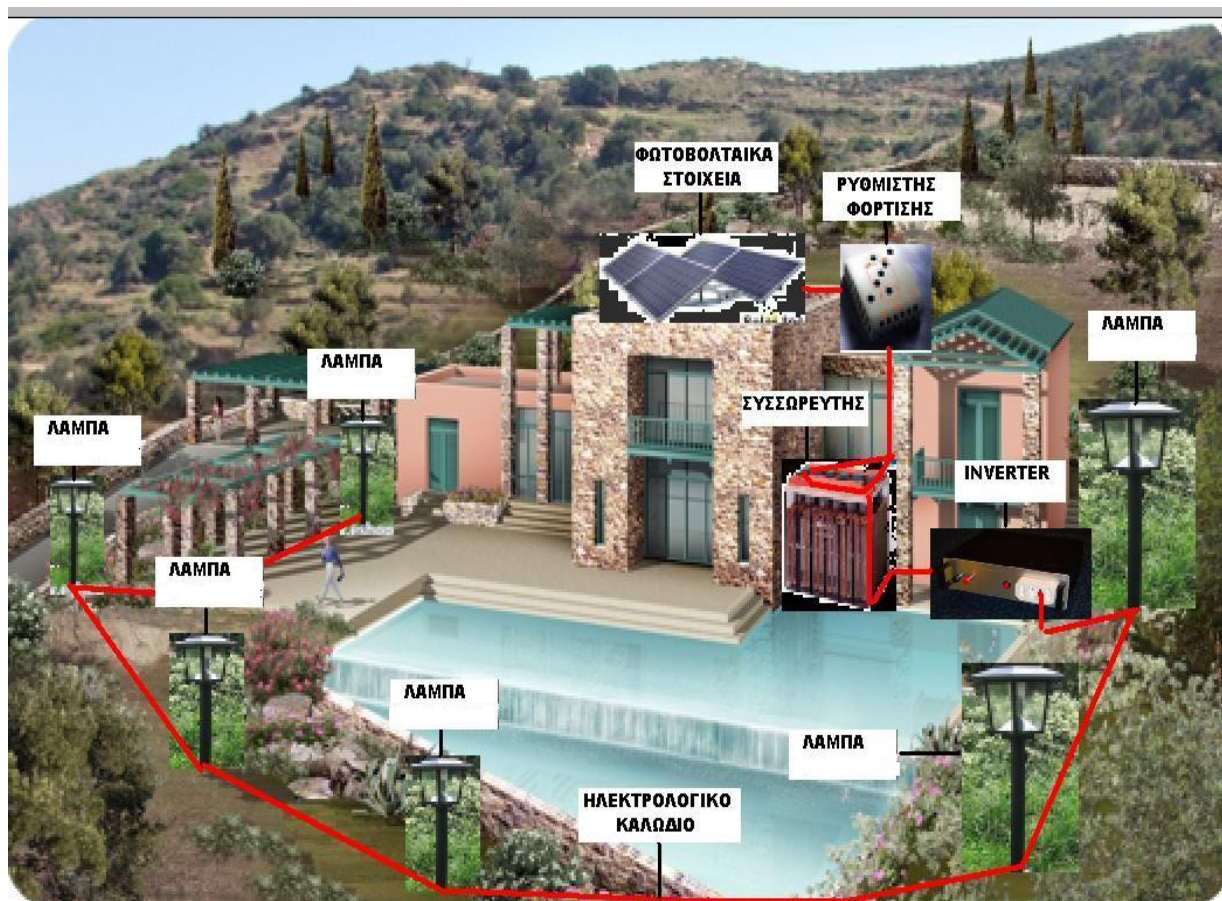
Ο σχεδιασμός του μετασχηματιστή είναι ευαίσθητος. Δεν αρκεί μόνο να ικανοποιείται ο λόγος 20:1 στις περιτυλίξεις, αλλά και ο αριθμός των περιτυλίξεων είναι σημαντική παράμετρος, καθώς η σταθερά χρόνου εξαρτάται από το μέγεθος της μαγνητικής επαγωγής του μετασχηματιστή βλ. σχήμα 3.12(α)

Αντίθετα μικρό περιτύλιγμα δεν επιτρέπει να συγκρατηθεί ο τετραγωνικός παλμός επί αρκετό διάστημα, όπως δείχνει το σχήμα 3.12(β)



Σχήμα 3.12 Κυματομορφή εξόδου για μετατροπέα τετραγωνικού παλμού με επαρκείς (α) και μη επαρκείς στροφές μετασχηματισμού (β)

3.4 Πρόταση για πρακτική εφαρμογή του inverter



Εικόνα 3.1

Στην παραπάνω εικόνα 3.1 απεικονίζεται η πρακτική εφαρμογή του inverter, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις καθημερινές μας εφαρμογές.

Αρχικά μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων γίνεται η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας όπου και μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια δια μέσου του ρυθμιστή φόρτισης γίνεται η φόρτιση του συσσωρευτή με ασφαλή τρόπο καθώς ο ρυθμιστής φόρτισης έχει την ιδιότητα προστατεύει το σύστημα αποθήκευσης από υπερφόρτιση ή βαθιά εκφόρτιση. Με την φόρτιση του συσσωρευτή το ρεύμα εισέρχεται στον μετατροπέα τάσεως (inverter), όπου εκεί μετατρέπεται η τάση 12VDC σε 230VAC. Πλέον το φορτίο μας (στο ακόλουθο παράδειγμα η λάμπα AC) μπορεί να λειτουργήσει καθώς δέχεται το κατάλληλη τάση.

Είναι μια από τις πολλές εφαρμογές που είναι δυνατή η χρήση ενός inverter για διευκόλυνση της καθημερινή μας ζωή, εξοικονομώντας αρκετά χρήματα.

4.1 Εισαγωγή

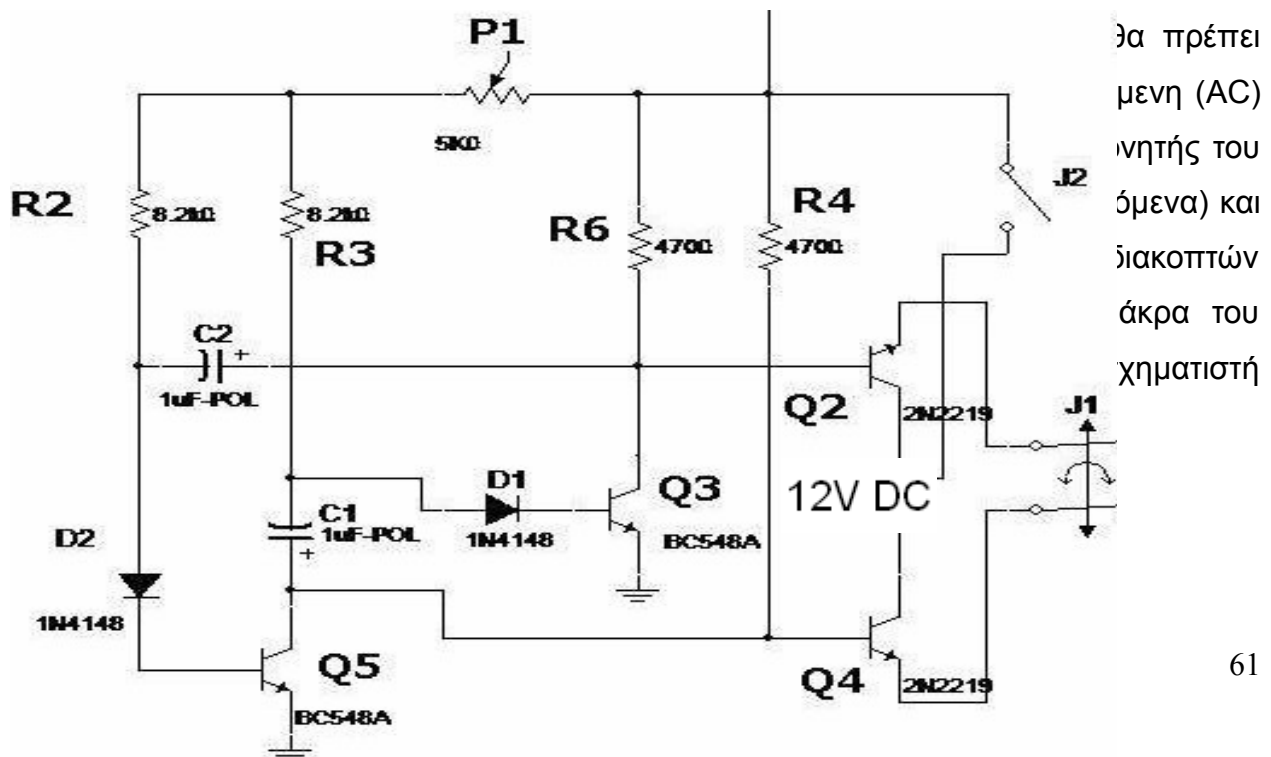
Για την κατασκευή ενός αντιστροφέα (Inverter) υπάρχει κάθε φορά το ίδιο πρόβλημα. Ποια είναι η κατάλληλη κυματομορφή που πρέπει να έχει η εναλλασσόμενη τάση; Το ιδανικό θα ήταν βέβαια να επιδιώξουμε ημιτονική κυματομορφή. Στην πράξη όμως αποφεύγεται κάτι τέτοιο γιατί η ημιτονική κυματομορφή στους αντιστροφείς συνεπάγεται και πολύ μεγάλες απώλειες ισχύος.

Η τετραγωνική κυματομορφή είναι πιο εύκολη από κατασκευαστικής πλευράς και έχει και το πλεονέκτημα ότι επιτυγχάνεται με πολύ μικρότερες απώλειες ισχύος. Έτσι μπορεί κανείς να κατασκευάσει μετατροπέα με μικρό όγκο και συγκριτικά μεγάλη ισχύ. Το μεγάλο μειονέκτημα της τετραγωνικής κυματομορφής είναι ότι δεν μπορεί να τροφοδοτήσει όλων τις συσκευές, δεδομένου ότι οι περισσότερες απαιτούν οπωσδήποτε ημιτονική κυματομορφή έστω και κατά προσέγγιση.

Το πιο σωστό είναι να καταφύγει κανείς σε κάποιο συμβιβασμό στα δύο είδη κυματομορφών. Ο αντιστροφέας που θα κατασκευάσουμε παρέχει στην έξοδο του εναλλασσόμενη τάση υπό μορφή τραπεζίου. Η τραπεζοειδής κυματομορφή έχει το πλεονέκτημα ότι πλησιάζει αρκετά την ημιτονική χωρίς ωστόσο να απαιτεί πάρα πολλά και δύσκολα εξαρτήματα για την υλοποίησή της.

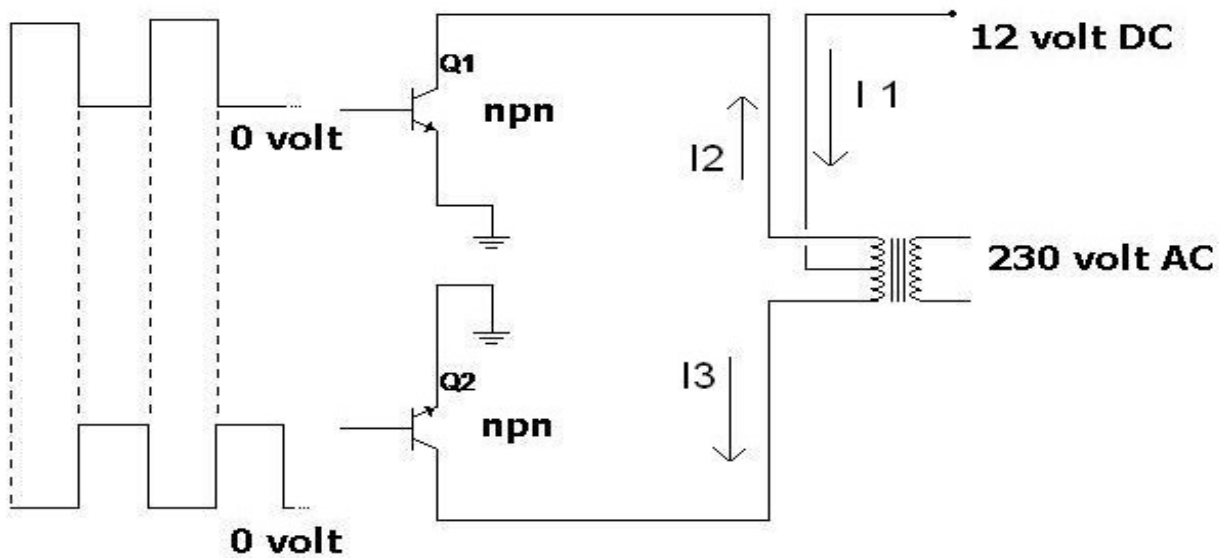
4.2 Λειτουργία κυκλώματος

Το παρακάτω κύκλωμα (Σχήμα 4.3) είναι ένας μετατροπέας συνεχούς τάσης (D.C. 12volt) σε εναλλασσόμενη τάση (A.C. 230volt / 50Hz) με μέγιστη ισχύ εξόδου ~ 230



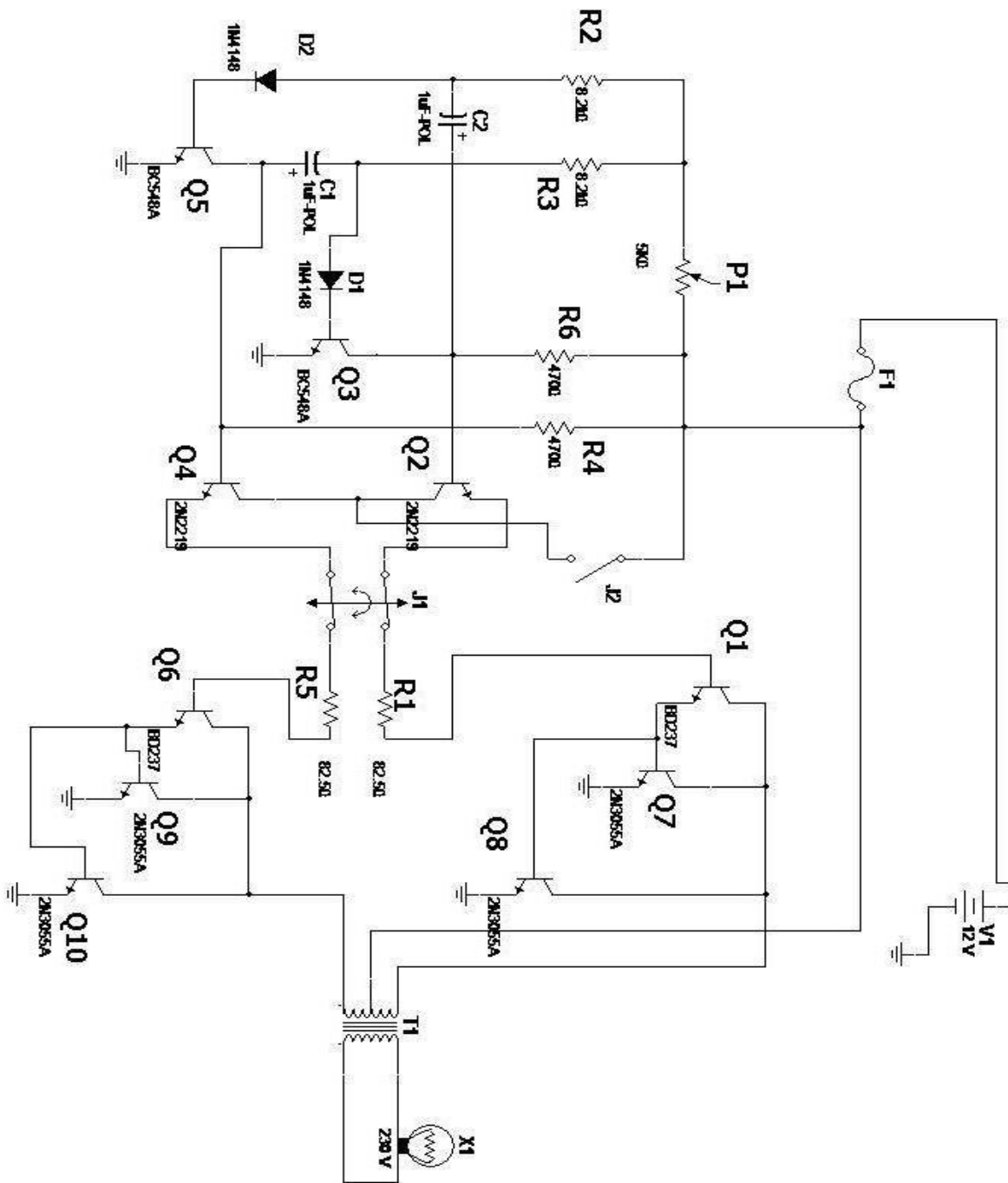
Σχήμα 4.1 Κύκλωμα πολυδονητή

Καθώς τα τρανζίστορ ισχύος ανοιγοκλείνουν εναλλάξ, ισχυρά ρεύματα διέρχονται από τα δύο άκρα του μετασχηματιστή αντίστοιχα (Σχήμα 4.2)



Σχήμα 4.2 Κυκλωματική διάταξη

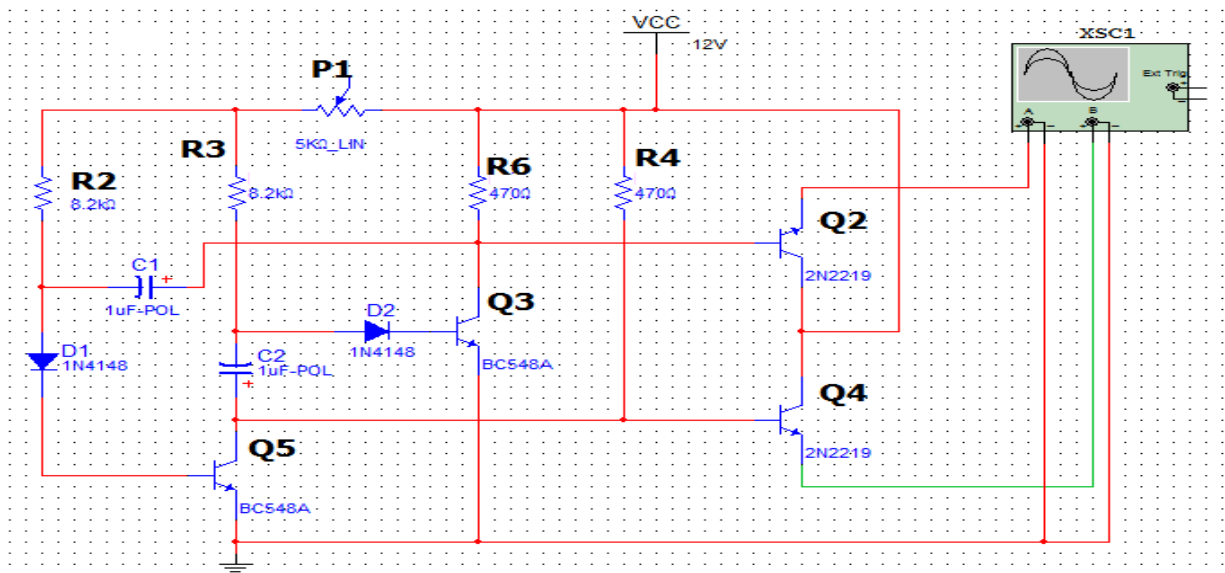
Αυτή η μεταβολή της συνεχής τάσης (DC) στο πρωτεύον του μετασχηματιστή επάγει μία τάση στο δευτερεύον (δημιουργία AC τάσης), όπου ο λόγος τυλίγματος είναι μεγαλύτερος από τον πρωτεύον.



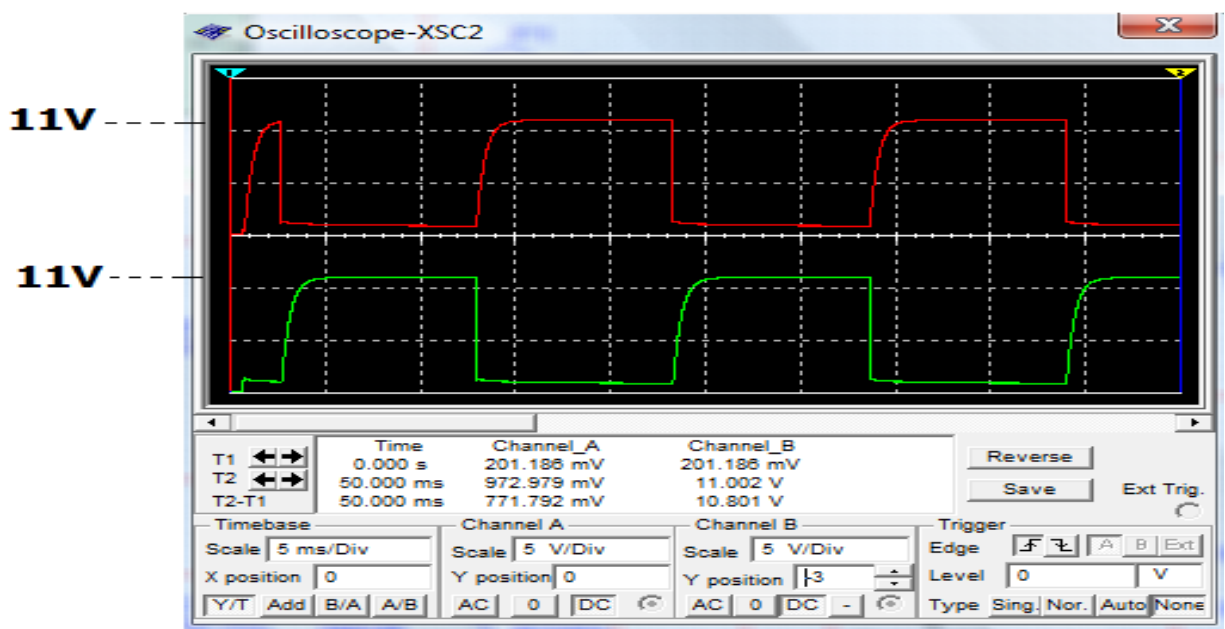
Σχήμα 4.3 Κύκλωμα συνδεσμολογίας (inverter)

4.3 Σχεδίαση κυκλώματος μέσω σχεδιαστικού προγράμματος (multisim)

Το παρακάτω κύκλωμα (Σχήμα 4.4), είναι ένα κύκλωμα πολυδονητή (ένα μέρος του ολικού κυκλώματος) το οποίο το σχεδιάσαμε μέσω του προγράμματος multisim. Στους εξόδους του πολυδονητή παίρνουμε τις κυματομορφές που απεικονίζονται στην εικόνα 4.1 με μέγιστη έξοδο τάσης 12V και περίοδο $T=20\text{ms}$ για κάθε μία αντίστοιχα.

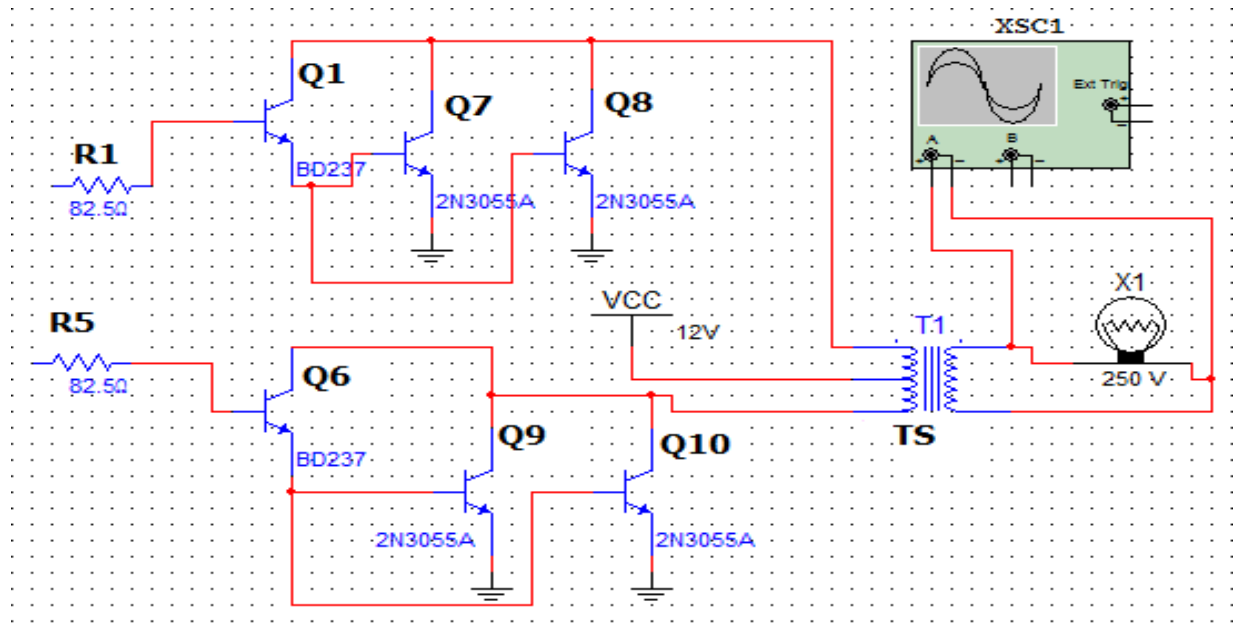


Σχήμα 4.4 Κύκλωμα πολυδονητή μέσω σχεδιαστικού προγράμματος (multisim)

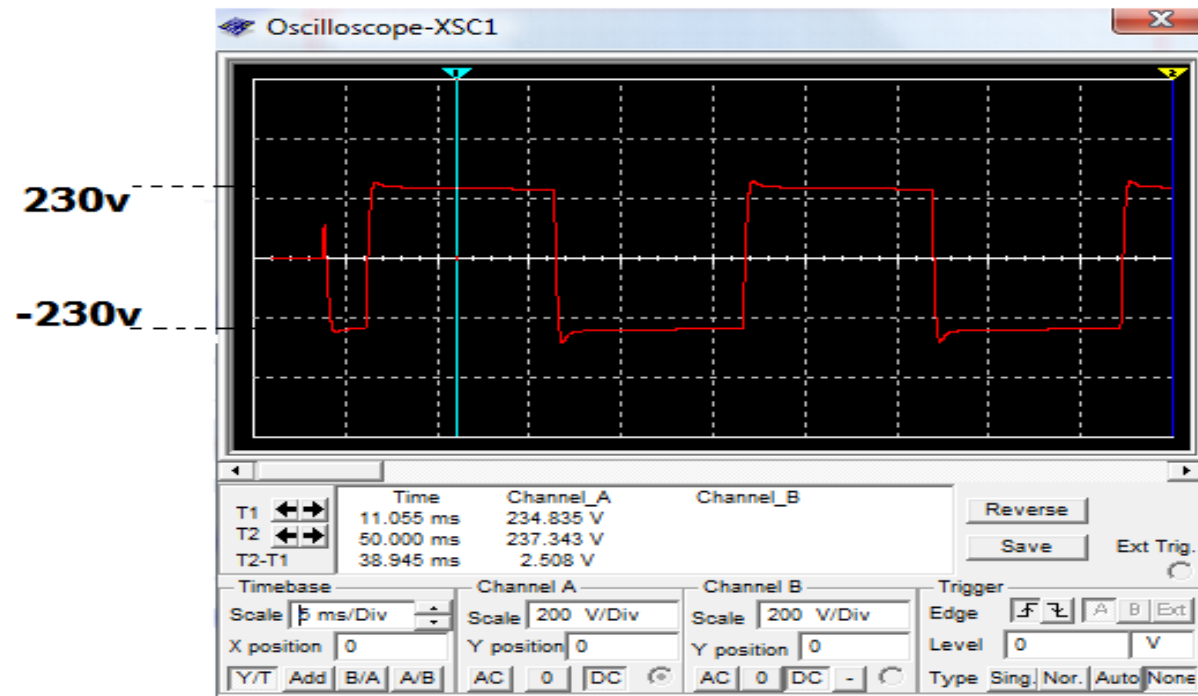


Εικόνα 4.1 Κυματομορφές εξόδων του πολυδονητή

Οι έξοδοι του πολυδονητή συνδέονται στις R1 και R5 αντίστοιχα(Σχήμα 4.5),όπου στο κύκλωμα αυτό γίνεται η ενίσχυση του ρεύματος και η δημιουργία μέσω του μετασχηματιστή της AC τάσης. Στην εικόνα 4.2 απεικονίζεται η έξοδος του inverter μας.



Σχήμα 4.5 Κύκλωμα ενίσχυσης ρεύματος και μετασχηματισμού

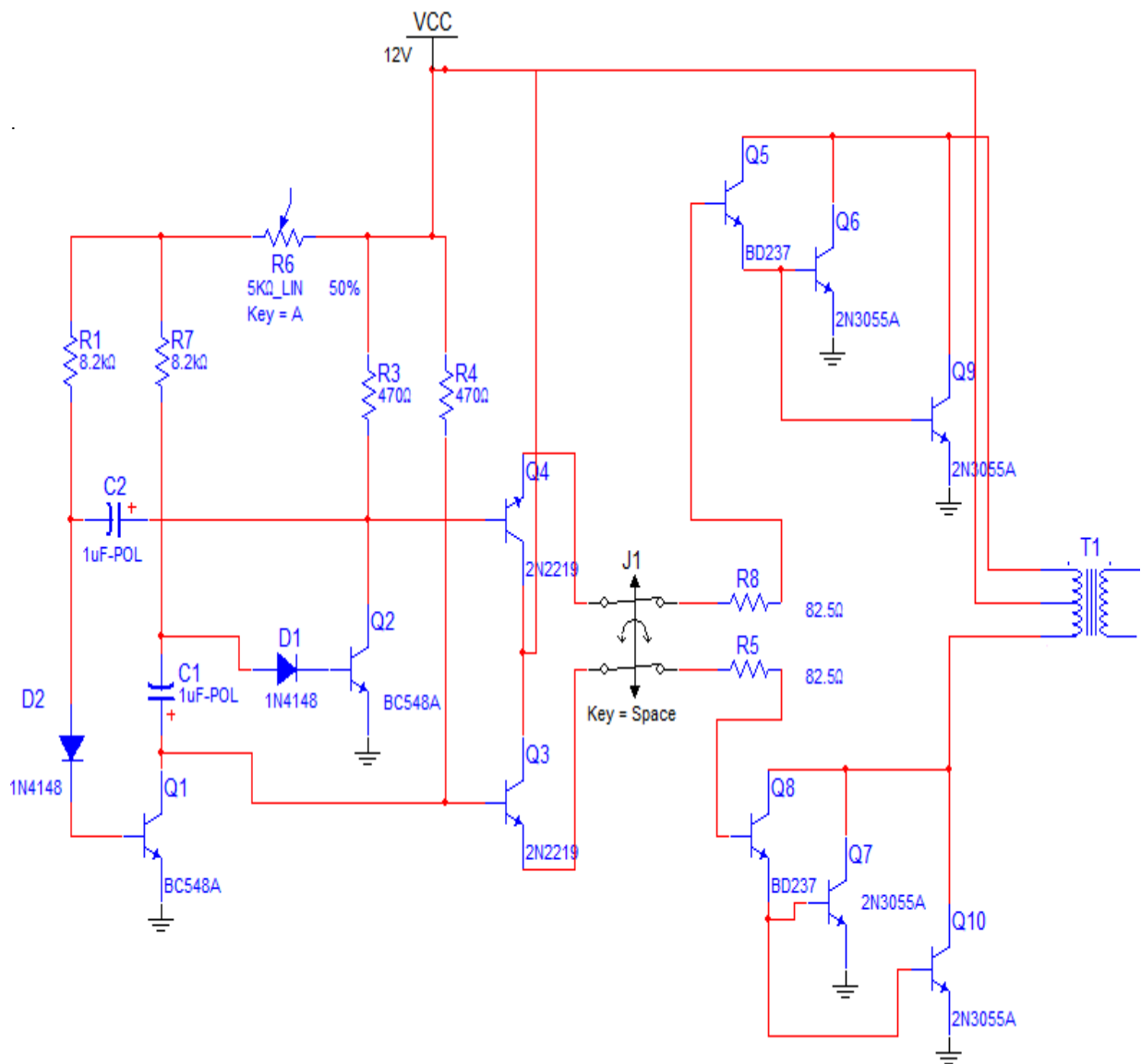


Εικόνα 4.2 Κυματομορφή εξόδου του inverter συνδεδεμένο με 40W ωμικού φορτίου.

4.4 Βήματα κατασκευής του κυκλώματος inverter

1) Αναζήτηση κυκλώματος inverter μέσω διαδικτύου. Σχήμα 4.6

2) Σχεδίαση του υπάρχοντος κυκλώματος μέσω του προγράμματος multisim για επαλήθευση λειτουργίας.



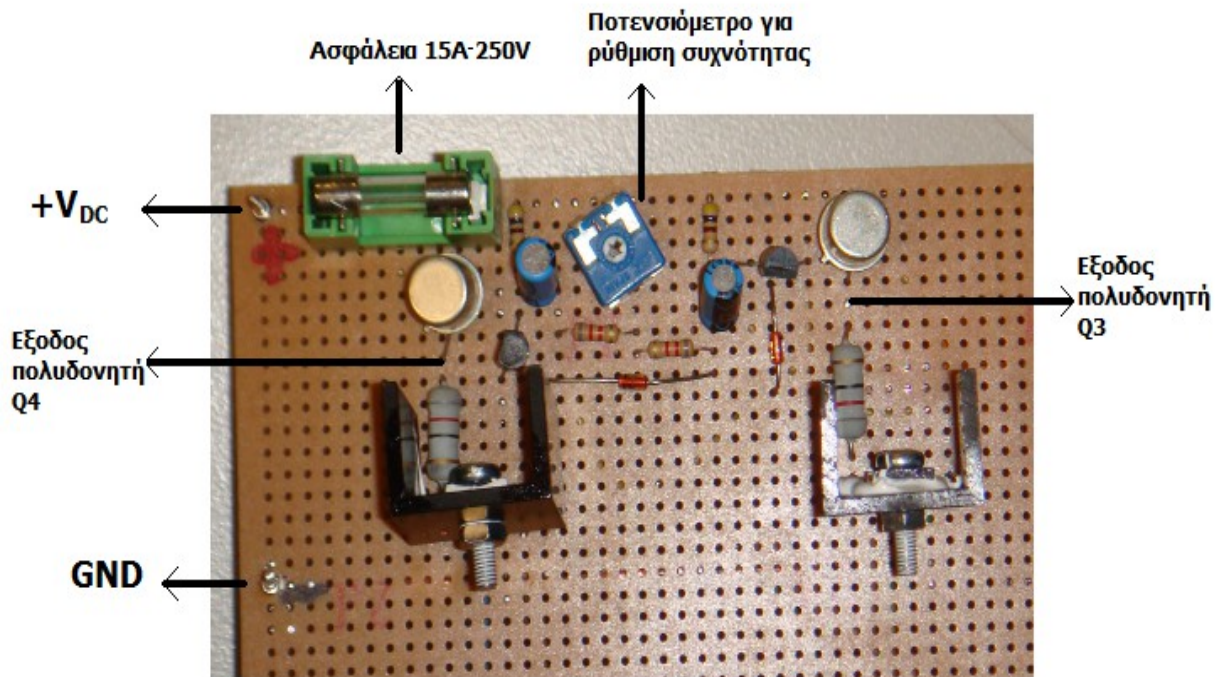
Σχήμα 4.6 Κύκλωμα inverter

3) Αγορά υλικών και εξαρτημάτων για τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος (π.χ ψήκτρα, διακόπτες, κουτί ασφαλείας, ασφάλεια για την προστασία του κυκλώματος, μετασχηματιστής, καλώδια, διάτρητη πλακέτα, θερμοαγώγιμη σιλικόνη, διάφορες βίδες). Σχήμα 4.7

ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ	TRANSISTORS	ΠΥΚΝΩΤΕΣ
R1=82 Ω/1W	Q1=BD 237	C1= 1μF/25V
R2=8,2 ΚΩ	Q2=2N 2219	C1= 1μF/25V
R3=8,2 ΚΩ	Q3=BC 548	
R4=470 Ω	Q4=2N 2219	ΔΙΟΔΟΙ
R5=82 Ω/1W	Q5=BC 548	D1=1N 4148
R6=470 Ω	Q6=BD 237	D2=1N 4148
	Q7=2N3055	Πλακέτα διάτρητη
ΑΣΦΑΛΕΙΑ F1=15A/250V	Q8=2N3055	Δύο μικρές ψήκτρες
	Q9=2N3055	Μια μεγάλη ψήκτρα
	Q10=2N3055	Μετασχηματιστής 230V/ 2x10V – 200VA

Σχήμα 4.7 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του Inverter

4) Τοποθέτηση υλικών στη διάτρητη πλακέτα. Εικόνα 4.3



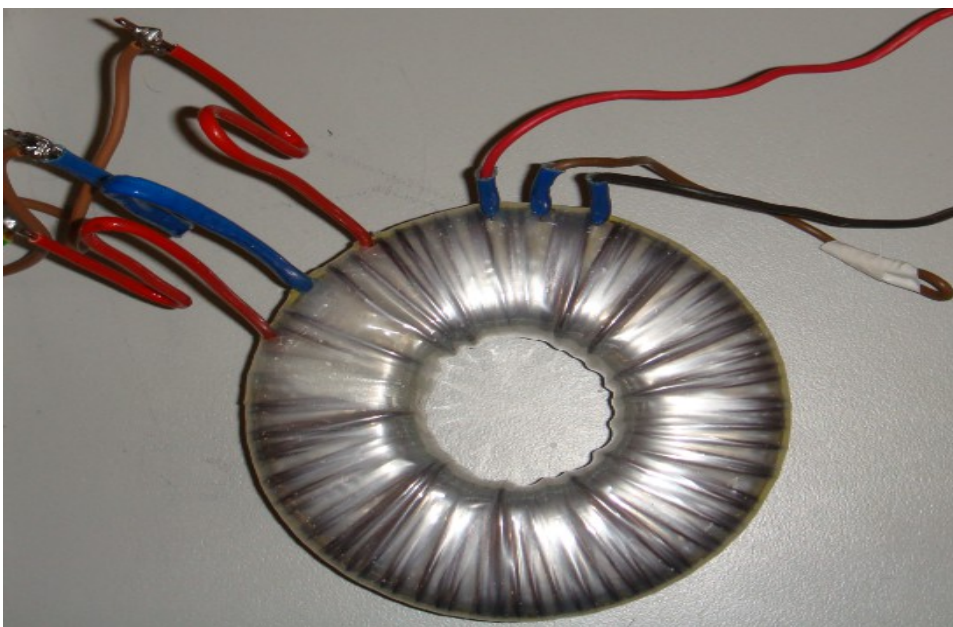
Εικόνα 4.3

5) Σύνδεση των transistors ισχύος με την ψήκτρα. Εικόνα 4.4



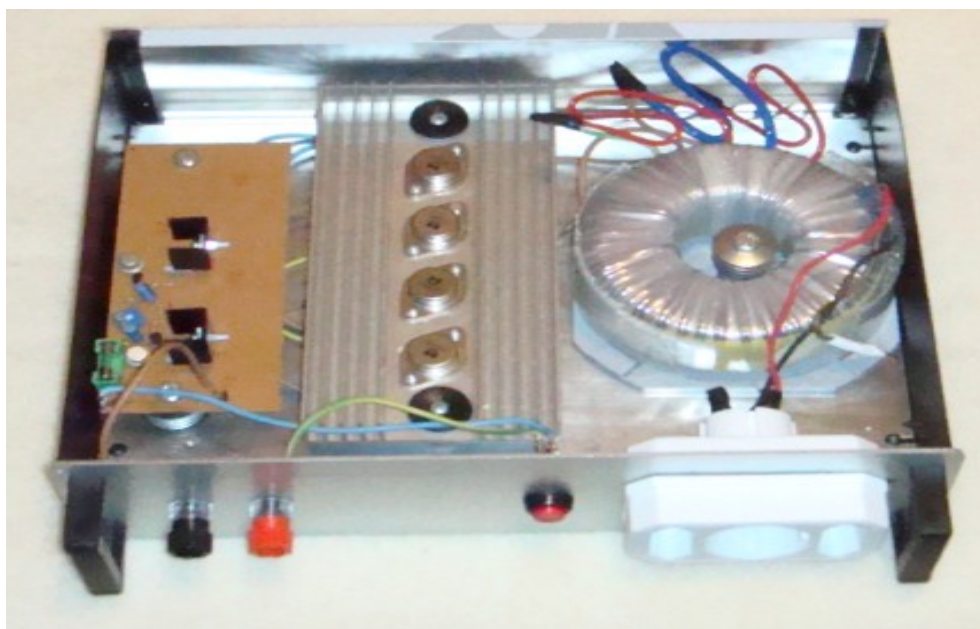
Εικόνα 4.4

6) Αγορά κατάλληλου μετασχηματιστή για το συγκεκριμένο κύκλωμα (Τοροειδής μετασχηματιστής στα 230V/2X10,5V-200VA). Εικόνα 4.5



Εικόνα 4.5

6) Κατασκευή και υλοποίηση μεταλλικού περιβλήματος για την προστασία του κυκλώματος και τοποθέτηση του κυκλώματος μέσα σ'αυτό. Εικόνα 4.6



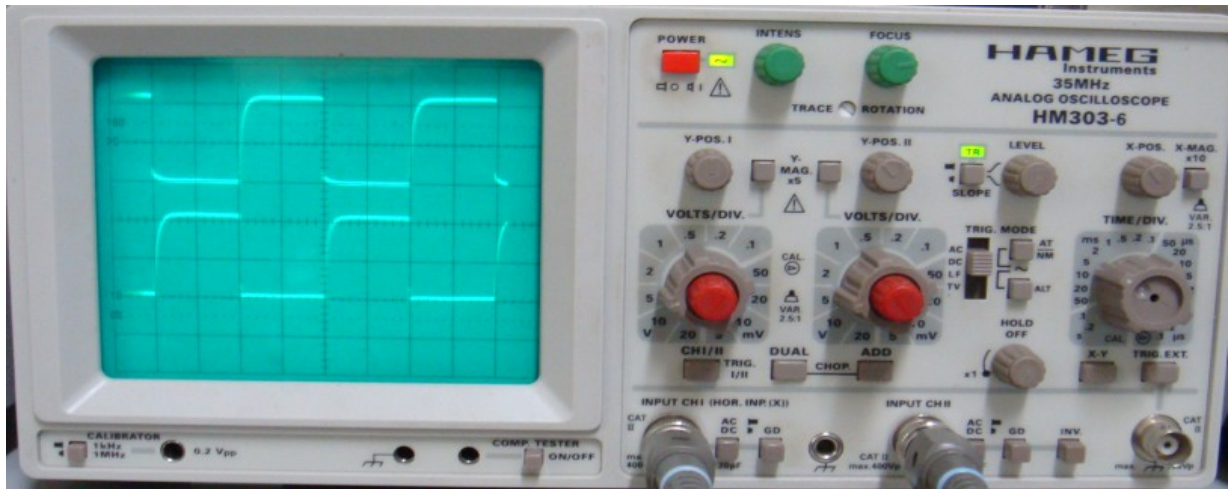
Εικόνα 4.6

4.5 Σύγκριση μετρήσεων (πολυμέτρου με multsim).

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΛΥΜΕΤΡΟΥ							
ΦΟΡΤΙΟ	Vin DC(Volt)	Iin DC(Ampere)	Vout AC (Volt)	Iout AC(Ampere)	Pin (Watt)	Pout (Watt)	n %
χωρίς φορτίο	11.9	0.39	259	-	4.64	-	-
με 25W φορτίο	11.9	2.61	249	0.11	31.06	27.39	88.1
με 40W φορτίο	11.9	3.83	233	0.18	45.58	41.94	92
με 65W φορτίο	11.9	5.77	212	0.29	68.66	61.48	89.5
με 100W φορτίο	11.9	8.4	204	0.42	99.96	85.69	85.7
με 125W φορτίο	11.9	9.76	195	0.51	116.14	99.45	85.6
με 140W φορτίο	11.9	10.7	190	0.56	127.33	106.4	83.5
με 165W φορτίο	11.9	12.05	165	0.65	143.39	107.25	74.7
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟ MULTISIM							
ΦΟΡΤΙΟ	Vin DC(Volt)	Iin DC(Ampere)	Vout AC (Volt)	Iout AC(Ampere)	Pin (Watt)	Pout (Watt)	n %
χωρίς φορτίο	12	0.29	270	-	3.48	-	-
με 25W φορτίο	12	2.58	250	0.11	30.98	27.5	88.7
με 40W φορτίο	12	3.73	241	0.173	44,8	41.69	93.06
με 65W φορτίο	12	5.52	235	0.26	66,24	61.1	92.2
με 100W φορτίο	12	8.12	224	0.39	97.44	87.36	89.6
με 125W φορτίο	12	9.44	218	0.45	113,28	98.1	86.5
με 140W φορτίο	12	10.5	212	0.49	126	103.88	82.44
με 165W φορτίο	12	11.8	203	0.55	141.6	111.65	78.8

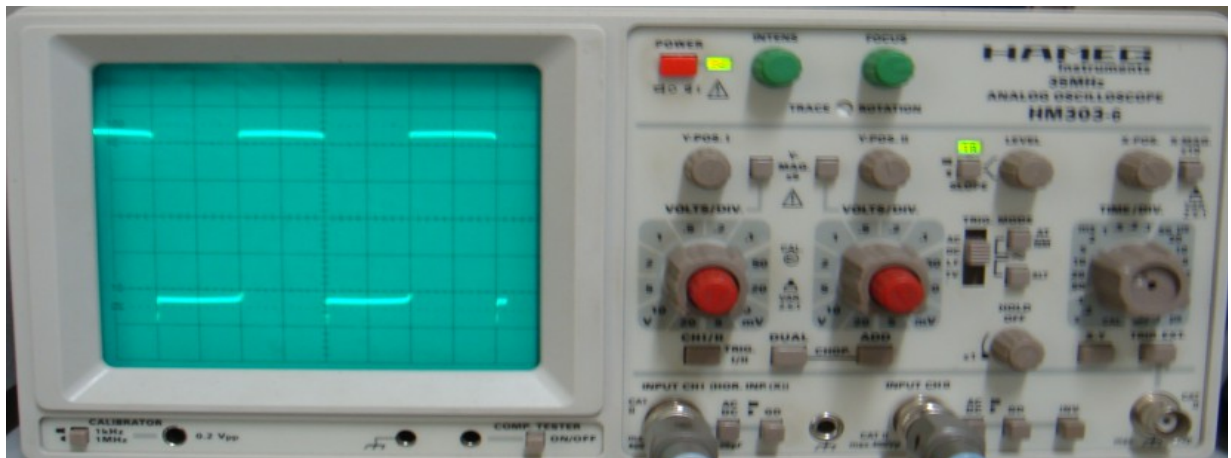
4.6 Κυματομορφές του inverter

Οι κυματομορφές στην εικόνα 4.7 απεικονίζουν τις εξόδους του πολυδονητή του κυκλώματος. Ο παλμογράφος είναι ρυθμισμένος και στα δύο κανάλια (CH1-CH2) 5 Volts/Div και η περίοδος του παλμογράφου είναι ρυθμισμένη στα 5 ms/Div επίσης το probe είναι στη θέση x1.



Εικόνα 4.7

Η κυματομορφή στην εικόνα 4.8 απεικονίζει την έξοδο του inverter. Ο παλμογράφος είναι ρυθμισμένος στο κανάλι 1 (CH1) 10 Volts/Div και η περίοδος του παλμογράφου είναι ρυθμισμένη στα 5 ms/Div επίσης το probe είναι στη θέση x10.



Εικόνα 4.8

4.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά του inverter



Εικόνα 4.9 Μετατροπέας τάσης από 12V DC σε 230V AC

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Από την μελέτη των φωτοβολταϊκών συστημάτων και τη κατασκευή κυκλώματος

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Τάση εισόδου	12V
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	259V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	15A
Ονομαστική ισχύς	180W
Μέγιστη ισχύς	230W
Τάση δικτύου	165-259V
Μέγιστο ρεύμα χωρίς ασφάλεια εισόδου	20A
Συχνότητα	49,5-50,5
Μέγιστος βαθμός απόδοσης	92%
Αυτοκατανάλωση	4,64W
Μέγιστη ισχύς φορτίου για 15 min	180W
Μέγιστη ισχύς φορτίου για 3 min	200W
Μέγιστη ισχύς φορτίου για 5 sec	230W
Κυματομορφή εξόδου	Τετραγωνική Vac
Διαστάσεις πλάτος x βάθος x ύψος	32cm x 25,5cm x 9cm
Βάρος	3.7 kg

inverter συμπεραίνουμε ότι η συλλογή των πληροφοριών του θεωρητικού μέρους ήταν σαφώς ευκολότερη απ'ό,τι η κατασκευή του κυκλώματος. Η εκπόνηση της πτυχιακής ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη για τον εμπλουτισμό των γνώσεων μας σχετικά με το θέμα, καθώς ανακαλύψαμε την χρησιμότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων στην παροχή εναλλακτικής μορφής ενέργειας φιλική προς το περιβάλλον. Αναλυτικότερα, εντύπωση

μας έκανε από το βιβλιογραφικό τμήμα η διάκριση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε κατηγορίες και η διαφορετική αποδοτικότητα τους, χρήσιμο στοιχείο για την επιλογή τους ανάλογα με την ανάγκη του καθενός. Όσο αφορά το κατασκευαστικό μέρος της πτυχιακής μας, συναντήσαμε εμπόδια τα οποία δεν είχαμε προβλέψει με αποτέλεσμα να χάσουμε πολύτιμο χρόνο. Εν κατακλείδι, ήταν μια εποικοδομητική εμπειρία η οποία άξιζε τον χρόνο που διαθέσαμε και τον κόπο που μας προκάλεσε.

Βιβλιογραφία

Βιβλία

- 1) Ιορδάνης Κιοσκερίδης " Ηλεκτρονικά ισχύος " Εκδόσεις Τζιόλα 2008.
- 2) Ι.Ε Φραγκιαδάκης " Φωτοβολταϊκά Συστήματα " Εκδόσεις Ζητη 2004.
- 3) Κ. Καγκαράκης " Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία " Ημιαγωγοί 2 Εκδόσεις Συμμετρία 1987.

4) Σ.Ν Καπλάνης “ Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων ” Εκδόσεις ΙΩΝ 2004

Ιστοσελίδες

1) http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php

2) <http://www.datasheetcatalog.com/>

3) <http://www.wikipedia.gr/>

4) www.hlekronika.gr

5) <http://el.wikipedia.org/wiki/μετασχηματιστης>

6) http://www.tmth.edu.gr/el/kiosks/electricity/technology/elec_metasximatistis.html

7) www.trafothess.gr

8) <http://www.crete-shop.com/index.php?act=viewProd&productId=213>

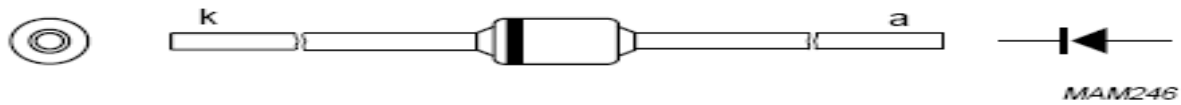
9) www.ecosun.gr

10) <http://www.ortsa.gr/article.php?aid=117>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΦΥΛΛΑΔΙΑ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ

- **1N 4148**



The diodes are type branded.

Fig.1 Simplified outline (SOD27; DO-35) and symbol.

FEATURES

- Hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) package
- High switching speed: max. 4 ns
- General application
- Continuous reverse voltage: max. 100 V
- Repetitive peak reverse voltage: max. 100 V
- Repetitive peak forward current: max. 450 mA.

APPLICATIONS

- High-speed switching.

MARKING

TYPE NUMBER	MARKING CODE
1N4148	1N4148PH or 4148PH

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 60134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{RRM}	repetitive peak reverse voltage		-	100	V
V_R	continuous reverse voltage		-	100	V

I_F	continuous forward current	see Fig.2; note 1	-	200	mA
I_{FRM}	repetitive peak forward current		-	450	mA
I_{FSM}	non-repetitive peak forward current	square wave; $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$; prior to surge; see Fig.4 $t = 1\text{ }\mu\text{s}$ $t = 1\text{ ms}$ $t = 1\text{ s}$	- - -	4 1 0.5	A A A
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$; note 1	-	500	mW
T_{stg}	storage temperature		-65	+200	$^\circ\text{C}$
T_j	junction temperature			200	$^\circ\text{C}$

Note

1. Device mounted on an FR4 printed-circuit board; lead length 10 mm.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_F	forward voltage 1N4148	see Fig.3			
		$I_F = 10\text{ mA}$	-	1	V
		$I_F = 5\text{ mA}$	0.62	0.72	V
		$I_F = 100\text{ mA}$	-	1	V
I_R	reverse current	$V_R = 20\text{ V}$; see Fig.5	-	25	nA
		$V_R = 20\text{ V}$; $T_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$; see Fig.5	-	50	μA
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
C_d	diode capacitance	$f = 1\text{ MHz}$; $V_R = 0\text{ V}$; see Fig.6	-	4	pF
t_{rr}	reverse recovery time	when switched from $I_F = 10\text{ mA}$ to $I_R = 60\text{ mA}$; $R_L = 100\text{ }\Omega$;	-	4	ns

		measured at $I_R = 1$ mA; see Fig.7			
V_{fr}	forward recovery voltage	when switched from $I_F = 50$ mA; $t_r = 20$ ns; see Fig.8	-	2.5	V

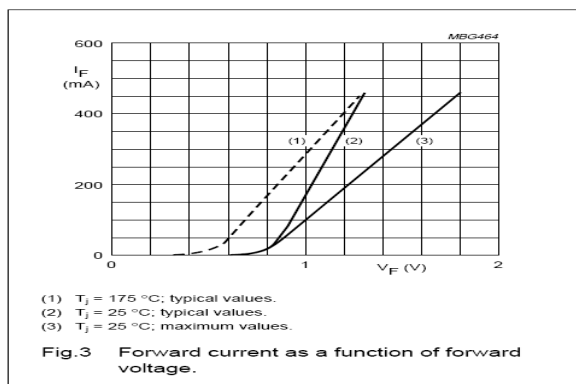
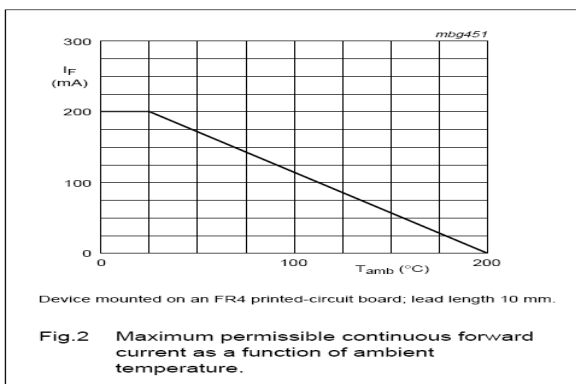
THERMAL CHARACTERISTICS

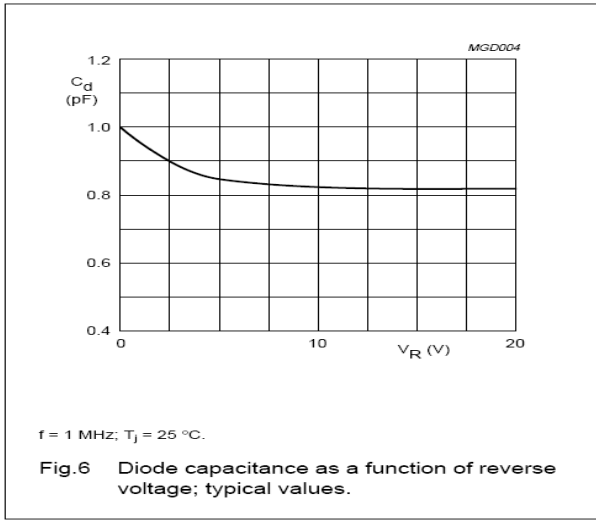
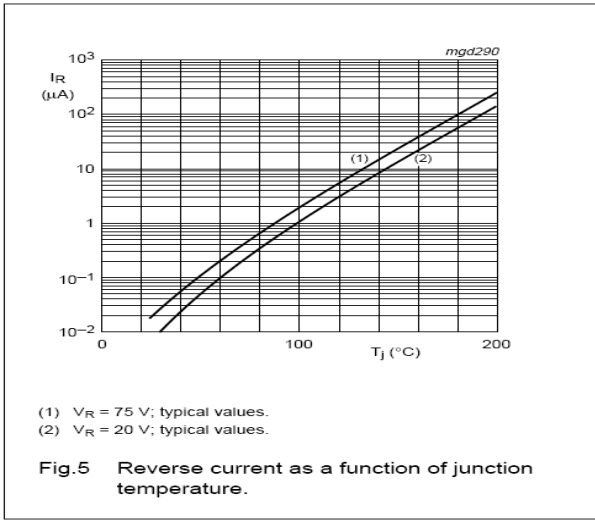
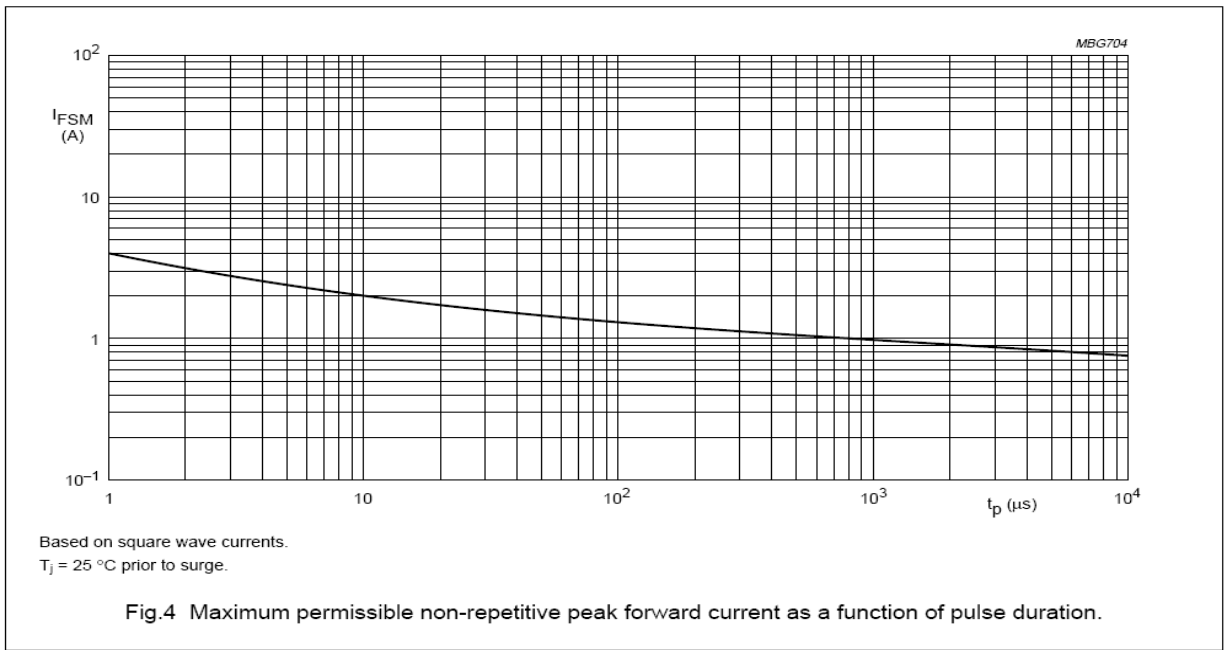
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th(j-tp)}$	thermal resistance from junction to tie-point	lead length 10 mm	240	K/W
$R_{th(j-a)}$	thermal resistance from junction to ambient	lead length 10 mm; note 1	350	K/W

Note

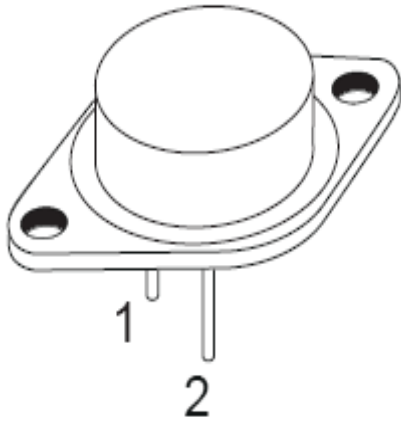
1. Device mounted on a printed-circuit board without metallization pad.

GRAPHICAL DATA



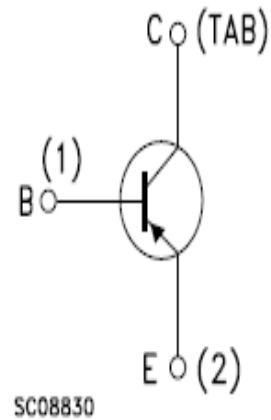
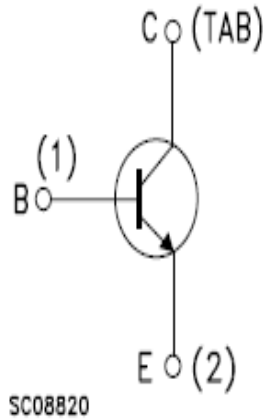


• **2N 3055**



TO-3

INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	NPN	Value 2N3055	Unit
V _{CB0}	Collector-Base Voltage (I _E = 0)		100	V
V _{CER}	Collector-Emitter Voltage (R _{BE} ≤ 100Ω)		70	V
V _{CEO}	Collector-Emitter Voltage (I _B = 0)		60	V
V _{EBO}	Emitter-Base Voltage (I _C = 0)		7	V
I _C	Collector Current		15	A
I _B	Base Current		7	A
P _{tot}	Total Dissipation at T _c ≤ 25 oC		115	W
T _{stg}	Storage Temperature		-65 to 200	°C
T _j	Max. Operating Junction Temperature		200	°C

THERMAL DATA

R _{thj-case}	Thermal Resistance Junction-case Max	1.5	°C /W
-----------------------	--------------------------------------	-----	-------

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_{case} = 25 oC unless otherwise specified)

Symbo	Parameter	Test Conditions	Min.	Max.	Unit
-------	-----------	-----------------	------	------	------

I					
I_{CEX}	Collector Cut-off Current ($V_{BE} = -1.5V$)	$V_{CE} = 100 V$ $V_{CE} = 100 V \quad T_j = 150 \text{ oC}$		1 5	mA mA
I_{CEO}	Collector Cut-off Current ($I_B = 0$)	$V_{CE} = 30 V$		0.7	mA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current ($I_C = 0$)	$V_{EB} = 7 V$		5	mA
$V_{CEO(sus)}$ *	Collector-Emitter Sustaining Voltage ($I_B = 0$)	$I_C = 200 \text{ mA}$	60		V
$V_{CER(sus)}$ *	Collector-Emitter Sustaining Voltage ($R_{BE} = 100 \Omega$)	$I_C = 200 \text{ mA}$	70		V
$V_{CE(sat)}$ *	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 4 \text{ A} \quad I_B = 400 \text{ mA}$ $I_C = 10 \text{ A} \quad I_B = 3.3 \text{ A}$		1 3	V V
V_{BE}^*	Base-Emitter Voltage	$I_C = 4 \text{ A} \quad V_{CE} = 4 \text{ A}$		1.8	V
h_{FE}^*	DC Current Gain	$I_C = 4 \text{ A} \quad V_{CE} = 4 \text{ A}$ $I_C = 10 \text{ A} \quad V_{CE} = 4 \text{ A}$	20 5	70	
f_T	Transition frequency	$I_C = 0.5 \text{ A} \quad V_{CE} = 10$	3		MHz
$I_{S/b}^*$	Second Breakdown Collector Current	$V_{CE} = 40 V$	2.87		A

* Pulsed: Pulse duration = 300 μ s, duty cycle 1.5 %

• BD 237



NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings TC=25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V _{CBO}	Collector-Base Voltage	100	V
V _{CEO}	Collector-Emitter Voltage	80	V
V _{CER}	Collector-Emitter Voltage	100	V
V _{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I _C	Collector Current (DC)	2	A
I _{CP}	*Collector Current (Pulse)	6	A
P _C	Collector Dissipation (T _C =25°C)	25	W
T _J	Junction Temperature	150	°C
T _{STG}	Storage Temperature	-65 to 150	°C

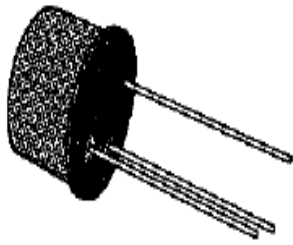
Electrical Characteristics TC=25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
V _{CEO(sus)}	* Collector-Emitter Sustaining Voltage	I _C = 100mA, I _B = 0	80		V
I _{CBO}	Collector Cut-off Current	V _{CB} = 100V, I _E = 0		100	μA
I _{EBO}	Emitter Cut-off Current	V _{EB} = 5V, I _C = 0		1	mA
h _{FE}	* DC Current Gain	V _{CE} = 2V, I _C = 150mA V _{CE} = 2V, I _C = 1A	40 25		
V _{CE(sat)}	* Collector-Emitter Saturation Voltage	I _C = 1A, I _B = 0.1A		0.6	V
V _{BE(on)}	* Base-Emitter ON Voltage	V _{CE} = 2V, I _C = 1A		1.3	V
f _T	Current Gain Bandwidth Product	V _{CE} = 10V, I _C = 250mA	3		MHz

* Pulse Test: PW=300μs, duty Cycle=1.5% Pulsed

• 2N 2219

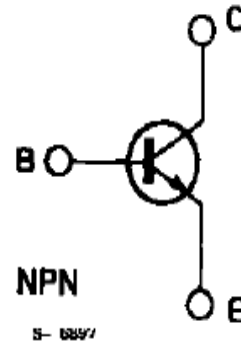
INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



TO-39



TO-18



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CBO}	Collector-base Voltage ($I_E = 0$)	60	V
V_{CEO}	Collector-emitter Voltage ($I_B = 0$)	30	V
V_{EBO}	Emitter-base Voltage ($I_C = 0$)	5	V
I_C	Collector Current	0.8	A
P_{tot}	Total Power Dissipation at $T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$ for 2N2218 and 2N2219	0.8	W
	at $T_{case} \leq 25^\circ\text{C}$ for 2N2218 and 2N2219	3	W
T_{stg}	Storage Temperature	-65 to 200	$^\circ\text{C}$
T_j	Junction Temperature	175	$^\circ\text{C}$

THERMAL DATA

			2N2219	
$R_{th\ j-case}$	Thermal Resistance Junction-case	max	50	$^\circ\text{C/W}$
$R_{th\ j-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	max	187.5	$^\circ\text{C/W}$

• BC 548



NPN General Purpose Amplifier

This device is designed for use as general purpose amplifiers and switches requiring collector currents to 300 mA. Sourced from Process 10. See PN100A for characteristics.

Absolute Maximum Ratings * TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V _{CEO}	Collector-Emitter Voltage	30	V
V _{CES}	Collector-Base Voltage	30	V
V _{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I _C	Collector Current - Continuous	500	mA
T _J , T _{stg}	Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 to 150	°C

*These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

NOTES:

- 1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 150 degrees C.
- 2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

Thermal Characteristics TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Characteristic	Max	Units
P _D	Total Device Dissipation Derate above 25°C	625 5.0	mW mW/°C
R _{θJC}	Thermal Resistance, Junction to Case	83.3	°C/W
R _{θJA}	Thermal Resistance, Junction to Ambient	200	°C/W

Electrical Characteristics TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Max	Units
OFF CHARACTERISTICS					
$V_{(BR)CEO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	$I_C = 10 \text{ mA}, I_B = 0$	30		V
$V_{(BR)CBO}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10 \text{ }\mu\text{A}, I_E = 0$	30		V
$V_{(BR)CES}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10 \text{ }\mu\text{A}, I_E = 0$	30		V
$V_{(BR)EBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$I_E = 10 \text{ }\mu\text{A}, I_C = 0$			
I_{CBO}	Collector Cutoff Current	$V_{CB} = 30 \text{ V}, I_E = 0$ $V_{CB} = 30 \text{ V}, I_E = 0,$ $T_A = +150 \text{ }^\circ\text{C}$		15 5.0	nA μA
ON CHARACTERISTICS					
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 2.0 \text{ mA}$	110	800	V
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 10 \text{ mA}, I_B = 0.5 \text{ mA}$ $I_C = 100 \text{ mA}, I_B = 5.0 \text{ mA}$		0.25 0.60	V
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 2.0 \text{ mA}$ $V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 10 \text{ mA}$	0.58	0.70 0.77	V
SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS					
h_{fe}	Small-Signal Current Gain	$I_C = 2.0 \text{ mA}, V_{CE} = 5.0 \text{ V},$ $f = 1.0 \text{ kHz}$	125	900	
NF	Noise Figure	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 200 \text{ }\mu\text{A},$ $R_S = 2.0 \text{ k}\Omega, f = 1.0 \text{ kHz},$ $B_W = 200 \text{ Hz}$		10	dB