

Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΙΤΛΟΣ: 1058

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΘΟΔΟΙ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:ΙΩΑΝΝΗΣ ΔΗΜΑΚΗΣ-ΣΤΑΜΑΤΗΣ ΚΙΑΜΕΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:ΗΛΙΑΣ ΣΤΑΘΑΤΟΣ

Πάτρα 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1

1 Τι είναι Photovoltaics;	7
1.1 Τι είναι Photovoltaics;	7
1.2 Σύντομη ιστορία Photovoltaics.....	9
1.2.1 Τεχνολογία.....	9
1.2.2 Εφαρμογές.....	13
1.3 Σχετικότητα του PV, τώρα και στο μέλλον.....	15
1.4 Αγορές, οικονομικά.....	19

Κεφάλαιο 2

2 Φυσική των ηλιακών κυττάρων.....	22
2.1 Βασικοί μηχανισμοί της ενεργειακής μετατροπής.	22
2.2 Το ηλιακό κύτταρο πυριτίου.....	33

Κεφάλαιο 3

3 Υλικό και τεχνολογία των ηλιακών κυττάρων πυριτίου.....	39
3.1 Πυρίτιο υλικά.....	39
3.2 Monocrystalline και πυρίτιο Multicrystalline.....	39
3.2.1 Τεχνολογία Czochralski και πυρίτιο ζώνης επιπλεόντων σωμάτων.....	39

3.3 Πυρίτιο RIBBON.....	46
-------------------------	----

Κεφάλαιο 4

4 Ηλιακά κύτταρα και ηλιακές ενότητες.....	47
4.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες και χαρακτηριστικά των ηλιακών κυττάρων.....	47
4.1.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες των ηλιακών κυττάρων.....	47
4.1.2 Χαρακτηριστικά των ηλιακών κυττάρων.	49
4.2 Τεχνολογίες ενότητας.....	56

Κεφάλαιο 5

5 Συστήματα PV.....	61
5.1 Αυτόνομα συστήματα PV.....	62
5.1.1 Καταναλωτικές εφαρμογές.....	63
5.1.2 Ηλιακά εγχώρια συστήματα.....	65
5.1.3 Κατοικημένα συστήματα.....	70
5.1.4 Υβριδικά συστήματα.....	73
5.1.5 Φωτοβολταϊκό νερό που αντλείται.....	77
5.2 Grid-Connected συστήματα PV.....	80
5.2.1 Αποκεντρωμένα Grid-Connected συστήματα PV.....	81
5.2.2 Κεντρικά Grid-Connected συστήματα PV.....	82

5.2.3 Αναστροφείας.....	83
-------------------------	----

Κεφάλαιο 6

6 Περιβαλλοντικές επιδράσεις από τα συστήματα PV.....	87
6.1 Περιβαλλοντικές επιδράσεις λόγω της κατασκευής από τα συστήματα PV.....	87
6.2 Περιβαλλοντικές επιδράσεις από τη λειτουργία των συστημάτων PV....	88
6.3 Χρόνος ενεργειακής επιστροφής.	89
6.4 Περιοχή γης που απαιτείται από τα συστήματα PV.....	91
6.5 Ανακύκλωση των συστημάτων PV.....	92
6.5.1 Ανακύκλωση των κρυστάλλινων ενοτήτων πυριτίου PV.....	93
6.5.2 Ανακύκλωση των άμορφων ενοτήτων πυριτίου PV	99
6.5.3 Ανακύκλωση του σύνθετου ημιαγωγού Λεπτές ενότητες PV.....	100
6.5.4 Ζήτηση ενέργειας για την ανακύκλωση των ενοτήτων PV	100

Κεφάλαιο 7

7 Οι αγορές PV υποστηρίζουν τα μέτρα και τις δαπάνες.....	101
7.1 Όροι για τη μελλοντική ανάπτυξη από Photovoltaics.....	101
7.1.1 Κόστος την ανάπτυξη της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας..	101
7.1.2 Αποτελέσματα της φιλελευθεροποίησης και περιβαλλοντικοί περιορισμοί.....	102

7.2 Κοστισμένη και ανάπτυξη αγοράς αυτόνομου και Grid-Connected συστήματα.....	102
7.3 PV στο μέλλον που φιλελευθεροποιείται και εν μέρει αποκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα.....	104
7.3.1 Ένταξη του PV σε ένα αποκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα.....	105
7.3.2 Πλήρως αυτόνομα συστήματα, Αυτόνομες έννοιες σπιτιών.....	106
7.4 PV σε ένα συγκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα.	107
7.4.1 Ηλεκτρική ενέργεια από την έρημο.....	107
7.4.2 Ηλεκτρική ενέργεια από το διάστημα.....	109

Κεφάλαιο 8

8 Δημοφιλή φονικά επιχειρήματα ενάντια στο PV και γιατί είναι άκυροι.....	111
8.1 Οι ηλιακές ενότητες καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια για την παραγωγή τους από παράγουν πάντα.....	111
8.2 Το PV παράγει περισσότερα αέρια θερμοκηπίων απ'ότι να τα αποτρέψει.....	112
8.3 Το Grid-Connected PV απαιτεί τα μέρη από τις συνοδευτικές απολιθωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.....	112
8.4 Το PV είναι πάρα πολύ ακριβό.....	113
8.5 PV δεν είναι έτοιμο για το μάρκετινγκ, περισσότερη έρευνα απαιτείται.....	114

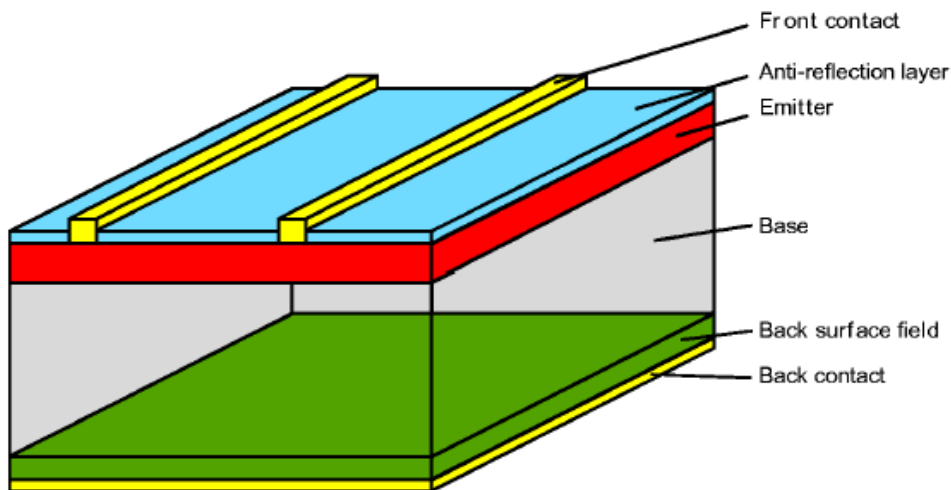
- 8.6 Η εγκατάσταση του PV στο βόρειο μισό της Ευρώπης Να μην έχουν νόημα επειδή τα ίδια ηλιακά κύτταρα παράγουν Ηλεκτρική ενέργεια πολύ φτηνότερη στο νότο.....115
- 8.7 Το PV περιλαμβάνει τα τοξικά υλικά.....115
- 8.8 PV καταναλώνει την πολύτιμη περιοχή γης.....116
- 8.9 Το PV ανταγωνίζεται για το διάστημα στεγών με τους θερμικούς συλλέκτες....117
- 8.10 Ένα δασμολόγιο τροφοδότησης προκαλεί απαράδεκτα υψηλό Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.....118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

1). ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

1.1 Τί είναι τα φωτοβολταϊκά.

Το φωτοβολταϊκο (βραχυκυκλωμένο PV) είναι ο αμεσότερος τρόπος να μετατραπεί η ηλιακή ακτινοβολία στην ηλεκτρική ενέργεια και είναι βασισμένο στη φωτοβολταϊκή επίδραση, η οποία παρατηρήθηκε αρχικά από το Henri Becquerel το 1839. Γενικότερα, ορίζεται ως η εμφάνιση μιας ηλεκτρικής τάσης μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που συνδέονται με ένα στερεό ή υγρό σύστημα επάνω στο οποίο διοχετεύονται οι ακτίνες του φωτός. Σχεδόν όλες οι φωτοβολταϊκές συσκευές ενσωματώνουν μια σύνδεση PN σε έναν ημιαγωγό πέρα από τον οποίο τα φωτοβολταϊκά αναπτύσσονται. Αυτές οι συσκευές είναι επίσης γνωστές ως ηλιακά κύτταρα. Η ελαφριά απορρόφηση εμφανίζεται σε ένα υλικό ημιαγωγών, το οποίο, πρέπει να είναι σε θέση να απορροφήσει ένα μεγάλο μέρος του ηλιακού φάσματος. Εξαρτώμενο από τις ιδιότητες απορρόφησης του υλικού, το φως απορροφάται σε μια περιοχή λιγότερο ή περισσότερο κοντά στην επιφάνεια. Όταν τα ελαφριά κβάντα απορροφώνται, τα ζευγάρια ηλεκτρονίων παράγονται, και εάν ο επανασυνδυασμός τους αποτρέπεται, μπορούν να φθάσουν στη σύνδεση όπου χωρίζονται από ένα ηλεκτρικό πεδίο. Ακόμη και για έναν αδύναμο απορροφητικό ημιαγωγό όπως το πυρίτιο, οι περισσότεροι μεταφορείς παράγονται κοντά στην επιφάνεια. Αυτό οδηγεί στη χαρακτηριστική δομή ηλιακών κυττάρων του σχεδίου 1.1.



Σχέδιο 1.1. χαρακτηριστική δομή ηλιακών κυττάρων

Η σύνδεση PN που χωρίζει το στρώμα εκπομπών και βάσεων είναι πολύ στενή στην επιφάνεια προκειμένου να υπάρξει η υψηλή συλλογή για τους μεταφορείς δαπανών. Το λεπτό στρώμα εκπομπών επάνω από τη σύνδεση έχει μία σχετικά υψηλή αντίσταση που απαιτεί ένα καλά σχεδιασμένο πλέγμα επαφών, που παρουσιάζεται επίσης στο σχήμα. Για την πρακτική χρήση τα ηλιακά κύτταρα συσκευάζονται στις ενότητες που περιέχουν διάφορα κρυστάλλινα κύτταρα Si που συνδέονται σωρηδόν ή ένα στρώμα του λεπτού υλικού που είναι επίσης συνδεδεμένο εσωτερικά σε σειρά. Η ενότητα εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Προστατεύει τα ηλιακά κύτταρα και αυτό αποδίδει μια υψηλότερη τάση από ένα μονό κύτταρο, το οποίο αναπτύσσει τάση λιγότερη από 1 Volt. Οι αποδοτικότητες μετατροπής των σημερινών κυττάρων παραγωγής κυμαίνονται σε ποσοστό 13% ως 16%, αλλά οι αποδοτικότητες ενότητας είναι σχετικά χαμηλότερες. Η καλύτερη εργαστηριακή αποδοτικότητα του κρυστάλλινου πυριτίου πραγματοποιημένη μέχρι τώρα είναι 24.7%, το οποίο πλησιάζει το θεωρητικό όριο αυτού του τύπου ηλιακού κυττάρου. Δεδομένου ότι θα το δούμε στο κεφ. 5, οι συνδέσεις και οι ημιαγωγοί PN δεν είναι ο μοναδικός τρόπος να επιτευχθεί η φωτοβολταϊκή μετατροπή. Το μέλλον μπορεί να προσφέρει πολλά νέα θέματα και καινούριες έννοιες ή θεωρίες .

1.2 Σύντομη ιστορία των φωτοβολταϊκών

1.2.1 Τεχνολογία

Η φωτοβολταϊκή επίδραση παρέμεινε μια εργαστηριακή περιέργεια από 1839 έως το 1959, όταν το πρώτο ηλιακό κύτταρο πυριτίου αναπτύχθηκε στα εργαστήρια Bell το 1954 από τον Charin και λοιπούς. Είχε ήδη μια αποδοτικότητα 6%, η οποία γρήγορα αυξανόταν σε 10%. Η κύρια εφαρμογή για πολλά έτη ήταν η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στα διαστημικά οχήματα. Η επίγεια εφαρμογή των φωτοβολταϊκών (PV) αναπτύχθηκε πολύ αργά. Εντούτοις, το PV συνάρπασε όχι μόνο τους ερευνητές, αλλά και το ευρύ κοινό. Τα ισχυρά σημεία του είναι:

α) Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ηλεκτρική ενέργεια.

β) Δεν έχει κανένα μηχανικό κινούμενο μέρος, επομένως δεν έχει και κανένα θόρυβο.

γ) Δεν έχει υψηλή θερμοκρασία.

δ) Φιλικό προς το περιβάλλον διότι δεν ρυπαίνει.

ε) Οι ενότητες PV από τις οποίες αποτελείται έχουν μακροχρόνια διάρκεια ζωής.

ζ) Η πηγή ενέργειας δηλαδή ο ήλιος, είναι ελεύθερη, πανταχού παρούσα, και ανεξάντλητη.

η) Το PV είναι μια πολύ εύκαμπτη πηγή ενέργειας, η δύναμή του οποίου κυμαίνεται από microwatts ως megawatts.

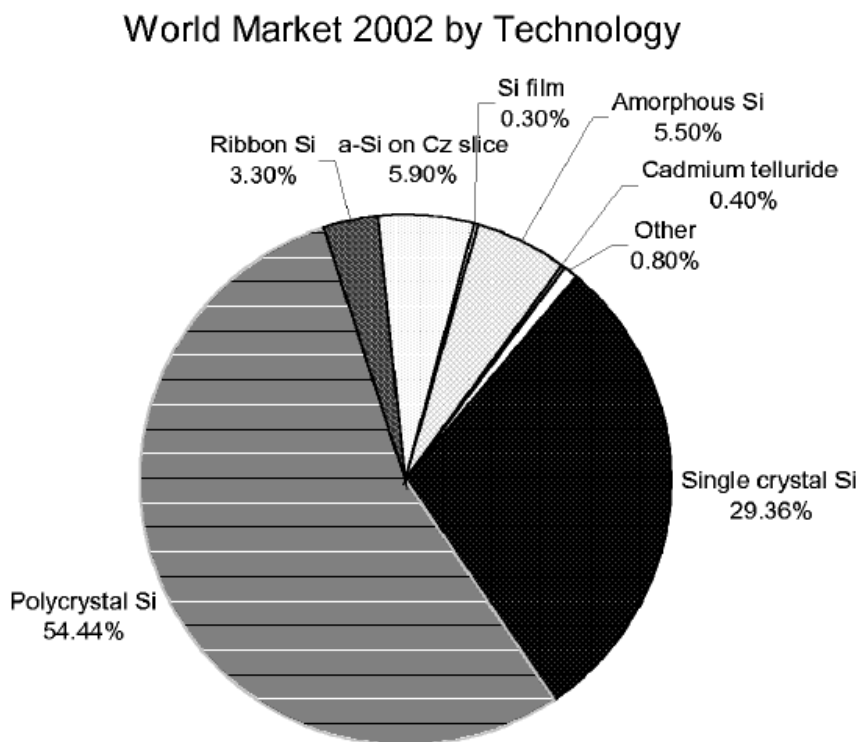
Η τεχνολογία ηλιακών κυττάρων ωφελήθηκε πολύ από το υψηλό πρότυπο του πυριτίου που αναπτύχθηκε αρχικά για τις κρυσταλλολυχνίες και αργότερα για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αυτό ίσχυσε επίσης για την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα του ενιαίου κρυστάλλου πυριτίου υψηλής τελειότητας. Στα πρώτα έτη, μόνο (CZ) αυξημένα ενιαία κρύσταλλα Czochralski χρησιμοποιήθηκαν για τα ηλιακά κύτταρα. Αυτό το υλικό διαδραματίζει ακόμα έναν σημαντικό ρόλο. Δεδομένου ότι το πυρίτιο το οποίο είναι σημαντικό στην κατασκευή ενός ηλιακού κυττάρου έχει υψηλό κόστος, γίνονται συνεχώς προσπάθειες, για την εύρεση τρόπου να μειωθούν αυτές οι δαπάνες. Μια τεχνολογία, που χρονολογείται από τη δεκαετία του '70, είναι η ρίψη φραγμών που αποφεύγει τη δαπανηρή διαδικασία τραβήγματος. Το πυρίτιο λειώνει και

χύνεται σε ένα τετραγωνικό SiO/SiN ντυμένη από μία χοάνη γραφίτη .Η ελεγχόμενη ψύξη παράγει έναν πολυκρυσταλλικό φραγμό πυριτίου με μια μεγάλη δομή σιταριού κρυστάλλου. Από τη φυσική ξέρουμε ότι το πυρίτιο στην στέρεα κατάσταση του δεν είναι το ιδανικό υλικό για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή. Είναι ένα υλικό με σχετικά χαμηλή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, και, επομένως, ένα παχύ στρώμα του πυριτίου απαιτείται για την αποδοτική απορρόφηση. Θεωρητικά, αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τη ζώνη ημιαγωγών ,στη δομή του πυριτίου στην οποία το μέγιστο ζωνών σθένους αντισταθμίζεται από το ελάχιστο ζωνών διεξαγωγής .Από τη βασική διαδικασία του φωτός η απορρόφηση είναι η διέγερση ενός ηλεκτρονίου από το σθένος στη ζώνη διεξαγωγής, κατά την οποία η ελαφριά απορρόφηση εμποδίζεται επειδή απαιτεί μια αλλαγή της ορμής.Η αναζήτηση ενός καταλληλότερου υλικού άρχισε σχεδόν με την αρχή της τεχνολογίας των ηλιακών κυττάρων. Αυτή η αναζήτηση επικεντρώθηκε στα λεπτά υλικά. Χαρακτηρίζονται από μια άμεση δομή ζωνών, η οποία τους δίνει πολύ ισχυρή ελαφριά απορρόφηση .Ακόμα και σήμερα ο στόχος παραμένει αόριστος, αν και υποσχέσεις αρχίζουν να προκύπτουν με τις σημερινές εφαρμογές και την ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Το πρώτο υλικό που εμφανίστηκε ήταν το άμορφο Πυρίτιο (α -Si). Είναι αξιοπρόσεκτο ότι ακόμη και το δεύτερο συστατικό σε αυτόν τον τομέα είναι βασισμένο σε στοιχεία του πυριτίου, αυτή τη φορά όμως στην άμορφη μορφή του. Το άμορφο πυρίτιο έχει τις ιδιότητες του πλήρως διαφορετικές από το κρυστάλλινο πυρίτιο. Εντούτοις, πήρε αρκετό χρονικό διάστημα προτού να γίνουν κατανοητές οι βασικές ιδιότητες του υλικού. Η υψηλή προσδοκία σε αυτό το υλικό συγκρατήθηκε από τη σχετικά χαμηλή αποδοτικότητα που λαμβάνεται μέχρι τώρα και από την αρχική υποβάθμιση λόγω φωτός για αυτό το είδος ηλιακού κυττάρου (αποκαλούμενη επίδραση staebler-Wronski).Σήμερα, το α -Si έχει σταθερή θέση στις καταναλωτικές εφαρμογές, κυρίως για εσωτερική χρήση. Κατόπιν καταλαβαίνοντας και λύνοντας εν μέρει τα προβλήματα της παραπάνω υποβάθμισης, το άμορφο πυρίτιο αρχίζει να μπαίνει στην αγορά ενέργειας .Η σταθεροποιημένη προσιτότητα αγγίζει το 13% των αποδοτικότητων κυττάρων. Οι αποδοτικότητες ενότητας φθάνουν έναν ρυθμό 6-8%. Η οπτική εμφάνιση των λεπτών ενοτήτων τις καθιστά ελκυστικές για τις εφαρμογές προσόψεων. Πέρα από το άμορφο πυρίτιο

υπάρχουν πολλά άλλα πιθανά υλικά ηλιακών κυττάρων που ικανοποιούν την απαίτηση της υψηλής ελαφριάς απορρόφησης και είναι επομένως κατάλληλα για τα λεπτά ηλιακά κύτταρα, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία σύνθετων ημιαγωγών όπως GaAs ή InP, οι οποίοι είναι III-V ενώσεις σύμφωνα με τη θέση τους

στον περιοδικό πίνακα. Άλλες σημαντικές ομάδες είναι II-VI και I-III VI² ενώσεις, οι οποίες, ακριβώς όπως και οι στοιχειώδεις ημιαγωγοί, έχουν τέσσερις δεσμούς ανά άτομο. Είναι σαφές ότι ένας σχεδόν άπειρος αριθμός ενώσεων θα μπορούσε να εξετάζεται. Από τη συνήθως εμπειρική αναζήτηση μόνο πολύ λίγα υποσχόμενα υλικά είναι αποτελεσματικά. Πρώτιστο είναι το ίδιο δισεληνιομένο χαλκού (CIS) και το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe). Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '60 τα ηλιακά κύτταρα σουλφιδίου καδμίου και σουλφιδίου χαλκού ήταν υπό ανάπτυξη. Τα προβλήματα με τη χαμηλή αποδοτικότητα και την ανεπαρκή σταθερότητα απέτρεψαν την περαιτέρω διεύρυνση αυτού του υλικού.



Σχέδιο 1.2. Μετοχές αγοράς των διαφορετικών τεχνολογιών για το 2002

Η νέα τεχνολογία είναι βασισμένη στους τριαδικούς σύνθετους ημιαγωγούς CuInSe_2 , CuGaSe_2 , CuInS_2 και κραμάτων τους (Ga) (S , SE)₂ (στη συνέχεια θα το αποκαλούμε: CIGS). Τα πρώτα αποτελέσματα του ενιαίου κρυστάλλου λειτουργούν σε CuInSe_2 (CIS) και ήταν εξαιρετικά ελπιδοφόρα, αλλά η πολυπλοκότητα του υλικού φάνταζε περίπλοκη ως λεπτή τεχνολογία. Την πρωτοποριακή εργασία, εντούτοις, που παρουσίασε άμεση επιτυχία. Έγινε εμφανές ότι η τεχνολογική διαδικασία της CIS είναι πολύ εύκαμπτη όσον αφορά τους όρους διαδικασίας. Μεταγενέστερα, η προσθήκη του Ga και το S βοήθησαν να αυξηθεί η αποδοτικότητα. Η καλύτερη εργαστηριακή αποδοτικότητα έχει φθάσει πρόσφατα σε ένα αξιοπρόσεκτο 18.9%. CIS/CIGS ενότητες είναι τώρα διαθέσιμες στην αγορά σε μικρές ποσότητες.

Τα λεπτά ηλιακά κύτταρα που έχουν σαν βάση το CdTe έχουν μακροχρόνια παράδοση και είναι επίσης ακριβώς στην αρχή της εμπορικής παραγωγής. Μετά από μία μακρά και ποικίλη φάση ανάπτυξης, έφθασαν στις αποδοτικότητες κυττάρων 16% και την αποδοτικότητα ενότητας μεγάλων περιοχών πάνω από 10%.

Παρά την περίπλοκη κατασκευή και το υψηλό κόστος, το κρυστάλλινο πυρίτιο κυριαρχεί ακόμη την αγορά και πιθανώς θα συνεχίσει να κάνει έτσι στο άμεσο μέλλον. Αυτό οφείλεται συνήθως στο γεγονός ότι υπάρχει άφθονος ανεφοδιασμός του πυριτίου δεδομένου ότι είναι η πρώτη ύλη, με υψηλές αποδοτικότητες, και τον οικολογικό αντίκτυπο να παραμένει χαμηλός, και το πυρίτιο με κρυστάλλινη μορφή να μην έχει σχεδόν καμία υποβάθμιση. Οι μετοχές αγοράς των διαφορετικών τεχνολογιών το 2002 παρουσιάζονται στο σχέδιο 1.2.

Οι διάφορες μορφές κρυστάλλινου πυριτίου έχουν συνολικά ένα μερίδιο της τάξεως του 93%. Το ενιαίο κρύσταλλο και το χυτό πολυεστερικό υλικό κατείχαν περίπου ίσα μερίδια. Πρόσφατα, το χυτό υλικό έχει ξεπεράσει τα ενιαία κρύσταλλα. Νεότεροι τύποι κρυστάλλινου πυριτίου όπως το Ribbon και η ταινία Si δεν είναι ακόμα πολύ σημαντικά. Ένας νεωτερισμός είναι το α-Si στο κρυστάλλινο πυρίτιο. Από τα αληθινά λεπτά υλικά τα οποία συνοπτικά αναφέρουμε ως τα «άλλα», το άμορφο πυρίτιο είναι κυρίαρχο. Όπως αναφέρεται πριν, η αγορά του είναι κυρίως στα καταναλωτικά προϊόντα. Αυτές οι μετοχές αγοράς είναι μάλλον σταθερές και θα αλλάξουν μόνο κατά τρόπο

εξελικτικό. Η κυριαρχία του στοιχείου του πυριτίου με τις κρυστάλλινες και άμορφες μορφές του, κατέχει ένα συντριπτικό ποσοστό της τάξης του 99%. Από όλα τα άλλα υλικά μόνο το CdTe έχει ένα μερίδιο αγοράς ύψους 0.4%.

1.2.2 Εφαρμογές

Η ανάγκη παραγωγής ενέργειας για τα διαστημικά οχήματα παρείχε ένα άριστο σημείο εισόδου για τα ηλιακά κύτταρα που άρχισε προς το τέλος της δεκαετίας του '50. Τα ηλιακά κύτταρα μπορούν να εργαστούν με αξιοπιστία και χωρίς συντήρηση για μεγάλες περιόδους. Αυτό παρείχε μια ευκαιρία για περαιτέρω ανάπτυξη. Η αποδοτικότητα αυξήθηκε και η αντίσταση ενάντια στην ακτινοβολία μελετήθηκε και βελτιώθηκε. Συγχρόνως, συστήματα ενεργειακού εφοδιασμού PV αναπτύχθηκαν για εκείνους τους πολύ απαιτητικούς όρους.

Το 1958, τέθηκαν σε τροχιά τα πρώτα 108 ηλιακά κύτταρα για τον ανεφοδιασμό του δορυφόρου Vanguard. Απέδωσαν καλύτερα από ό,τι είχαν προβλέψει και εφοδίασαν τον δορυφόρο περισσότερο από το ό,τι αναμενόταν. Η απαίτηση για τα ηλιακά κύτταρα, αυξήθηκε γρήγορα στα επόμενα έτη, οδηγώντας σε μια μικρή βιομηχανική παραγωγή. Η συνέπεια ήταν όχι μόνο μια βελτίωση των ηλεκτρικών παραμέτρων των κυττάρων, αλλά και μια μείωση των τιμών. Αυτό, στη συνέχεια, οδήγησε σε μια μέτρια χρήση των ηλιακών κυττάρων στις επίγειες εφαρμογές, παρόλαυτα παρέμεινε η κύρια αγορά για περισσότερο από μία δεκαετία.

Η σημαντική ανακάλυψη για τα επίγεια φωτοβολταϊκά μπορεί να επισημανθεί άμεσα μετά την κρίση του πετρελαίου το 1973/74. Οι εμπειρογνώμονες σε όλα τα βιομηχανοποιημένα έθνη άρχισαν να ψάχνουν τις εναλλακτικές λύσεις στο λιγοστό και συγχρόνως ακριβό ορυκτέλαιο. Ανακάλυψαν τα φωτοβολταϊκά και αναγνώρισαν έναν πιθανό υποψήφιο για μια μελλοντική άνευ καυσίμων ενέργεια ανεφοδιασμού. Πρόσφατα αναδυόμενα όργανα ανάπτυξης στις Ηνωμένες Πολιτείες, Ευρώπη, και η Ασία καταπίστηκαν όχι μόνο με την ανάπτυξη των κυττάρων, αλλά και με τα συστήματα και τα τμήματα συστημάτων. Τα προβλήματα που λύνονταν ήταν τρομερά: το κόστος της

ενέργειας PV έπρεπε να μειωθεί από έναν παράγοντα 1.000. Αυτό αναφέρθηκε όχι μόνο στα κύτταρα, αλλά και σε ολόκληρο το σύστημα.

Από τότε, η αξία των διαδίκτυωμένων συστημάτων έχει μειωθεί σε ένα παράγοντα των 100. Πώς αυτό πραγματοποιήθηκε; Προφανώς, μια πηγή ενέργειας τόσο ακριβή όσο το PV δεν έχει καμία πιθανότητα σε μια ελεύθερη αγορά. Κυβερνήσεις σε κάποιες Ευρωπαϊκές χώρες, στις ΗΠΑ, και την Ιαπωνία άρχισαν τα μεγάλα προγράμματα υποστήριξης, επειδή πείστηκαν για τη μεγάλη δυνατότητα των φωτοβολταϊκών. Η επιτυχία της μείωσης δαπανών προέκυψε από μια αλληλεπίδραση αρκετών ακόμα συντονισμένων πρωτοβουλιών: Ανάπτυξη καλύτερων ηλιακών κυττάρων και των συστημάτων, προγράμματα επίδειξης για τη δοκιμή και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων, και, τελικά, προγράμματα υποστήριξης της αγοράς για τις διαδίκτυωμένες γεννήτριες.

Κατά συνέπεια, έχουμε παραγωγή που επεκτείνεται με αξιοπρόσεκτα ποσοστά αύξησης μεταξύ 20 και 40% το χρόνο με τις αντίστοιχες μειώσεις δαπανών. Τα σημαντικότερα προγράμματα υποστήριξης και επίδειξης της αγοράς είναι:

- Το γερμανικό πρόγραμμα μέτρησης και ανάλυσης 1000 στεγών (The German 1000 Roof Measurement and analysis program).
- Το πρόγραμμα 100.000 στεγών στη Γερμανία.
- Το πρόγραμμα 1 εκατομμυρίου στεγών στις ΗΠΑ (αυτό το πρόγραμμα περιλαμβάνει επίσης θερμικά συστήματα.)
- Το ιταλικό κορυφαίο πρόγραμμα στεγών.
- Τα μικρότερα προγράμματα τα οποία εισήχθησαν στην Αυστρία και την Ελβετία.

Πιθανώς το σημαντικότερο εργαλείο για την ανάπτυξη της αγοράς είναι η εφαρμογή νόμων σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες και την Ιαπωνία. Αυτοί οι νόμοι παρέχουν περισσότερο ή λιγότερο επαρκή αποζημίωση για την ενέργεια PV από την οποία τροφοδοτείται το πλέγμα. Παράλληλα, μια

πλήρως οικονομική αγορά αναπτύχθηκε για καταναλωτικά προϊόντα και παροχές ηλεκτρικού ρεύματος για τις μακρινές εγκαταστάσεις.

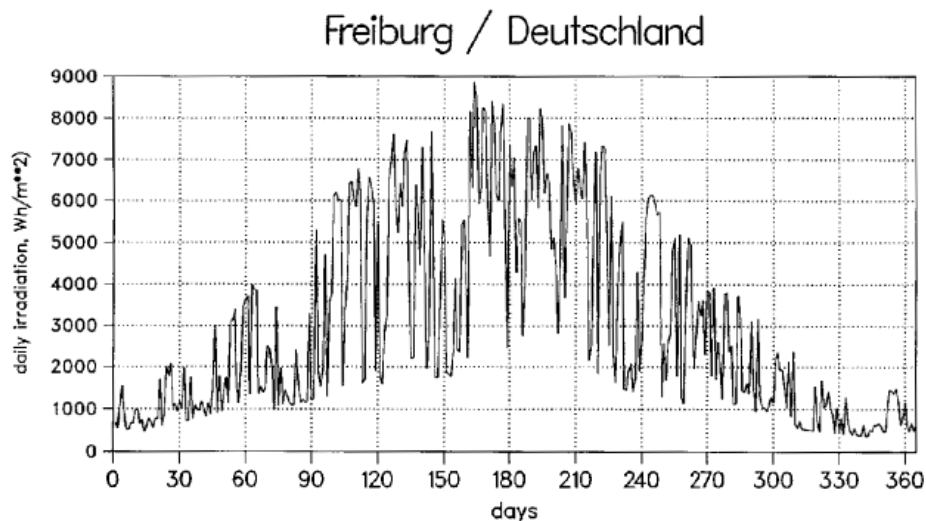
Σήμερα, έχουμε τις γεννήτριες που κυμαίνονται από διάφορα milliwatts στα καταναλωτικά προϊόντα ,τα διαδικτυωμένα συστήματα με κιλοβάτ μέχρι την κεντρική δύναμη εγκαταστάσεων διάφορων μεγαβάτ.

1.3 Σχετικότητα του PV, τώρα και στο μέλλον

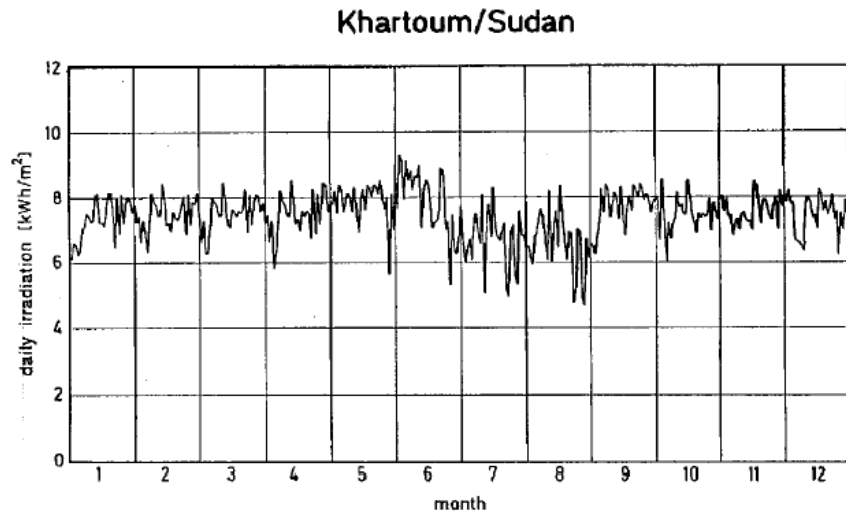
Αν και η θεωρητική δυνατότητα του PV παγκοσμίως είναι πολύ υψηλή, είναι δύσκολο να αναφερθεί ένας ενιαίος αριθμός για αυτήν την δυνατότητα. Από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στη γήινη επιφάνεια κάθε έτος, μόνο ένα μικρό μέρος (περίπου 0.003%) είναι ισοδύναμο με την παγκόσμια απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα. Η δυνατότητα του PV είναι μέρος της δυνατότητας όλων των ειδών χρησιμοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Από αυτή την άποψη, δεν υπάρχει κανένας ρεαλιστικός περιορισμός για αυτήν την δυνατότητα. Έναντι της αιολικής ενέργειας, που είναι προς το παρόν η πιο οικονομική ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, το PV έχει το πλεονέκτημα ότι δεν περιορίζεται σε ορισμένες γεωγραφικές θέσεις. Το PV ακόμη και σήμερα είναι σε λειτουργία σχεδόν παντού. Αφ' ενός, το ποσό της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση και το κλίμα, και ιδιαίτερα στο γεωγραφικό πλάτος κάθε περιοχής. Εκεί υπάρχει μια διαφορά περίπου ενός παράγοντα του 2.5 στην ενέργεια της ακτινοβολίας μεταξύ των ξηρότερων περιοχών της ερήμου και της κεντρικής Ευρώπης. Ένα σοβαρό πρόβλημα στις περισσότερες θέσεις είναι η διαλείπουσα φύση της ηλιακής ενέργειας.

Τα παραδείγματα των καθημερινών και εποχιακών διακυμάνσεων της ακτινοβολίας παρουσιάζονται στα διαγράμματα 1.3 και 1.4. Το σχήμα 1.3 καταδεικνύει την περίπτωση Freiburg στη νότιο Γερμανία, όπου βλέπουμε μια μεγάλη αλλά έντονα κυμαινόμενη ηλιακή εισαγωγή το καλοκαίρι και μια πολύ χαμηλή διαθεσιμότητα το χειμώνα. Το σχήμα 1.4 αντίθετα δίνει ένα παράδειγμα ενός πολύ ηλιόλουστου κλίματος ερήμου στο Χαρτούμ του Σουδάν. Η ηλιακή εισαγωγή είναι πολύ περισσότερο ομοιόμορφη σε μια

καθημερινή και ετήσια κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση, η εποχιακή αποθήκευση απαιτείται για ένα ολοκληρωμένο ηλιακό σύστημα, ενώ στο Χαρτούμ η καθημερινή αποθήκευση είναι ικανοποιητική. Ακόμη και στην κεντρική Ευρώπη, που δεν ευλογείται με αφθονία ηλιοφάνειας, ένα μέρος της απαίτησης ηλεκτρικής ενέργειας (περισσότερο από 50%) θα μπορούσε να ικανοποιηθεί από την ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια(θεωρητικά). Στην πραγματικότητα, πολλά εμπόδια θα πρέπει να υπερνικηθούν προτού ακόμη επιτευχθεί ένα μικρό ποσοστό. Στις βορειότερες (ή νοτιότερες) χώρες ένα μεγάλο πρόβλημα είναι ο εποχιακός κακός συνδυασμός της προσφοράς και της ζήτησης.



Σχέδιο 1.3. Καθημερινή σφαιρική ακτινοβολία για ένα έτος σε Freiburg, νότια Γερμανία



Σχέδιο 1.4. Καθημερινή σφαιρική ακτινοβολία για ένα έτος στο Χαρτούμ, Σουδάν

Οι σημαντικές συνεισφορές μπορούν μόνο να αναμένονται από τα διαδικτυωμένα συστήματα. Σε αυτήν την περίπτωση, το πλέγμα χρησιμοποιείται για αποθήκευση. Έως ότου ένας οικονομικός τρόπος της εποχιακής ενεργειακής αποθήκευσης να διατεθεί, το πρακτικό όριο μπορεί να είναι περίπου 10% της συνολικής παραγωγικής ικανότητας εξαρτώμενη από την ελαστικότητα του πλέγματος. Αυτό είναι ακόμα μια ενέργεια μεγάλου ποσού και πολύ μακριά από τη σημερινή συμβολή. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι ένας συνδυασμός ανανεωμένων πηγών ενέργειας με ένα διαφορετικό στοχαστικό όπως ο αέρας και το PV, παρέχουν μια ακόμη πιο παραγωγική ικανότητα.

Η δυνατότητα για τη Γερμανία έχει αξιολογηθεί σε διάφορες μελέτες. Στους πολύ κατά προσέγγιση όρους, το αποτέλεσμα είναι ότι με τη χρησιμοποίηση όλων των κατάλληλων περιοχών στεγών, περίπου 20% της ικανότητας θα μπορούσε να επιτευχθεί. Κατά τη σύγκριση των ικανοτήτων, πρέπει να συνειδητοποιηθεί ότι η συνεχής μέση δύναμη ενός συστήματος PV είναι μόνο περίπου το ένα δέκατο της μέγιστης δύναμης. Πέρα από τις στέγες, άλλες περιοχές θα μπορούσαν επίσης να είναι χρησιμοποιηθούν, όπως οι δρόμοι και οι ράγες, οι οποίοι θα μπορούσαν να προσθέσουν τη ίδια ποσότητα. Ακόμα πολύ μεγάλη δυνατότητα βρίσκεται στις αχρησιμοποίητες γεωργικές περιοχές. Περαιτέρω, μπορεί να αποδειχθεί ότι από το βελτιστοποιημένο μοντάρισμα των γεννητριών PV οι ίδιες περιοχές γης μπορούν να

χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για το PV και την καλλιέργεια συγκομιδών .Τέτοια υψηλά επίπεδα της παραγωγής PV, εντούτοις, δεν είναι πολύ πιθανά στο εγγύς μέλλον επειδή θα απαιτούσε την εποχιακή αποθήκευση .

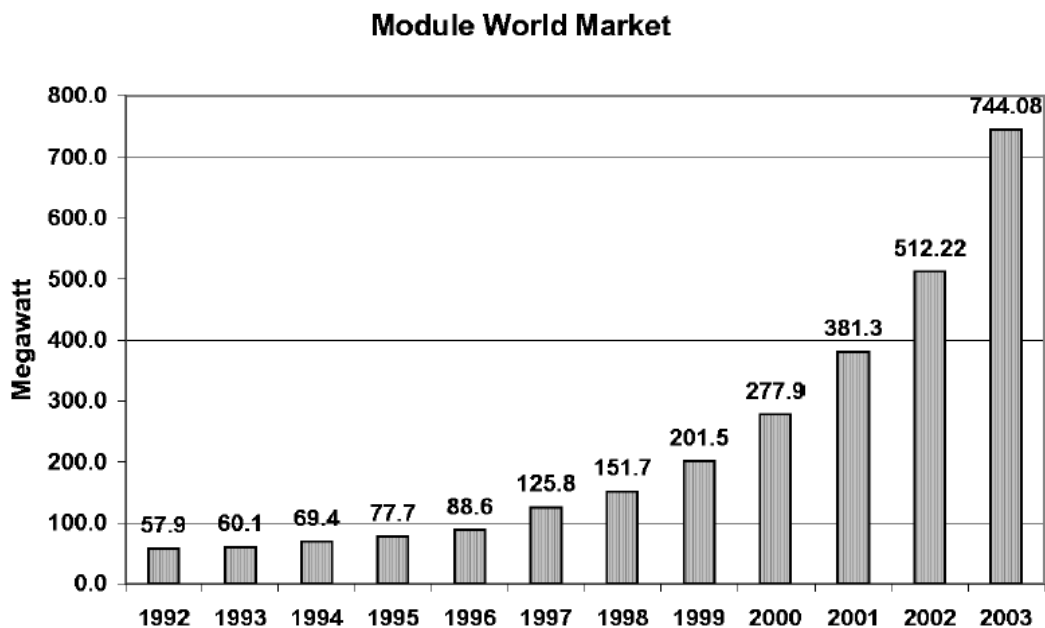
Στις κλιματολογικές ζώνες με μια υψηλότερη και εποχιακά λιγότερο μεταβλητή ηλιακή ακτινοβολία, οι πολύ υψηλές συνεισφορές της PV-ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατές. Είναι προφανές ότι το ίδιο ηλιακό κύτταρο εάν τοποθετείται σε μια περιοχή ερήμων κοντά στον ισημερινό θα παρήγε 2.0 έως 2.5 φορές περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια με αντίστοιχα χαμηλότερο κόστος απ' ότι στην Ευρώπη. Τα επιχειρήματα ενάντια σε αυτό είναι το πρόβλημα της διηπειρωτικής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και της ασφάλειας του ανεφοδιασμού. Εντούτοις, είναι κατανοητό ότι στο απώτερο μέλλον, τα αγροκτήματα PV θα είναι οργανωμένα στις περιοχές ερήμων και η ενέργεια θα μεταφέρεται στους καταναλωτές από τα μεγάλης απόστασης πλέγματα ή υπό μορφή υδρογόνου.

Το PV είναι σήμερα οικονομικό μόνο εάν δεν είναι απαραίτητο να ανταγωνιστεί με το πλέγμα ηλεκτρικής ενέργειας. Εντούτοις, η τεχνολογία είναι μόνο στην αρχή της ανάπτυξής της και οι ελπίδες είναι υψηλές για τις περαιτέρω μεγάλες μειώσεις δαπανών. Αυτή τη στιγμή, εντούτοις, δεν είναι προφανές ότι το κόστος του PV μπορεί να φθάσει στα παρόντα επίπεδα του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας φορτίων βάσεων, αλλά μπορεί να φθάσει στις καταναλωτικές τιμές λιανικής πώλησης. Εκτός από την ανάπτυξη της τεχνολογίας, η επέκταση αγοράς είναι ένας αποδεδειγμένος τρόπος κάτω από το κόστος. Σε διάφορες χώρες που παίρνουν σοβαρά την υποχρέωσή τους να μειώσουν τα αέρια θερμοκηπίων, σημαντικά προγράμματα υποστήριξης για το διανεμημένο PV εγκαταστάσεων έχουν νομοθετηθεί. Ένα παράδειγμα είναι ο γερμανικός νόμος ανανεώσιμης ενέργειας, ο οποίος ορίζει ότι οι χρήστες πρέπει να πληρώσουν για την ηλεκτρική ενέργεια του PV που τροφοδοτείται στο πλέγμα, 0.5 €/kWh για είκοσι έτη. Αυτή η αποζημίωση μειώνεται κατά 5% κάθε έτος για τις νέες εγκαταστάσεις προκειμένου να υποκινηθεί η μείωση δαπανών. Οι αναμενόμενες τάσεις δαπανών για το μέλλον περιγράφονται στο κεφ. 8.

1.4 Αγορές, οικονομικά

Το κύριο πρόβλημα, όπως θα παρουσιαστεί αργότερα, είναι το υψηλό κόστος των ηλιακών κυττάρων. Εντούτοις, οι δαπάνες μειώνονται συνεχώς και μια αξιοπρόσεκτη ανάπτυξη αγοράς έχει πραγματοποιηθεί. Η φωτοβολταϊκή παγκόσμια αγορά το 2002 ήταν περισσότερη από 500MWp το χρόνο, αντίστοιχη σε μια αξία κατά προσέγγιση 1 δισεκατομμυρίου US\$. Αυτό είναι μια αξιοπρόσεκτη αγορά, αλλά ακόμα μακριά από τη συγκρότηση μιας αξιοπρόσεκτης συμβολής στην κατανάλωση παγκόσμιας ενέργειας. Η ανάπτυξη αγοράς της τελευταίας δεκαετίας ήταν μεταξύ 15 και 25% το χρόνο και έχει ανέλθει πρόσφατα σε 30% και ακόμα και 40%, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5.

Αυτή η ανάπτυξη αγοράς θα ήταν πολύ ικανοποιητική εάν θα μπορούσε να διατηρηθεί για δέκα έως δεκαπέντε έτη. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας PV θα έπεφτε γρήγορα, όπως περιγράφεται στα επόμενα κεφάλαια.



Σχέδιο 1.5. Ανάπτυξη των παγκόσμιων αγορών PV σε MWpeak (MWpeak ορίζεται ως η δύναμη κάτω από τον πλήρη ήλιο, περίπου 1 kW/m²)

Το κύριο κίνητρο για την ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας είναι η επιθυμία να μειώσει την εξάρτηση στα αποσυμφορήσιμα απολιθωμένα καύσιμα με το δυσμενές αποτέλεσμα τους στο περιβάλλον.

Υπάρχουν δύο σημαντικοί τομείς της αγοράς, διαδίκτυωμένα και τα αποκαλούμενα αυτόνομα συστήματα. Το πρώτο παραδίδει τη δύναμη άμεσα στο πλέγμα. Για αυτόν το λόγο το συνεχές ρεύμα από τις ηλιακές ενότητες μετατρέπεται στο εναλλασσόμενο ρεύμα από έναν αναστροφέα. Η τελευταία δύναμη προμηθειών στα αποκεντρωμένα συστήματα και τα μικρής κλίμακας καταναλωτικά προϊόντα. Μια σημαντική αγορά που αναπτύσσεται αυτήν την περίοδο είναι στα ηλιακά εγχώρια συστήματα, που ικανοποιούν το βασικό αίτημα ηλεκτρικής ενέργειας του αγροτικού πληθυσμού στις αναπτυσσόμενες χώρες. Το μέγεθος αυτού του στόχου μπορεί να εκτιμηθεί εάν κάποιος γνωρίζει ότι περίπου 2 δισεκατομμύρια άτομα είναι χωρίς πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια σήμερα. Αυτή τη στιγμή, και οι δύο αγορές χρειάζονται τις επιχορηγήσεις, τις διαδίκτυωμένες εγκαταστάσεις επειδή το PV είναι δαπανηρότερο από την ηλεκτρική ενέργεια πλέγματος, και τα ηλιακά εγχώρια συστήματα επειδή οι δυνητικοί χρήστες στερούνται το κεφάλαιο επένδυσης. Αφ' ενός, υπάρχει επίσης μια σημαντική βιομηχανική αυτόνομη αγορά που είναι σήμερα πλήρως οικονομική.

Λόγω της υψηλής δυνατοτήτάς της, η αγορά αμφισβητείται σθεναρά και νέες επιχειρήσεις εισάγονται συνεχώς. Είναι σημαντικό ότι διάφορες μεγάλες επιχειρήσεις πετρελαίου έχουν καθιερώσει τώρα τις σταθερές βάσεις στα φωτοβολταϊκά. Πράγματι, μια πρόσφατη μελέτη των πιθανών μελλοντικών ενεργειακών σεναρίων μέχρι το έτος 2060 που δημοσιεύεται από την εφημερίδα Shell προβλέπει μια ενεργειακή παραγωγή της τάξης των multigigawatts από τις ανανεώσιμες ενέργειες, συμπεριλαμβανομένου των φωτοβολταϊκών. Φυσικά, ο ισχυρός ανταγωνισμός οδηγεί στα πολύ χαμηλά περιθώρια κέρδους των περισσότερων συμμετεχόντων αυτής της αγοράς. Ξεκινώντας το 2000, η αγορά παρουσίασε επιταχυνόμενη αύξηση

περισσότερο από 30%. Υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες αυτή η αύξηση να συνεχίσει για τουλάχιστον μερικά έτη επειδή μερικές χώρες έχουν εγκρίνει τα επιθετικά μέτρα για να υποκινήσουν τη διαδικτυωμένη αγορά, όπως αναφέρεται παραπάνω. Προκειμένου να ικανοποιηθεί η αυξανόμενη ζήτηση, πολλές επιχειρήσεις PV είναι στο στάδιο της καθιέρωσης ουσιαστικά νέων ικανοτήτων παραγωγής κυττάρων και ενότητας. Οι συνέπειες που αυτό θα έχει σχετικά με τη διαθεσιμότητα των ημιαγωγών πυριτίου θα συζητηθούν στο κεφ. 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 Φυσική των ηλιακών κυττάρων

2.1 Βασικοί μηχανισμοί της ενεργειακής μετατροπής

Οι διαφορετικοί μηχανισμοί και τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας στην ηλεκτρική ενέργεια, αλλά όλες οι πρακτικές συσκευές, τουλάχιστον μέχρι σήμερα, είναι βασισμένες στους ημιαγωγούς.

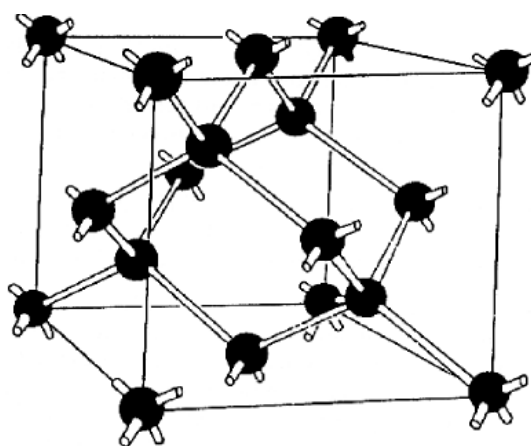
Οι ημιαγωγοί είναι στερεά και, όπως και στα μέταλλα, η ηλεκτρική αγωγιμότητά τους είναι βασισμένη στα κινητά ηλεκτρόνια. Οι ιοντικοί αγωγοί δεν εξετάζονται εδώ. Η αρχική εκτίμηση εδώ είναι το επίπεδο αγωγιμότητας. Τα υλικά είναι γνωστά ως :

- αγωγοί σε μια αγωγιμότητα τύπου : $\sigma > 10^4 (\Omega\text{cm})^{-1}$
- ημιαγωγοί σε μια αγωγιμότητα τύπου $10^4 > \sigma > 10^{-8} (\Omega\text{cm})^{-1}$
- non-conductors (μονωτές) μιας αγωγιμότητας $\sigma < 10^{-8} (\Omega\text{cm})^{-1}$.

Αυτή η απλή κατηγοριοποίηση είναι, εντούτοις, μετά βίας ένα επαρκές κριτήριο για ερμηνεία, και κυρίως άλλα χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα η θερμική συμπεριφορά της αγωγιμότητας, τα οποία αποτελούν τη βάση για την ταξινόμηση. Αυτό είναι το σημείο όπου τα μέταλλα και οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται με έναν αντιτιθέμενο τρόπο. Καθώς η αγωγιμότητα των μετάλλων μειώνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας, στους ημιαγωγούς αυξάνεται περισσότερο. Έτσι τι είναι ένα κρυστάλλινο στερεό; Σε αυτό το σημείο, επιθυμούμε να διαφοροποιήσουμε μεταξύ δύο χωριστών κατηγοριών. Αφ' ενός, υπάρχουν οι αποκαλούμενες άμορφες ουσίες. Σε αυτές, η δομή των μεμονωμένων ατόμων και των μορίων δεν επιδεικνύει σχεδόν καμία περιοδικότητα ή τακτικότητα. Τα κρυστάλλινα στερεά, αφ' ενός, διακρίνονται

από μία τέλεια (ή σχεδόν τέλεια) περιοδικότητα της ατομικής δομής. Για αυτά τα υλικά είναι ευκολότερο να κατανοήσουμε τα φυσικά χαρακτηριστικά των στερεών. Επομένως, η εξήγηση των χαρακτηριστικών των ημιαγωγών και των φυσικών αρχών των φωτοβολταϊκών είναι κανονικά βασισμένη στους κρυστάλλινους ημιαγωγούς, και συγκεκριμένα στο κρυστάλλινο πυρίτιο.

Από κοινού με όλα τα στοιχεία της τέταρτης ομάδας του περιοδικού πίνακα, το πυρίτιο έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Αυτά τα άτομα τακτοποιούνται το ένα με το άλλο σε δεσμούς έτσι ώστε κάθε άτομο να απέχει ίση απόσταση από τέσσερα άλλα άτομα και κάθε ηλεκτρόνιο να διαμορφώνει έναν σταθερό δεσμό με δύο γειτονικά άτομα. Αυτός ο τύπος δικτυωτού πλέγματος είναι γνωστός ως δικτυωτό πλέγμα διαμαντιών, επειδή το διαμάντι – αποτελούμενο από τετραεδρικό άνθρακα - έχει αυτήν την δομή δικτυωτού πλέγματος. Αυτοί οι δεσμοί είναι εξαιρετικά ισχυροί. Αυτό καταδεικνύεται από άλλα φυσικά χαρακτηριστικά όπως η σκληρότητα αυτών των υλικών.



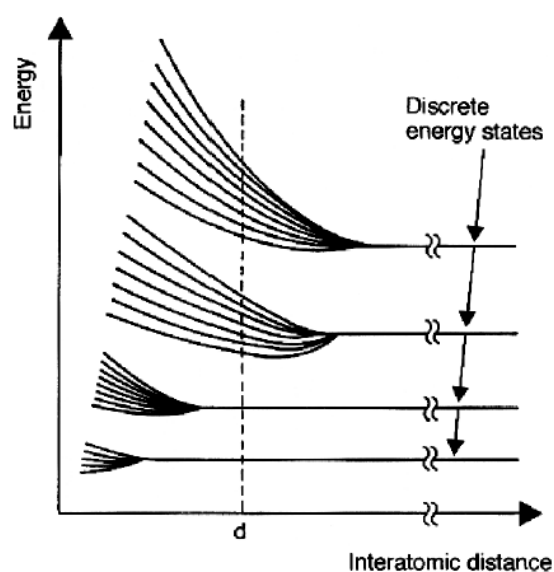
Σχέδιο 2.1. Το δικτυωτό πλέγμα διαμαντιών

Το σχήμα 2.1 παρουσιάζει τη δομή ενός δικτυωτού πλέγματος διαμαντιών. Δεν επιθυμούμε να μπούμε σε περαιτέρω λεπτομέρειες για αυτήν την δομή σε αυτό το σημείο.

Για να εμφανιστεί ηλεκτρική αγωγιμότητα σε αυτόν τον τύπο κρυστάλλου, μερικοί από αυτούς τους δεσμούς πρέπει να σπάσουν. Σαφώς, αυτό μπορεί

μόνο να εμφανιστεί εάν η ενέργεια χρησιμοποιείται. Σε μια απόλυτη θερμοκρασία $T = 0 \text{ K}$, κανένας δεσμός δεν σπάει, δηλ., κανένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο δεν είναι παρόν. Στο σημείο όπου $T = 0 \text{ K}$, ο ημιαγωγός είναι ένας μονωτής.

Έτσι ποια είναι η δομή ενεργειακών επιπέδων σε αυτόν τον τύπο κρυστάλλου; Ξέρουμε ότι σύμφωνα με τη θεωρία του Bohr για το άτομο, τα ηλεκτρόνια σε ένα απομονωμένο άτομο μπορούν μόνο να καταλάβουν τα καθορισμένα με σαφήνεια ενεργειακά επίπεδα. Εάν φέρουμε δύο ή περισσότερα άτομα πολύ κοντά, σε ένα φανταστικό πείραμα, κατόπιν μια διαλογική επίδραση θα εμφανιστεί, χωρίζοντας τα ενεργειακά επίπεδα αυτών των συνδεδεμένων ατόμων. Ο αριθμός συχνοτήτων αυξάνεται με τον αριθμό ατόμων που συνδέονται. Αυτό οδηγεί σε ιδιαίτερες ενεργειακές ζώνες με τα επίπεδα ενέργειας που μπορούν να καταληφθούν από τα ηλεκτρόνια που χωρίζονται με χάσματα στα οποία δεν μπορεί να υπάρξει κανένα ηλεκτρόνιο. Εάν μεταφέρουμε αυτήν την αναλογία στη διαλογική επίδραση σε ένα δικτυωτό πλέγμα κρυστάλλου, κατόπιν ο διαχωρισμός των ενεργειακών επιπέδων μπορεί να παρουσιαστεί ως εξής.



Ο κάθετος άξονας του σχεδίου 2.2 αντιπροσωπεύει την ενέργεια ηλεκτρονίου, και ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την απόσταση των ατόμων από το ένα στο άλλο. Καθώς η απόσταση μειώνεται, τα ενεργειακά επίπεδα των ατόμων χωρίζουν όλο και περισσότερο. Παρόμοια με τη μηχανική αναλογία, οι ενεργειακές ζώνες γίνονται όλο και πιο ευρείες. Σε μία διευκρινισμένη απόσταση μεταξύ των ατόμων (d), είναι σαφές ότι υπάρχει ένα ενεργειακό χάσμα μεταξύ των δύο ανώτερων ζωνών, της ζώνης σθένους και της ζώνης διεξαγωγής, στην οποία, δεν μπορεί να υπάρξει κανένα ηλεκτρόνιο. Το ενεργειακό χάσμα καλείται χάσμα ζωνών, E_g , ενός ημιαγωγού. Περαιτέρω ισχύει, ότι όταν $T = 0$ K, επειδή οι δεσμοί δεν είναι σπασμένοι, κανένα από τα ενεργειακά επίπεδα στην εξωτερική ζώνη διεξαγωγής δεν θα καταληφθεί. Στη ζώνη σθένους, εντούτοις, όλα τα διαθέσιμα ενεργειακά επίπεδα είναι κατειλημμένα. Αυτό σημαίνει ότι καθόλου ενέργεια δεν μπορεί να απορροφηθεί από έναν εξωτερικό ηλεκτρικό τομέα, δηλ., το ηλεκτρικό ρεύμα δεν μπορεί να ρεύσει. Ο ημιαγωγός είναι έπειτα ένας μονωτής. Μόνο στις υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζει αγωγιμότητα, επειδή τότε μερικά ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν τα ενεργειακά επίπεδα στη ζώνη διεξαγωγής.

Αυτή η δομή ζωνών, με ένα ενεργειακό χάσμα μεταξύ των δύο εξωτερικών ενεργειακών ζωνών, εμφανίζεται επίσης στους μονωτές. Οι ημιαγωγοί και οι μονωτές διαφέρουν μόνο στο μέγεθος του χάσματος ζωνών. Σε έναν ημιαγωγό, ακόμη και σε «κανονικές θερμοκρασίες», (π.χ., στη θερμοκρασία δωματίου) μερικά ηλεκτρόνια μπορούν να υπερπηδήσουν το χάσμα ζωνών, προκαλώντας έτσι ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στους μονωτές, η απόσταση ζωνών είναι τόσο μεγάλη που στις κανονικές θερμοκρασίες κανένα ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να πηδήσει το χάσμα. Κανονικές τιμές για την ενέργεια αυτού του χάσματος ζωνών για τους ημιαγωγούς κυμαίνονται από μερικά δέκατα των ηλεκτρόνιο-βολτ σε περίπου 2 eV, ενώ για τους μονωτές αυτές οι ενέργειες είναι σημαντικά υψηλότερες.

Η διεξαγωγή μπορεί να εμφανιστεί σε έναν ημιαγωγό με τον ακόλουθο τρόπο: σε ευρεία σειρά θερμοκρασίας «κανονικών» θερμοκρασιών που η ζώνη διεξαγωγής είναι «σχεδόν κενή» και η ζώνη σθένους «σχεδόν πλήρης»

από τα ηλεκτρόνια. «Σχεδόν κενή» στη ζώνη διεξαγωγής σημαίνει ότι μόνο μερικά ηλεκτρόνια βρίσκονται σε επιτρεπόμενα ενεργειακά πεδία. Αν και όλα αυτά τα πεδία βρίσκονται κοντά στην άκρη της ζώνης, ακόμα υπάρχουν πολυάριθμα μη κατειλημμένα πεδία κοντά στα κατειλημμένα επίπεδα, έτσι ώστε αυτά τα ηλεκτρόνια είναι σε θέση να φτάσουν ένα πιο υψηλό επίπεδο από σχεδόν μία συνεχή

διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι όταν συνδέεται με ένα ηλεκτρικό πεδίο, η ενέργεια μπορεί να λαμβάνεται συνεχώς. Επομένως, τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν στην κατεύθυνση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Είναι έπειτα δυνατό να αντιμετωπιστούν τα ηλεκτρόνια διεξαγωγής όπως αντιμετωπίζονται

τα ηλεκτρόνια στα μέταλλα στην κλασική φυσική. Εξ αιτίας του επιπέδου της διάλυσης, επηρεάζουν το ένα το άλλο πολύ λίγο, αλλά είναι σε μία κατάσταση

συνεχούς αλληλεπίδρασης με το δικτυωτό πλέγμα του κρυστάλλου. Αυτή η αλληλεπίδραση είναι ιδιαίτερα σύνθετη και μπορεί να εξεταστεί μόνο στατιστικά.

Ανάλογη με τα παραπάνω είναι και η συμπεριφορά «σχεδόν πλήρους» της ζώνης σθένους. Μερικά ενεργειακά επίπεδα σε αυτήν την ζώνη δεν καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια, και αυτά τα ενεργειακά επίπεδα

επίσης πλησιάζουν στην άκρη της ζώνης σθένους. Όπως στη ζώνη διεξαγωγής, αυτά τα κενά πεδία περιβάλλονται από τα πολυάριθμα κατειλημμένα πεδία. Αυτό σημαίνει ότι ένα τέτοιο κενό πεδίο μπορεί να περιπλανηθεί ενδιάμεσως της ζώνης σθένους. Αυτό το κενό σημείο είναι γνωστό ως ηλεκτρόνιο τρυπών ή ατέλειας. Έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να μεταχειριστεί αυτή η τρύπα ως μοναδιαία οντότητα, δηλ., ως μεταφορέα δαπανών. Είναι εμφανές ότι ο μεταφορέας δαπανών έχει μια θετική δαπάνη. Το ατελές ηλεκτρόνιο ή η τρύπα, όπως το ηλεκτρόνιο, είναι ένας δεύτερος τύπος μεταφορέα δαπανών. Αυτό είναι ένας εξαιρετικά χρήσιμος φορμαλισμός για την εξέταση του φαινομένου της αγωγιμότητας στους ημιαγωγούς.

Η ειδική αντίσταση του καθαρού πυριτίου στο $T = 300\text{K}$ είναι εξαιρετικά υψηλή, περίπου $300,000 \Omega\text{cm}$. Ποικίλλει επίσης πολύ σημαντικά με τη θερμοκρασία. Υπάρχει εντούτοις, εκτός από την αύξηση της θερμοκρασίας, άλλη μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος για τη συγκέντρωση των

μεταφορέων δαπανών σε έναν ημιαγωγό, με την αγωγιμότητά του, δηλαδή με τη σκόπιμη εισαγωγή ορισμένων «ακαθαρσιών» ατόμων στο κρύσταλλο.

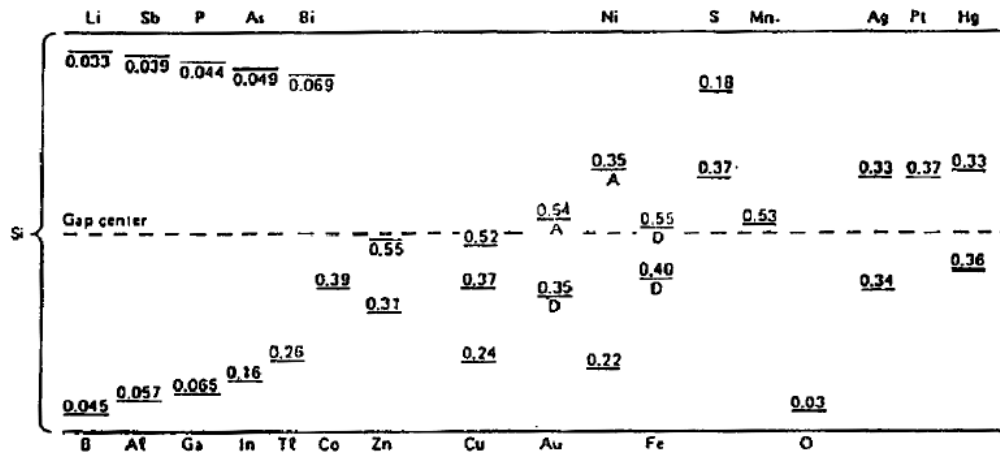
Εάν αντικαταστήσουμε το άτομο πυριτίου στη δομή κρυστάλλου με ένα στοιχείο από την πέμπτη ομάδα του περιοδικού πίνακα, παραδείγματος χάριν (π.χ., φώσφορος), αυτό το άτομο «φέρνει» πέντε ηλεκτρόνια σθένους μαζί του. Μόνο τέσσερα από αυτά τα ηλεκτρόνια απαιτείται να συνδεθούν με τη δομή κρυστάλλου. Είναι επομένως εύλογο ότι το πέμπτο ηλεκτρόνιο είναι σχετικά αόριστα συνδεδεμένο και μπορεί, επομένως, να είναι «ιονισμένος» ακόμη και στις χαμηλές θερμοκρασίες. Καλούμε αυτά τα στοιχεία από την πέμπτη ομάδα του περιοδικού πίνακα «χορηγούς», καθώς μπορούν εύκολα να «προσφέρουν» ηλεκτρόνια. Ακολουθώντας με το φώσφορο, τα στοιχεία αρσενικό και αντιμόνιο χρησιμοποιούνται επίσης ως χορηγοί στην τεχνολογία ημιαγωγών. Λόγω της χαμηλής ενέργειας ενεργοποίησης των πρόσθετων ηλεκτρονίων, ιονίζονται ακόμη και σε χαμηλή θερμοκρασία.

Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε τα στοιχεία από την τρίτη ομάδα από τον περιοδικό πίνακα ως υλικά πρόσμιξης. Το βόριο, το αργίλιο, το γάλλιο, και το ίνδιο χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία ημιαγωγών. Το ελλείπον συνδεδεμένο ηλεκτρόνιο ενός τρισθενούς ατόμου υλικού πρόσμιξης οδηγεί στην δημιουργία μιας τρύπας και επιφέρει αύξηση στην θετική αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Αυτό επομένως καλείται αγωγός *p*-τύπων, και αυτοί οι τύποι υλικών πρόσμιξης είναι γνωστοί ως αποδέκτες. Οι τρύπες είναι τώρα κυρίαρχες, δηλαδή η πλειοψηφία των μεταφορέων δαπανών, και τα ηλεκτρόνια είναι η μειονότητα των μεταφορέων δαπανών. Η ίδια τακτικότητα ισχύει όπως και στην περίπτωση της νάρκωσης με πεντασθενικά άτομα, δηλαδή ακόμη και στις χαμηλές θερμοκρασίες όλες οι τρύπες είναι ενεργές.

Τα ενεργειακά επίπεδα διάφορων χημικών στοιχείων στο ενεργειακό χάσμα φαίνονται στο σχήμα 2.3. Τα επίπεδα χορηγών είναι κοντά στη ζώνη διεξαγωγής και τα επίπεδα του αποδέκτη είναι κοντά στη ζώνη σθένους. Όπως μπορεί επίσης να φανεί, μερικά στοιχεία προκαλούν επίπεδα πλησίον του κέντρου του χάσματος. Αυτά τα επίπεδα καλούνται κέντρα επανασυνδυασμού επειδή αναγκάζουν υπερβολικά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τις τρύπες να επανασυνδυαστούν πέρα από το χάσμα. Αυτός ο επανασυνδυασμός παρεμποδίζει τη λειτουργία των ηλιακών κυττάρων (και περισσότερο άλλες συσκευές ημιαγωγών) και πρέπει να αποφευχθεί. Εξαιτίας

του ότι ακόμη και τα ποσά μερικών ακαθαρσιών είναι πολύ επιβλαβή, οι ημιαγωγοί πρέπει να είναι εξαιρετικά καθαροί.

Έπειτα, εξετάζουμε την παραγωγή μεταφορέων δαπανών από την απορρόφηση του φωτός στους ημιαγωγούς.



Σχέδιο 2.3 Ενεργειακά επίπεδα χημικών στοιχείων στο χάσμα

Αντίθετα με τα αδιαφανή μέταλλα, οι πυκνωτές καταδεικνύουν ποια είναι η χαρακτηριστική συμπεριφορά απορρόφησης. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη της αποκαλούμενης άκρης απορρόφησης. Για τα μήκη κύματος λ , στα οποία η ενέργεια φωτονίων ($E = hc/\lambda$, όπου το c είναι η ταχύτητα του φωτός σε ένα κενό και το h είναι η σταθερά του Planck) είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια της απαγορευμένης ζώνης, το φως, ανάλογα με το πάχος του υλικού, απορροφάται σχεδόν τελείως. Στην περίπτωση μεγάλου μήκους κύματος φωτός, σχεδόν καμία απορρόφηση δεν πραγματοποιείται εξαιτίας της χαμηλής ενέργειάς του. Σε αυτήν την φασματική περιοχή, ο ημιαγωγός είναι διαφανής. Στην περίπτωση του πυριτίου, η άκρη ζωνών βρίσκεται μέσα στις υπέρυθρες ακτίνες όταν $\lambda \sim 1.11 \mu\text{m}$. Επομένως, το πυρίτιο είναι εξαιρετικά ταιριαστό ως υλικό βάσεων για την υπέρυθη οπτική, αλλά όχι τόσο ιδανικό για την απορρόφηση του ηλιακού φάσματος, δεδομένου αυτών που θα δούμε αργότερα.

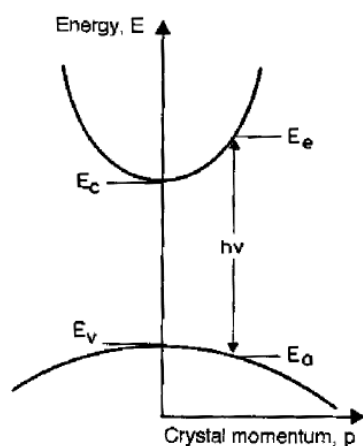
Η ένταση του φωτός όταν εισέρχεται στο κρύσταλλο αποδυναμώνεται κατά τη διάρκεια της μετάβασής του μέσω του κρυστάλλου από την απορρόφηση. Το ποσοστό απορρόφησης είναι έτσι - όπως σε πολλές άλλες περιπτώσεις της φυσικής συμπεριφοράς - ανάλογο προς την ένταση που είναι ακόμα παρούσα. Αυτό οδηγεί σε μια εκθετική μείωση της έντασης και μπορεί να περιγραφεί από την μαθηματική άποψη ως εξής:

$$F_x = F_{x,0} \exp(-\alpha_\lambda (x - x_0)) ,$$

(όπου F_x είναι ο αριθμός φωτονίων στο σημείο x , το $F_{x,0}$ είναι ο αριθμός των φωτονίων στην επιφάνεια όπου $x=0$ και το α_λ είναι ο συντελεστής απορρόφησης).

Το τελευταίο εξαρτάται από το μήκος κύματος, και καθορίζει το βάθος διείσδυσης του φωτός και επομένως το πάχος του κρυστάλλου που είναι απαραίτητο να απορροφήσει το μεγαλύτερο μέρος του φωτός διείσδυσης. Το μήκος απορρόφησης χ_L επίσης συχνά εισάγεται, αντίστοιχα με την τιμή $\chi_L = 1 / \alpha$. Σε αυτό το μήκος απορρόφησης η ένταση F_x είναι μειωμένη κατά $(1 - e^{-1}) F_{x,0}$ (περίπου 37%).

Η απορρόφηση στους ημιαγωγούς είναι η αποκαλούμενη βασική απορρόφηση δικτυωτού πλέγματος, στην οποία, ένα ηλεκτρόνιο διεγείρεται και μεταφέρεται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη διεξαγωγής, αφήνοντας μια τρύπα στη ζώνη σθένους. Ορισμένες ιδιαιτερότητες σε αυτή τη διαδικασία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Ένα φωτόνιο κατέχει μια συγκριτικά μεγάλη ποσού ενέργεια, αλλά σύμφωνα με τη σχέση του De Broglie



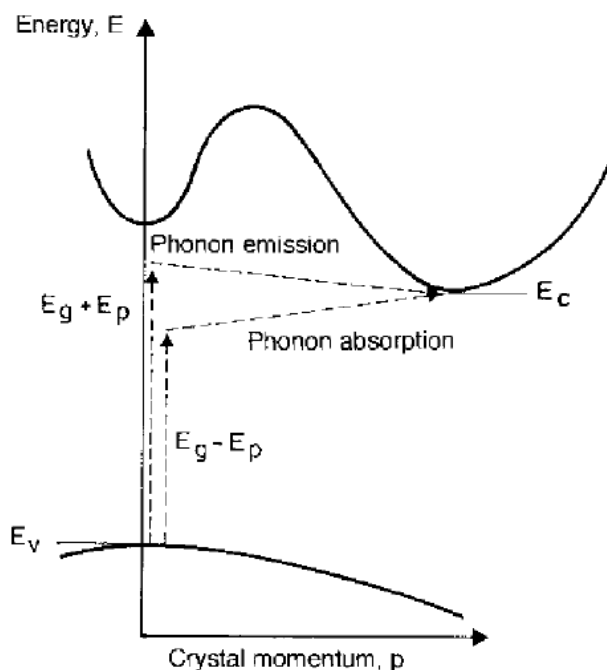
Σχέδιο 2.4 η ενέργεια σχεδιάζεται εναντίον της ορμής κρυστάλλου. Σε αυτήν την αντιπροσώπευση, η ζώνη διεξαγωγής και η ζώνη σθένους έχουν μια παραβολική μορφή.

$p = h\nu/c = h/\lambda$, έχει μια αμελητέα μικρή ορμή, p (το h είναι η σταθερά του Planck, ν είναι η συχνότητα του φωτός, και το c είναι η ταχύτητα του φωτός). Οι αρχές συντήρησης της ενέργειας και απαίτησης ορμής που κατά τη διάρκεια της απορρόφησης η ενέργεια του κρυστάλλου αυξάνεται, αλλά η ορμή κρυστάλλου παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Αυτό οδηγεί σε συγκεκριμένους κανόνες επιλογής.

Η διαδικασία απορρόφησης καταδεικνύεται άριστα στους άμεσους ημιαγωγούς. Στο σχ.2.4 η ενέργεια διοχετεύεται αντίθετα της κρυσταλλικής ορμής. Σε αυτή την παρουσίαση, η ζώνη διεξαγωγής κ η ζώνη σθένους έχουν ένα παραβολικό σχήμα. Σε έναν άμεσο ημιαγωγό, η ελάχιστη ενέργεια της ζώνης διεξαγωγής σε σχέση με την κρυσταλλική ορμή p βρίσκεται ακριβώς επάνω από το μέγιστο της ζώνης σθένους. Όταν ένα φωτόνιο απορροφάται, η ενέργεια $E = h\nu$ είναι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ του αρχικού και τελικού όρου της ενέργειας του κρυστάλλου.

Η κατάσταση είναι διαφορετική σε έναν έμμεσο ημιαγωγό. Σε αυτήν την περίπτωση, το ελάχιστο της ζώνης διεξαγωγής και το μέγιστο της ζώνης σθένους βρίσκονται σε διαφορετικές κρυσταλλικές ορμές. Είναι, εντούτοις, δυνατό να διεγερθεί στο ελάχιστο ζωνών διεξαγωγής εάν η απαραίτητη αλλαγή στην ορμή μπορεί να προκληθεί από τις θερμικές δονήσεις στο δικτυωτό πλέγμα, δηλ., phonon. Το ίδιο phonon, αν και έχει μόνο ένα χαμηλό ενεργειακό επίπεδο σε σύγκριση με ένα φωτόνιο, έχει πολύ υψηλή ορμή. Το σημαντικό σημείο εδώ είναι ότι η πιθανότητα της απορρόφησης είναι πολύ χαμηλότερη απ'ό, τι για έναν άμεσο ημιαγωγό λόγω της συμμετοχής δύο διαφορετικών μορίων.

Το πυρίτιο είναι ένας έμμεσος ημιαγωγός, όπως απεικονίζεται στο σχέδιο 2.5. Επομένως, έχει χαμηλό συντελεστή απορρόφησης στις ενέργειες φωτονίων κοντά στην άκρη των ζωνών. Αυτό σημαίνει ότι ένα σχετικά μεγάλο πάχος του υλικού είναι απαραίτητο για να απορροφήσει το μακροχρόνιο μέρος μήκους κύματος του ηλιακού φάσματος.



Σχέδιο 2.5. Η ενέργεια της διεξαγωγής και το σθένος ενώνονται ως λειτουργία της ορμής κρυστάλλου για έναν έμμεσο ημιαγωγό. Η απορρόφηση στην ενέργεια χάσματος είναι μόνο δυνατή από την αλληλεπίδραση με phonons

Επανασυνδυασμός, διάρκεια ζωής μεταφορέων

Εάν οι «υπερβολικοί» μεταφορείς δαπανών δημιουργούνται σε έναν ημιαγωγό, είτε από την απορρόφηση του φωτός είτε από τα άλλα μέσα, η θερμική ισορροπία είναι διαταραγμένη, κατόπιν αυτοί οι υπερβολικοί μεταφορείς δαπανών πρέπει να εκμηδενιστούν αφότου η πηγή έχει σβηστεί. Αυτή η διαδικασία καλείται επανασυνδυασμός.

Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί για τον επανασυνδυασμό είναι ο επανασυνδυασμός της ακτινοβολίας και ο επανασυνδυασμός μέσω των επιπέδων ατέλειας.

Ο επανασυνδυασμός της ακτινοβολίας είναι όταν τα ηλεκτρόνια «πέφτουν πίσω» από τη ζώνη διεξαγωγής στη ζώνη σθένους, εκμηδενίζοντας κατά συνέπεια τον ίδιο αριθμό τρυπών. Η διαδικασία είναι το ακριβώς αντίστροφο στην απορρόφηση, και είναι σαφές ότι αυτή η ενέργεια επανασυνδυασμού πρέπει να αντιστοιχεί στην ενέργεια E_g του χάσματος ζωνών. Στο πυρίτιο, αυτός ο επανασυνδυασμός είναι εξίσου απίθανος όπως η απορρόφηση, το οποίο σημαίνει ότι οι έμμεσοι ημιαγωγοί πρέπει να έχουν μακροχρόνια διάρκεια ζωής μεταφορέων δαπανών. Στο πυρίτιο, ο κυρίαρχος μηχανισμός επανασυνδυασμού είναι μέσω των επιπέδων στο χάσμα. Είναι γνωστό ότι η διάρκεια ζωής στους ημιαγωγούς καθορίζεται πλήρως από την παρουσία ακαθαρσιών και ατελειών κρυστάλλου. Είναι εύλογο ότι ο συνυπολογισμός των ατόμων που δεν έχουν τη δομή ηλεκτρονίων ενός πεντασθενούς ή τρισθενούς υλικού πρόσμιξης θα δώσουν αφορμή για τα επίπεδα ατέλειας, με τα ενεργειακά επίπεδα που δεν χρειάζονται να πλησιάσουν στην άκρη της ζώνης. Μπορούν να βρεθούν βαθύτερα στην απαγορευμένη ζώνη και είναι συνεπώς αποκαλούμενες ως βαθιές ατέλειες. Το σχήμα 2.3 παρουσιάζει ένα μέγεθος των ενεργειακών επιπέδων για τις διαφορετικές ουσίες στο πυρίτιο. Αυτά τα επίπεδα ακαθαρσιών, αποκαλούμενα επίσης ως τα «επίπεδα παγίδων» φυσική επειδή είναι παγίδες για τους μεταφορείς δαπανών, καθορίζουν τον επανασυνδυασμό τους σε έναν υψηλό βαθμό. Για ένα ενεργειακό επίπεδο στην απαγορευμένη ζώνη, τέσσερις θεμελιώδεις διαδικασίες είναι δυνατές:

- ένα ηλεκτρόνιο καταλαμβάνεται από ένα μη κατειλημμένο ενεργειακό επίπεδο (1)
- ένα ηλεκτρόνιο εκπέμπεται από ένα κατειλημμένο επίπεδο στη ζώνη διεξαγωγής (2)
- μια τρύπα καταλαμβάνεται από ένα κατειλημμένο ενεργειακό επίπεδο (3)
- μια τρύπα εκπέμπεται σε ένα μη κατειλημμένο μέρος στη ζώνη σθένους (4).

Όσο πιο κοντά είναι τοποθετημένο ένα ενεργειακό επίπεδο στη μέση του χάσματος τόσο υψηλότερη είναι η αποδοτικότητά του ως κέντρο επανασυνδυασμού. Επιπλέον, οι ατομικές ιδιότητές του επιδρούν. Μπορούν να χαρακτηριστούν από τις διατομές σύλληψής του για τα ηλεκτρόνια και τις

τρύπες. Η ποιότητα ενός υλικού ημιαγωγών εκφράζεται από διάρκεια ζωής τ για τους μεταφορείς μειονότητας. Προφανώς, το καλό υλικό έχει μια μακροχρόνια διάρκεια ζωής. Για τα ηλιακά κύτταρα, σημαντικότερο είναι το μήκος L διάχυσης, το οποίο προέρχεται από τη διάρκεια ζωής. Είναι η απόσταση που ένας υπερβολικός μεταφορέας μπορεί να διανύσει από τη διάχυση πριν εκμηδενιστεί από τον επανασυνδυασμό. Μόνο το φως που απορροφάτε μέσα σε μια απόσταση περίπου του μήκους διάχυσης από τη σύνδεση PN μπορεί να συμβάλει στην ηλεκτρική παραγωγή. Τα κύτταρα υψηλής αποδοτικότητας πρέπει να έχουν ένα μήκος διάχυσης μεγαλύτερο από το πάχος των κυττάρων.

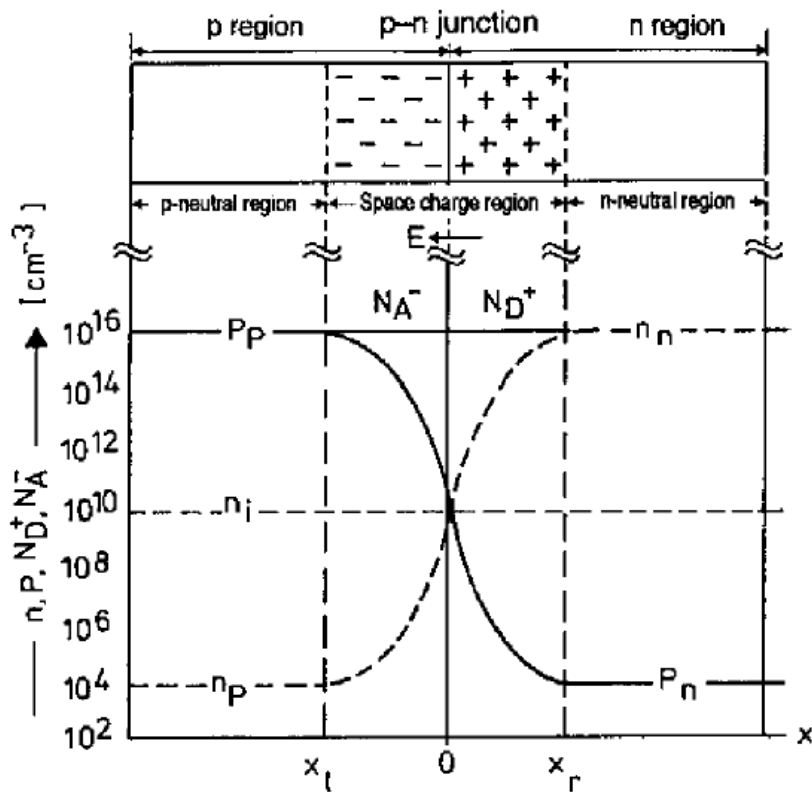
2.2 Το ηλιακό κύτταρο πυριτίου

Η φυσική των ηλιακών κυττάρων είναι η απλούστερη για τα κύτταρα κρυστάλλινου πυριτίου. Για να καταλάβουμε τη λειτουργία των ημιαγωγών καθώς και των ηλιακών κυττάρων, μια ακριβής κατανόηση των διαδικασιών μέσα σε μια σύνδεση PN απαιτείται. Η μονάδα βάσεων πολλών συσκευών ημιαγωγών είναι ένα σώμα ημιαγωγού, στο οποίο δύο διαφορετικά υλικά πρόσμιξης γειτονεύουν άμεσα το ένα με το άλλο. Αυτό αποκαλείται σύνδεση PN, εάν μια p -ναρκωμένη περιοχή συγχωνεύεται με μια n -ναρκωμένη περιοχή μέσα στο ίδιο δικτυωτό πλέγμα.

Σε ένα απλό παράδειγμα, υποθέτουμε ότι - στο πυρίτιο - και τα δύο υλικά πρόσμιξης είναι ίδιου μεγέθους και συγχωνεύονται μαζί απότομα. Το σχήμα 2.6 μπορεί να δείξει αυτή η συμπεριφορά. Η αριστερή πλευρά $x < 0$, παραδείγματος χάριν, θα ναρκώνονταν με τα άτομα βορίου με μια συγκέντρωση $N_A = 10^{16}$ άτομα ανά cm^{-3} , κάνοντας τον p -αγώγιμο. Η δεξιά πλευρά $x > 0$, αφ' ετέρου, θα μπορούσε να ναρκωθεί με τα άτομα φωσφόρου, $N_D = 10^{16} \text{cm}^{-3}$, κάνοντας τον n -αγώγιμο.

Οι ελεύθερα κινούμενοι μεταφορείς δαπανών δεν θα ακολουθήσουν την απότομη αλλαγή στη συγκέντρωση από το N_A στο N_D . Μάλλον, οι μεταφορείς θα διασκορπιστούν λόγω της διαφοράς στη συγκέντρωση, δηλ., οι τρύπες από την περιοχή p θα κινηθούν στην περιοχή n , και τα ηλεκτρόνια από την περιοχή n θα κινηθούν στην περιοχή p . Τα ρεύματα διάχυσης θα προκύψουν.

Οι ιονισμένοι αποδέκτες και οι χορηγοί, οι οποίοι δεν είναι πλέον ηλεκτρικά αντισταθμισμένοι, παραμένουν πίσω ως σταθερές δαπάνες διαστήματος (Σχέδιο 2.6). Οι αρνητικές δαπάνες θα προκύψουν στην αριστερή πλευρά στην περιοχή p, και οι θετικές δαπάνες προκύπτουν στη δεξιά πλευρά στην περιοχή n. Αντίστοιχα - όπως εμφανίζεται σε έναν πυκνωτή πιάτων - ένα ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται .



Σχέδιο 2.6. Νάρκωση και διανομή συγκέντρωσης μιας συμμετρικής σύνδεσης PN στη θερμική ισορροπία

στη σύνδεση PN, η οποία κατευθύνεται έτσι ώστε να οδηγεί τους διασκορπισμένους μεταφορείς δαπανών στην αντίθετη κατεύθυνση στη διάχυση.

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου δημιουργείται μια ισορροπία ή, με άλλα λόγια, μέχρι η ροή διάχυσης να αντισταθμιστεί από ένα ρεύμα τομέων ίσου μεγέθους. Ένα (εξαιρετικά μεγάλο) εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο υπάρχει - ακόμα κι αν και οι δύο πλευρές του ημιαγωγού στηρίζονται.

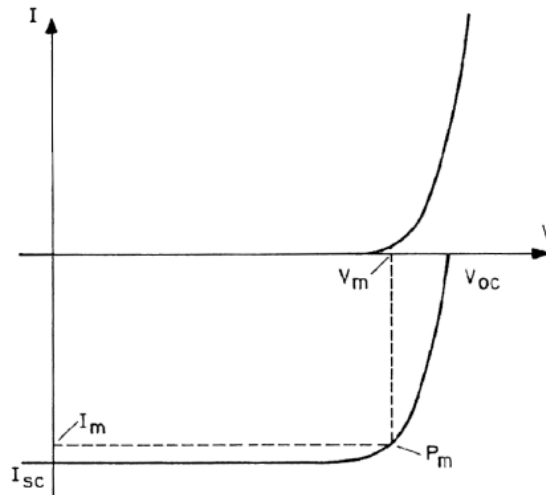
Όταν η σύνδεση PN φωτίζεται, τα ζευγάρια μεταφορέων δαπανών θα παραχθούν οπουδήποτε το φως απορροφάται. Ο ισχυρός τομέας στη σύνδεση τραβά τους μεταφορείς μειονότητας πέρα από τη σύνδεση και οδηγεί σε μια τρέχουσα ροή. Η συσκευή ημιαγωγών δεν είναι στη θερμική ισορροπία, και αυτό σημαίνει ότι η ηλεκτρική δύναμη μπορεί να παραδοθεί σε ένα φορτίο. Αυτό είναι ο βασικός μηχανισμός ενός ηλιακού κυττάρου. Ένα χαρακτηριστικό τέτοιο ηλιακό κύτταρο σύμφωνα με το σχ. 1.1 αποτελείται από μια σύνδεση PN, η οποία έχει ένα χαρακτηριστικό διόδων. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να προέλθει από την τυποποιημένη κατάσταση των στερεών στη φυσική.

Είναι:

$$I = I_0 (\exp(V_A/V_T) - 1) \quad (2.2)$$

όπου το I είναι το ρεύμα μέσω της διόδου στην εφαρμοσμένη τάση V_A . Το V_T είναι μια σταθερά, η αποκαλούμενη θερμική τάση. Το I_0 είναι το ρεύμα κορεσμού διόδων, το οποίο είναι ανάλογο με τον τύπο, την πυκνότητα, και την ποιότητα του υλικού ημιαγωγών και τη ποιότητα της σύνδεσης PN.

Εάν αυτή η σύνδεση είναι φωτισμένη, ένα πρόσθετο ρεύμα, I_L προστίθεται.



Σχέδιο 2.7. I-V-χαρακτηριστικό του ηλιακού κυττάρου χωρίς (κορυφή) και με φωτισμό.

Το V_m , I_m , και το P_m είναι τιμές στη μέγιστη δύναμη

$$I = I_0 (\exp (V_A/V_T) - 1) - I_L. \quad (2.3)$$

Η αρνητική κλίση (στο 2.3) προέρχεται από τις συνθήκες πολικότητας. Τώρα το τρέχον I δεν είναι πλέον μηδενικό σε μηδενική τάση αλλά μετατοπίζεται στο I_L . Η δύναμη μπορεί να διαχέεται σε ένα ηλεκτρικό φορτίο. Το I/V χαρακτηριστικό με και χωρίς φωτισμό παρουσιάζεται στο σχέδιο 2.7.

Αυτό το σχήμα καθορίζει επίσης τρεις σημαντικές ποσότητες:

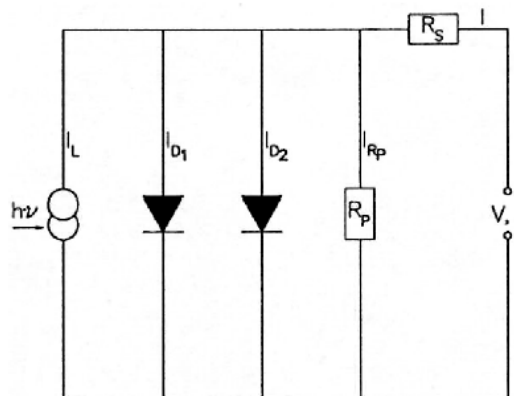
V_{oc} , την τάση ανοιχτού κυκλώματος,

I_{sc} , το ρεύμα βραχυκυκλώματος, που είναι ίδιο με το I_L

και το μέγιστο P_m όπου το προϊόν του V και I είναι στο μέγιστο. Αυτό είναι το βέλτιστο λειτουργικό σημείο του ηλιακού κυττάρου. Η τάση και το ρεύμα στο P_m είναι V_m και I_m . Είναι προφανές ότι το ιδανικό ηλιακό κύτταρο έχει ένα χαρακτηριστικό που πλησιάζει ένα ορθογώνιο. Ο παράγοντας αφθονίας $FF = I_m V_m / I_{sc} V_{oc}$ πρέπει να είναι κοντινός. Για τα πολύ καλά κρυστάλλινα ηλιακά κύτταρα πυριτίου, οι παράγοντες αφθονίας είναι επάνω από 0.8 ή 80%. Από το (2.3) μπορούμε επίσης να αναγνωρίσουμε τη σημασία του ρεύματος κορεσμού I_0 . Η τάση ανοικτών κυκλωμάτων λαμβάνεται όταν καθόλου ρεύμα

δεν προέρχεται από το κύτταρο. Κατόπιν: $V_{oc} = V_T \ln (I_L / I_0 + 1)$.
(2.4)

Ακόμη και στις χαμηλές πυκνότητες ρεύματος ο όρος I_L / I_0 είναι μεγάλος έναντι της μονάδος, έτσι διαπιστώνουμε ότι το $V_{oc} \approx V_T \ln(I_{sc}/I_0)$ δηλ., η τάση ανοικτών κυκλωμάτων είναι ανάλογη προς το λογάριθμο του όρου I_{sc} προς το I_0 . Αυτό σημαίνει ότι αν και το I_0 είναι μια πολύ μικρή ποσότητα έναντι του I_L , το χαμήλωμα του ρεύματος κορεσμού είναι πολύ κρίσιμο για την αύξηση της αποδοτικότητας. Από τη φυσική ηλιακών κυττάρων μπορεί να παραχθεί ότι υπάρχουν τρεις πηγές για I_0 :
α) ρεύμα διαρροής μεταφορέων μειονότητας από την περιοχή εκπομπών,
β) ένα ρεύμα διαρροής μεταφορέων μειονότητας από την περιοχή βάσεων, και
γ) ένα ρεύμα διαστήματος επανασυνδυασμού δαπανών.



Σχέδιο 2.8. Ισοδύναμο κύκλωμα του ηλιακού κυττάρου με το πρότυπο δύο διόδων.

Με αυτά τα συστατικά ένα ισοδύναμο κύκλωμα ενός ηλιακού κυττάρου μπορεί να κατασκευαστεί. Περιέχει όλα τα σχετικά συστατικά. Αυτά είναι: μια

τρέχουσα πηγή ην ρεύματος I_L λόγω του προσπίπτοντος φωτός, και δύο ρεύματα κορεσμού διόδων I_{D1} και I_{D2} . Το ρεύμα κορεσμού πρέπει να αντιπροσωπευθεί από δύο διόδους επειδή το ρεύμα επανασυνδυασμού δαπανών έχει μια διαφορετική εξάρτηση στην τάση από τα άλλα δύο ρεύματα. Τα άλλα συστατικά είναι ανθεκτικής φύσης, μια παράλληλη αντίσταση R_P (διακλαδώσεων) και μια αντίσταση σειράς R_S . Προφανώς, το R_P πρέπει να είναι υψηλό και το R_S όσο το δυνατόν χαμηλότερο.

Αποδοτικότητα

Η αποδοτικότητα μετατροπής είναι η σημαντικότερη ιδιότητα ενός ηλιακού κυττάρου. Ορίζεται ως η αναλογία της φωτοβολταϊκά παραγμένης ηλεκτρικής παραγωγής του κυττάρου προς την δύναμη ακτινοβολίας:

$$\eta = I_m V_m / P_{\text{light}} = FF I_{sc} V_{oc} / P_{\text{light}}$$

όπου το FF είναι ο παράγοντας αφθονίας $V_m/I_m/V_{oc}/I_{sc}$ όπως περαιτέρω εξηγείται στο κεφάλαιο 6.1.2. Η αποδοτικότητα μετριέται υπό τυποποιημένους όρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 Πυρίτιο Ηλιακό Κύτταρο Υλικό και Τεχνολογία

3.1 Υλικό πυριτίου

Εκτός από το οξυγόνο, το πυρίτιο είναι το αφθονότερο στοιχείο στην επιφάνεια της γης. Σχεδόν πάντα εμφανίζεται με οξειδωμένη μορφή ως διοξείδιο πυριτίου, όπως στο χαλαζία ή την άμμο. Στη διαδικασία καθαρισμού, SiO_2 θερμαίνεται σε περίπου 1800°C μαζί με τον άνθρακα. Το μεταλλουργικό πυρίτιο βαθμού που προκύπτει από αυτήν την διαδικασία χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες στις βιομηχανίες σιδήρου και αργιλίου. Δεδομένου ότι είναι μόνο περίπου 98% καθαρό, δεν είναι κατάλληλο ως υλικό ημιαγωγών και πρέπει να καθαριστεί περαιτέρω. Αυτό γίνεται με τη μεταφορά του στο τριχλωροσιλάνιο (SiHCl_3), το οποίο είναι ένα πτητικό υγρό. Αυτό το υγρό αποστάζεται και μειώνεται στη συνέχεια από το αντίδρασης με μια καυτή επιφάνεια του πυριτίου, η διαδικασία Siemens. Εκείνες οι δύο διαδικασίες απαιτούν μια ιδιαίτερη εισαγωγή της ενέργειας και είναι η σημαντικότερη συμβολή στο ενεργειακό περιεχόμενο των ηλιακών κυττάρων πυριτίου.

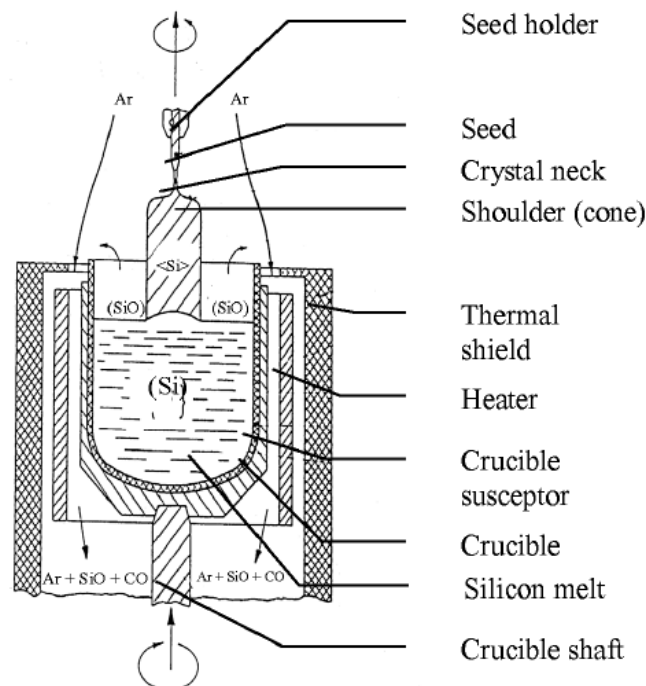
3.2 Monocrystalline και Multicrystalline πυρίτιο

3.2.1 Το πρόβλημα ανεφοδιασμού πυριτίου

Στην αρχή, μόνο (CZ) τα αυξημένα ενιαία κρύσταλλα Czochralski χρησιμοποιήθηκαν για τα ηλιακά κύτταρα. Αυτό το υλικό διαδραματίζει ακόμα έναν σημαντικό ρόλο. Το σχήμα 3.1 παρουσιάζει την αρχή αυτής της τεχνικής αύξησης. Το πολυκρυσταλλικό υλικό υπό μορφή τεμαχίων που λαμβάνονται από το ιδιαίτερα καθαρισμένο πολυπυρίτιο τοποθετείται σε μία χοάνη χαλαζία που η ίδια βρίσκεται σε μια χοάνη από γραφίτη και λειώνουν κάτω από τα αδρανή αέρια με τη θέρμανση επαγωγής. Ένα κρύσταλλο σπόρου βυθίζεται και αποσύρεται αργά κάτω από την περιστροφή. Σε κάθε βύθιση του

κρυστάλλου σπόρου στο λειωμένο μέταλλο, οι εξαρθρώσεις παράγονται στο κρύσταλλο σπόρου ακόμα κι αν ήταν η εξάρθρωση ελεύθερη πριν. Για να λάβει μία εξάρθρωση-ελεύθερο τμήμα, ένας λεπτός λαιμός κρυστάλλου περίπου 3mm στη διάμετρο πρέπει να αυξηθεί με μια ταχύτητα αύξησης διάφορων χιλιοστών ανά λεπτό. Το ελεύθερο κράτος εξάρθρωσης είναι μάλλον σταθερό, και οι μεγάλες διαμέτροι κρυστάλλου μπορούν να αυξηθούν παρά τις υψηλές παγωμένες πιέσεις στα μεγάλα κρύσταλλα.

Σήμερα, τα κρύσταλλα με τις διαμέτρους 30 εκατ. και περισσότερο αυξάνονται συνήθως για η αγορά ημιαγωγών. Για τα ηλιακά κύτταρα τα κρύσταλλα μικρότερων διαμέτρων αυξάνονται επειδή οι συνηθισμένες διαστάσεις ηλιακών κυττάρων είναι 10 εκατ. από 10 εκατ. ή μερικές φορές



Σχέδιο 3.1. Αρχή της τεχνικής αύξησης Czochralski

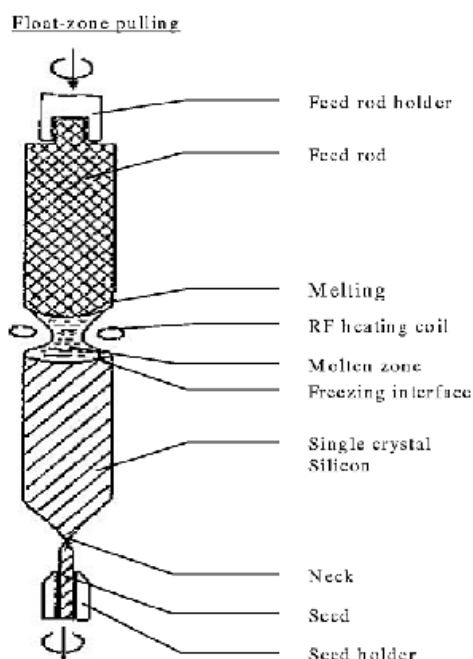
από 15 εκατ. Τα στρογγυλά κρύσταλλα διαμορφώνονται συνήθως σε τετράγωνα με στρογγυλεμένες γωνίες προκειμένου να γίνεται μια καλύτερη χρήση της περιοχής ενότητας.

Το λειωμένο μέταλλο πυριτίου αντιδρά με κάθε υλικό σε μεγάλο βαθμό. Μόνο το πυρίτιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό χοανών, επειδή το προϊόν αντίδρασής του, μονοξειδίο πυριτίου, εξατμίζει εύκολα από το λειωμένο μέταλλο. Εντούτοις, τα czochralski-αυξημένα κρύσταλλα περιέχουν 1017-1018 cm⁻³ κυρίως του διάμεσου οξυγόνου. Μια εναλλακτική τεχνική αύξησης κρυστάλλου είναι η τεχνική ζώνης επιπλεόντων σωμάτων (3.2). Μια ράβδος του στερεού, ιδιαίτερα καθαρισμένου αλλά πολυκρυσταλλικού πυριτίου λιώνει από την επαγωγή θερμότητας και ένα ενιαίο κρύσταλλο τραβιέται από αυτήν την λειωμένη ζώνη. Αυτό το υλικό είναι εξαιρετικής αγνότητας, επειδή καμία χοάνη δεν απαιτείται, αλλά είναι δαπανηρότερη από το υλικό Czochralski (του CZ). Επομένως, έχει μια πολύ χαμηλή μόλυνση οξυγόνου που δεν μπορεί να αποφευχθεί με το υλικό του CZ λόγω της χοάνης χαλαζία. Το υλικό ζώνης επιπλεόντων σωμάτων (Fz) χρησιμοποιείται συχνά σε R & D work. Τα ηλιακά κύτταρα αποδοτικότητας αρχείων έχουν κατασκευαστεί με το υλικό ζώνης επιπλεόντων σωμάτων, αλλά είναι πάρα πολύ ακριβό για την κανονική παραγωγή ηλιακών κυττάρων, όπου το κόστος είναι εξαιρετικά σημαντικής σπουδαιότητας.

Μια ενδιαφέρουσα νέα ανάπτυξη αφορά τα tricrystals [14]. Αυτά είναι στρογγυλά κρύσταλλα που αποτελούνται από τρία ενιαία κρύσταλλα τοποθετημένα όπως τα κομμάτια μιας πίτας. Μπορούν να αυξηθούν πολύ γρηγορότερα και να έχουν την υψηλότερη μηχανική σταθερότητα. Τα ηλιακά κύτταρα του πάχους 0.1mm μπορούν να κατασκευαστούν με μια αποταμίευση 40% του υλικού.

Για τα ηλιακά κύτταρα, καθώς επίσης και για όλες τις άλλες συσκευές, οι ράβδοι κρυστάλλου χωρίζονται στις γκοφρέτες του πάχους 0.2mm 0.5mm με πριονισμό. Αυτό είναι μία δαπανηρή επεξεργασία επειδή το πυρίτιο είναι ένα πολύ σκληρό υλικό που μπορεί μόνο να κοπεί με πριόνι με λεπίδες ντυμένες από διαμάντι. Η τυποποιημένη διαδικασία ήταν το πριόνι ID (εσωτερική

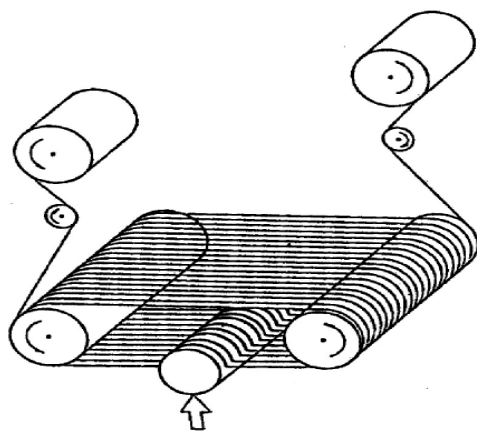
διάμετρος), όπου τα μέρη διαμαντιών συναρμολογούνται γύρω από μια τρύπα στο πριόνι.



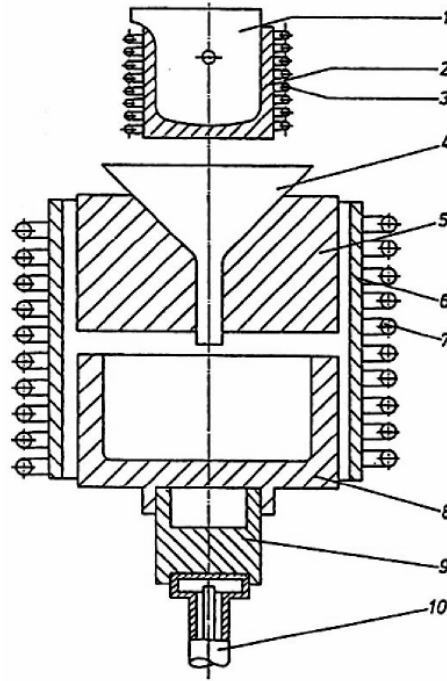
Σχέδιο 3.2. Αρχή της τεχνικής ζώνης επιπλεόντων σωμάτων λεπίδα.

Ένα μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι μέχρι 50% του υλικού χάνεται στη διαδικασία πριονίσματος. Μια νέα διαδικασία αναπτύχθηκε ειδικά για τις γκοφρέτες ηλιακών κυττάρων, το πολυσυρματικό πριόνι (3.3). Ένα καλώδιο μήκους αρκετών χιλιομέτρων κινείται διαμέσου του κρυστάλλου και βρέχεται από μια λειαντική αναστολή ταυτόχρονα τυλιγμένος από τη μια σπείρα στην άλλη. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι λεπτότερες γκοφρέτες μπορούν να παραχθούν και οι απώλειες από το πριόνισμα να μειώνονται κατά περίπου 30%. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι τα πριόνια καλωδίων επίσης χρησιμοποιούνται για άλλες συσκευές πυριτίου, ένα παράδειγμα της σύμπραξης σε αυτόν τον τομέα.

Μια άλλη τεχνολογία που χρονολογείται από τη δεκαετία του '70 είναι ρίψη φραγμών [15], η οποία αποφεύγει τη δαπανηρή διαδικασία τραβήγματος. Το πυρίτιο λειώνει και χύνεται σε μια τετράγωνη χοάνη γραφίτη (σχέδιο 3.4). Η ελεγχόμενη ψύξη παράγει έναν πολυκρυσταλλικό φραγμό πυριτίου με μια μεγάλη δομή σιταριού κρυστάλλου. Το μέγεθος σιταριού είναι μερικά χιλιοστάμετρα στα εκατοστόμετρα και οι φραγμοί πυριτίου πριονίζονται στις γκοφρέτες από το καλώδιο πριονίσματος, όπως προηγουμένως αναφέρεται. Το χυτό πυρίτιο, αποκαλούμενο επίσης πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, χρησιμοποιείται μόνο για τα ηλιακά κύτταρα και όχι για οποιεσδήποτε άλλες συσκευές ημιαγωγών. Είναι φτηνότερο από το υλικό ενιαίου κρυστάλλου, αλλά παράγει τα ηλιακά κύτταρα με μια κάπως χαμηλότερη αποδοτικότητα. Ένα πλεονέκτημα είναι ότι οι φραγμοί μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν στα τετράγωνα ηλιακά κύτταρα σε αντίθεση με τα τραβηγμένα κρύσταλλα, τα οποία είναι στρογγυλά.



Σχέδιο 3.3. Multi-wire να πριονίσει τη διαδικασία



Σχέδιο 3.4. Πετώντας συσκευές φραγμών

Είναι ευκολότερο να συγκεντρώσουμε τις γκοφρέτες multicrystalline στις ενότητες με σχεδόν πλήρη χρησιμοποίηση της περιοχής ενότητας. Κατά συνέπεια, η χαμηλότερη αποδοτικότητα του καλουπιού το υλικό τείνει να εξαφανιστεί στο επίπεδο ενότητας. Λόγω της επαφής με τη χοάνη, το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο έχει μια υψηλότερη περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες και έτσι χαμηλότερη διάρκεια ζωής μεταφορέων και χαμηλότερη αποδοτικότητα από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Σημείο ατελειών και ορίων σιταριού στην ίδια κατεύθυνση. Διάφορες τεχνικές έχουν επινοηθεί για να αφαιρεθούν τις ακαθαρσίες κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ηλιακών κυττάρων. Κινούμενες ακαθαρσίες μπορούν να τραβηχτούν στην επιφάνεια από συλλογή φωσφόρου [16], το οποίο εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της διάχυσης εκπομπών. Οι ακίνητες ατέλειες σημείου απενεργοποιούνται από την παθητικότητα υδρογόνου. Το ατομικό υδρογόνο μπορεί να διασκορπίσει στο πυρίτιο ακόμη και σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Οι επεξεργασμένες γκοφρέτες εκτίθενται στο ατομικό υδρογόνο που παράγεται σε πλάσματος απαλλαγής.

Ένα μεγάλο σημάδι ερώτησης για το μέλλον συσχετίζεται με την πηγή του ιδιαίτερα καθαρισμένου πυριτίου για τα ηλιακά κύτταρα. Πενήντα τοις εκατό του κόστους μιας ενότητας οφείλονται στο κόστος των επεξεργασμένων γκοφρετών πυριτίου. Η βιομηχανία PV στο παρελθόν έχει χρησιμοποιήσει το απορριματικό υλικό από τη βιομηχανία ημιαγωγών που ήταν διαθέσιμη με χαμηλότερο κόστος. Αυτό δημιούργησε μια εξάρτηση που είναι μόνο βιώσιμη εάν και οι δύο τομείς αυξάνονται στο ίδιο ποσοστό. Ένα πρόσθετο πρόβλημα είναι ότι η αγορά ημιαγωγών χαρακτηρίζεται από τους βίαιους κύκλους του βραχίονα και της πτώσης βάλλοντας σε μια σχετικά απότομη καμπύλη αύξησης. Στους χρόνους βραχιόνων, ο ανεφοδιασμός υλικών γίνεται σφιχτός και τιμές αυξάνονται. Αυτό συνέβη το 1998 όταν ακόμη και το υλικό απορριμάτων ήταν λίγο στον αριθμό και μερικοί κατασκευαστές ηλιακών κυττάρων έπρεπε να αγοράσουν τον κανονικό σε ημιαγωγό-βαθμό υλικό με υψηλό κόστος. Ένα από τα κλειδιά για τη μείωση δαπανών είναι να μειωθεί η περιεκτικότητα πυριτίου στο προϊόν. Οι παρούσες γραμμές προσέγγισης είναι η μείωση της απώλειας $kerf$ από το καλώδιο πριονίσματος και η χρήση των λεπτότερων γκοφρετών. Οι περισσότερες προηγμένες γραμμές παραγωγής χρησιμοποιούν γκοφρέτες του πάχους λιγότερο από 0.2mm. Οι λεπτότερες γκοφρέτες είναι επίσης επιθυμητές, επειδή εάν η σωστή τεχνολογία χρησιμοποιείται, η αποδοτικότητα αυξάνεται [17]. Εάν η παρούσα πρότυπη τεχνολογία είναι να συνεχιστεί η κυριαρχία της, ο αφιερωμένος το πυρίτιο ηλιακός-βαθμού θα πρέπει να αναπτυχθεί. Ακόμα κι αν μόνο ένα 15% ετήσιο το ποσοστό αύξησης της αγοράς υποτίθεται, θα υπάρξει μια έλλειψη 5.000 megatons μέχρι το 2010, το οποίο είναι δύο τρίτα της απαίτησης [18]. Προσπάθειες να παραχθεί τέτοιο το υλικό έχουν αναληφθεί στο παρελθόν αλλά δεν ήταν επιτυχείς για δύο λόγους: Οι απαιτήσεις αγνότητας για το ηλιακό πυρίτιο είναι πολύ υψηλές, επειδή, οι μεταφορές πρέπει να συλλεχθούν πέρα από τις μεγάλες αποστάσεις σε τέτοια ηλιακά κύτταρα. Αυτό απαιτεί την υψηλή διάρκεια ζωής μεταφορέων και επομένως εξαιρετικά χαμηλός συγκέντρωση των σχετικών ακαθαρσιών. Αυτή η κατάσταση επιδεινώνεται από τη συνεχιζόμενη τάση προς τις υψηλότερες αποδοτικότητες. Το δεύτερο σημείο είναι ότι η αφιερωμένη κατασκευή ηλιακού-βαθμού είναι οικονομική μόνο με την παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Η παρούσα αγορά θα έπρεπε να αυξηθεί από για έναν άλλο παράγοντα από

πέντε στην κατάταξη για να δικαιολογήσει τέτοια κατασκευή. Η Solar World AG ανήγγειλε πρόσφατα τα σχέδια 28,3 Υλικό και τεχνολογία ηλιακών κυττάρων πυριτίου για να οργανώσουν μια μεγάλη κλίμακα, εγκαταστάσεις παραγωγής 5.000 megatons για ηλιακό πυρίτιο που θα μπορούσε να κατασταθεί λειτουργικό μέσα σε μερικά έτη. Τα βήματα διαδικασίας είναι [18]:

– παραγωγή τριχλωροσιλάνιου από το τετραχλωρίδιο πυριτίου, υδροχλώριο, και υδρογόνο

– προ-καθαρισμός τριχλωροσιλάνιου και ανακύκλωση τετραχλωριδίου πυριτίου

– Ένα βήμα από την ανακύκλωση τριχλωροσιλάνιου και τετραχλωροσιλάνιου και την ανακατανομή τετραχλωριδίου πυριτίου

– λεπτός καθαρισμός πυριτίου

– θερμοκοιλιτικό αποσύνθεσης πυριτίου στους ηλιακούς κόκκους πυριτίου βαθμού στο α αντιδραστήρα ρευστών κρεβατιών.

3.3 Πυρίτιο RIBBON

Οι κορδέλλες του πυριτίου μπορούν να χυθούν ή να αυξηθούν με διάφορες τεχνικές. Ο στόχος της τεχνολογίας των κρυστάλλινων κορδελλών είναι να μειωθεί το κόστος με την εξάλειψη του δαπανηρού κόστους πριονίσματος πυριτίου και συγχρόνως να ελαχιστοποιήσουν το ποσό πυριτίου λόγω ενός μειωμένου πάχους στρώματος και αποβολής της απώλειας kerf. Να υποθέσει ικανοποιητικό η μαζική ποιότητα, οι προκύπτουσες κορδέλλες μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως γκοφρέτες για επεξεργασία ηλιακών κυττάρων. Εάν χαμηλής ποιότητας υλικά όπως το πυρίτιο μεταλλουργικός-βαθμού χρησιμοποιείται, μια επόμενη κρυσταλλική αύξηση από ένα ιδιαίτερα καθαρό ενεργό πυρίτιο το στρώμα είναι υποχρεωτικός. Σε αυτήν την περίπτωση, οι κορδέλλες χρησιμοποιούνται ως μηχανικό υπόστρωμα και σαν ηλεκτρικό αγωγό στο πίσω ηλεκτρόδιο.

Έχουν υπάρξει πολυάριθμες δραστηριότητες στη δεκαετία του '80 στον τομέα του πυριτίου αύξηση κορδελλών για τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Από τις πάνω από είκοσι διαφορετικές προσεγγίσεις που ήταν υπό έρευνα, μόνο δύο εμπορευματοποιούνται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 Ηλιακά κύτταρα και ηλιακές ενότητες

4.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες και χαρακτηριστικά των ηλιακών κυττάρων

Το ηλιακό κύτταρο είναι ένα ηλεκτρικό εξάρτημα με μερικές ιδιότητες που διαφέρουν εμφανώς από αυτές των «συνήθων» πηγών ενέργειας. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών των ηλιακών κυττάρων είναι εντούτοις μια προϋπόθεση για το σχεδιασμό και τη διαστασιολογία μιας φωτοβολταϊκής παροχής ηλεκτρικού ρεύματος για τις αυτόνομες συσκευές ή τα διασυνδεδεμένα συστήματα, για την επίτευξη της αξιόπιστης εγκατάστασης, και ιδιαίτερα, για την ανίχνευση των λαθών και τη προμήθεια των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επιπλέον, αυτό επιτρέπει στις δυνατότητες και τα όρια μιας φωτοβολταϊκής παροχής ηλεκτρικού ρεύματος να αναγνωριστούν και εξασφαλίζει έτσι εκείνες τις πληροφορίες στους ενδεχόμενους πελάτες και οι χρήστες είναι καλά ενημερωμένοι.

Στα επόμενα κεφάλαια, τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των ηλιακών κυττάρων πυριτίου των ηλιακών ενοτήτων θα παρουσιαστούν.

4.1.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες των ηλιακών κυττάρων

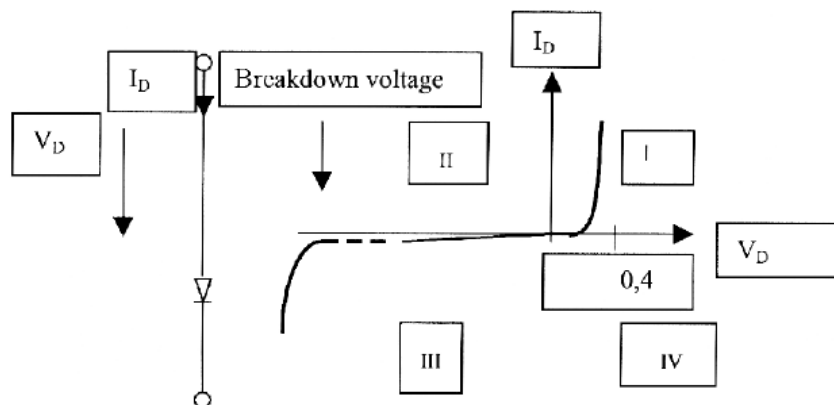
Η διατομή μέσω ενός κρυστάλλινου ηλιακού κυττάρου που δίνεται στο σχέδιο 1.1 δείχνει ότι είναι σε γενικές γραμμές μια δίοδος πυριτίου μεγάλης περιοχής. Στο σκοτεινό τμήμα, η χαρακτηριστική καμπύλη αυτής της διόδου αντιστοιχεί απαραίτητα στη γνωστή καμπύλη μιας κανονικής διόδου (σχέδιο 6.1). (Δείτε

επίσης το σχέδιο 2.7 στο κεφ. 2, το οποίο παρουσιάζει μόνο το πρώτο τεταρτημόριο του χαρακτηριστικού.)

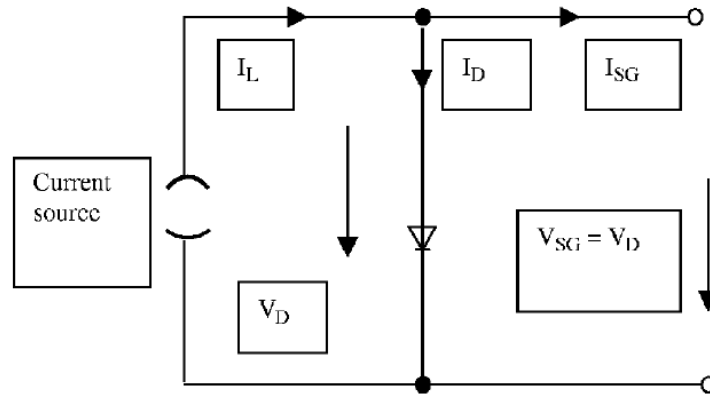
Στην εμπρόσθια κατεύθυνση (τεταρτημόριο I), σχεδόν κανένα ρεύμα δεν ρέει αρχικά στις χαμηλές τάσεις, αλλά επάνω από μια τάση $\approx 0.4-0.6 \text{ V}$ αυξάνεται γρήγορα. Στην αντίστροφη κατεύθυνση (τεταρτημόριο III), η τρέχουσα ροή εμποδίζεται μέχρι ένα ορισμένο όριο τάσης (για τα ηλιακά κύτταρα, μερικές δεκάδες βολτ), στο οποίο η δίοδος «αναλύεται» δηλ., γίνεται αγώγιμη - γενικά αυτό οδηγεί στην καταστροφή του εξαρτήματος. Σε αντίθεση, ένα εξωτερικά προκληθέν ρεύμα πολύ μεγαλύτερο από το εκτιμημένο ρεύμα στην μπροστινή κατεύθυνση δεν προκαλεί προβλήματα.

Όπως περιγράφεται ήδη στο κεφ. 2, ο φωτισμός του ηλιακού κυττάρου δημιουργεί ελεύθερους μεταφορείς δαπανών, οι οποίοι επιτρέπουν στο ρεύμα να διατρέξει μέσω ενός συνδεδεμένου φορτίου.

Ο αριθμός ελεύθερων μεταφορέων δαπανών που δημιουργούνται είναι ανάλογος προς τη συναφή ένταση ακτινοβολίας, έτσι ώστε το φωτορεύμα (I_L) που παράγεται εσωτερικά στο ηλιακό κύτταρο



Σχέδιο 4.1. Σύμβολο και τρέχων-τάση διαγραμμάτων κυκλωμάτων χαρακτηριστικά για μια δίοδο πυριτίου. (Ο υπογεγραμμένος Δ αναφέρεται στη δίοδο)



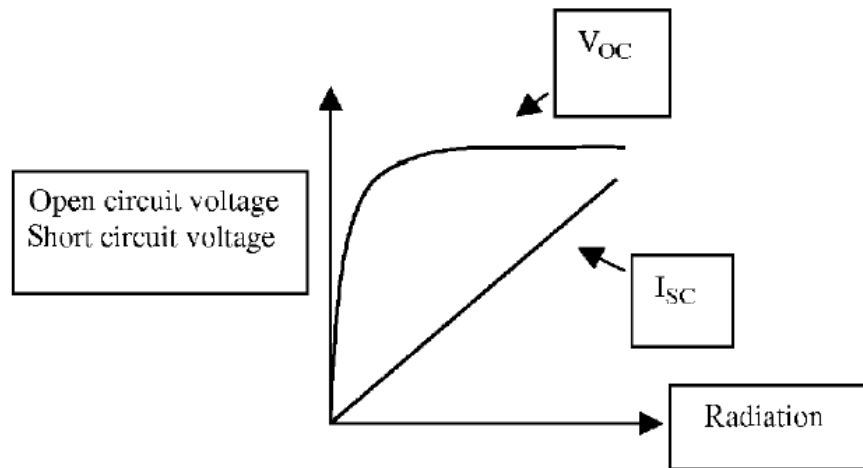
Σχέδιο 4.2. Απλουστευμένο ισοδύναμο διάγραμμα κυκλωμάτων για ένα ηλιακό κύτταρο. (Το SG υπογεγραμμένων αναφέρεται στην ηλιακή γεννήτρια)

να είναι επίσης ανάλογος προς την ένταση ακτινοβολίας. Κατά συνέπεια, το απλουστευμένο ισοδύναμο διάγραμμα κυκλωμάτων που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιπροσωπεύσει ένα ηλιακό κύτταρο.

Αποτελείται από τη δίοδο που δημιουργείται από τη σύνδεση PN και μια τρέχουσα πηγή, με το μέγεθος του ρεύματος ανάλογα με την πυκνότητα ακτινοβολίας. Όπως παρουσιάζεται στο κεφ. 2, ένα πιο ακριβές πρότυπο δουλεύει με δύο διόδους με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες (σχήμα 2.8).

4.1.2 χαρακτηριστικά των ηλιακών κυττάρων

Στη συνέχεια, οι ποσότητες που χρειάζονται να χαρακτηρίσουν και τα ηλιακά κύτταρα και τις ηλιακές ενότητες θα εξηγηθούν χρησιμοποιώντας τα κρυστάλλινα ηλιακά κύτταρα για παράδειγμα, αλλά το σχέδιο ισχύει επίσης σε άλλους τύπους ηλιακών κυττάρων.



Σχέδιο 4.3. Τάση ανοικτών κυκλωμάτων και ρεύμα βραχυκυκλώματος ως λειτουργία της έντασης ακτινοβολίας

Ρεύμα βραχυκυκλώματος

Όπως αναφέρεται ανωτέρω, το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} είναι ανάλογο προς την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα ευρύ φάσμα (σχεδιο 4.3). Επίσης, το ρεύμα βραχυκυκλώματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία των κυττάρων. Αυξάνεται για τα κρυστάλλινα ηλιακά κύτταρα πυριτίου κατά περίπου 0.05 - 0.07% Kelvin και για τις άμορφες ενότητες πυριτίου κατά περίπου 0.02% Kelvin (1 Kelvin αντιστοιχεί σε μια διαφορά θερμοκρασίας 1°C). Ο συντελεστής χαμηλότερης θερμοκρασίας των άμορφων ενοτήτων είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους αυτοί εκτελούνται καλύτερα από τις κρυστάλλινες ενότητες τους καυτούς θερινούς μήνες.

Τάση ανοικτών κυκλωμάτων

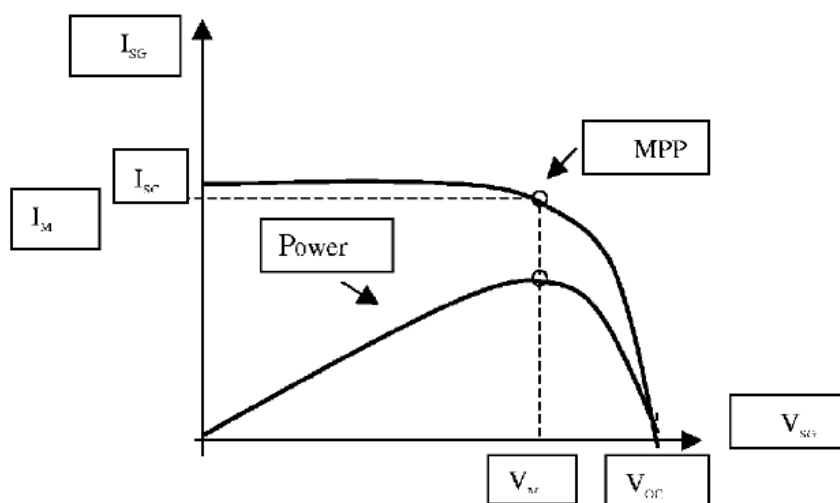
Η τάση ανοικτών κυκλωμάτων ή το V_{oc} αντιστοιχεί στην τάση πέρα από την εσωτερική δίοδο, όταν οι συνολικές παραγμένες φωτόρευματος ρέουν μέσω

αυτής της διόδου. Σύμφωνα με το σχέδιο 2.4, η τάση αυξάνεται πολύ γρήγορα με το φωτισμό έως ότου φθάνει σε μια κοντινή αξία κορεσμού. Σε αυτό το σημείο, αυξάνεται πολύ αργά ως $\ln(I_L/I_0)$. Πολύ συχνά αυτή η αύξηση δεν φαίνεται λόγω εσωτερικών και εξωτερικών αντιστάσεων

(σχέδιο 4.3). Τα κρυστάλλινα ηλιακά κύτταρα πυριτίου φθάνουν σε μια χαρακτηριστική τιμή 0.5-0.6V και τα κύτταρα άμορφου πυριτίου 0.6-0.9 V.

Ενώ η τάση ανοικτών κυκλωμάτων και επίσης η τάση του σημείου εργασίας μπορεί να είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την τιμή της ακτινοβολίας για χαρακτηριστικά υψηλές εντάσεις υπαίθριως, αυτές οι τάσεις μειώνονται έντονα σε ένα «φτωχά» αναμμένο εσωτερικό δωμάτιο με τις εντάσεις μόνο μερικά W/m^2 .

Επιπλέον, η τάση ανοικτών κυκλωμάτων, και επίσης η τάση σημείου εργασίας, εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς τα ηλιακά κύτταρα που είναι εγκατεστημένα υπαίθρια μπορεί να φθάσουν θερμοκρασίες, ανάλογα με την εγκατάσταση (π.χ., δυνατότητες για εξαερισμό), μέχρι 40 K υψηλότερα από θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχέδιο 4.4. Καμπύλη ισχύος με το σημείο μέγιστης τιμής της (MPP).

Δύναμη

Η ισχύς που παραδίδεται από ένα ηλιακό κύτταρο είναι το προϊόν του ρεύματος και της τάσης. Εάν ο πολλαπλασιασμός γίνεται, σημείο επί σημείο, για όλες τις τάσεις από το βραχυκύκλωμα στους ανοιχτούς όρους, η καμπύλη δύναμης που επεξηγείται στο σχ. 4.4 λαμβάνεται για ένα δεδομένο επίπεδο ακτινοβολίας.

Αν και το ρεύμα έχει μέγιστο στο σημείο βραχυκυκλώματος, η τάση είναι μηδέν και η δύναμη είναι επίσης μηδέν. Η κατάσταση για το ρεύμα και η τάση αντιστρέφεται στο σημείο ανοικτών κυκλωμάτων, ώστε ξανά η δύναμη να είναι εδώ μηδέν. Εν τω μεταξύ, υπάρχει ένας ιδιαίτερος συνδυασμός ρεύματος και τάσης για τον οποίο η δύναμη φθάνει σε ένα μέγιστο (γραφικά η περιοχή του ορθογωνίου). Αυτό είναι το μέγιστο Power Point ή MPP (δείτε την επόμενη παράγραφο).

Μέγιστο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP)

MPP του ηλιακού κυττάρου (αντίστοιχα, η ηλιακή ενότητα ή η ηλιακή γεννήτρια) τοποθετείται κοντά στην κάμψη στην καμπύλη που παρουσιάζεται στο σχέδιο 4.4. Οι αντίστοιχες τιμές του V_M και I_M μπορούν να υπολογιστούν από την τάση ανοικτών κυκλωμάτων και το ρεύμα βραχυκυκλώματος:

$$V_M \sim (0.75-0.9) V_{oc}$$

$$I_M \sim (0.85-0.95) I_{sc}$$

Επειδή η τάση και το ρεύμα των κυττάρων εξαρτώνται από τη θερμοκρασία η παρεχόμενη ισχύς επίσης αλλάζει με τη θερμοκρασία. Η δύναμη των κρυστάλλινων ηλιακών κυττάρων πυριτίου πέφτει για περίπου 0.4-0.5% K και η δύναμη των άμορφων ηλιακών ενοτήτων πυριτίου πέφτει για περίπου 0.2-0.25% K.

Η εκτιμημένη δύναμη ενός ηλιακού κυττάρου ή μιας ηλιακής ενότητας μετριέται υπό τους διεθνώς διευκρινισμένους όρους δοκιμής (STC = τυποποιημένοι όροι δοκιμής) με τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Ένταση ακτινοβολίας - 1.000 W/m^2
- Θερμοκρασία του ηλιακού κυττάρου - 25°C
- Μάζα αέρα - 1.5^1

Η εκτιμημένη δύναμη αναφέρεται στο W_p (μέγιστα Watt). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συνηθέστερος όρος «μέγιστη δύναμη» είναι παραπλανητικός, επειδή σε χαμηλότερη θερμοκρασία κυττάρων ή υψηλότερες εντάσεις ακτινοβολίας η αναφερόμενη αξία μπορεί να ξεπερνιέται. Συνήθως, εντούτοις, οι ενότητες λειτουργούν σε πολύ χαμηλότερη ακτινοβολία.

Αξία αποδοτικότητας

Μόνο μέρος του ηλιακού γεγονότος ακτινοβολίας στο ηλιακό κύτταρο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η αναλογία της ηλεκτρικής ενέργειας παραγωγής στην ηλιακή ακτινοβολία εισαγωγής ορίζεται ως η αξία αποδοτικότητας. Εξαρτάται από τον τύπο κυττάρου .

Για την αξία αποδοτικότητας ενότητας, η δύναμη παραγωγής διαιρείται με το σύνολο της ακτινοβολίας στην ενότητα. Επειδή ολόκληρος ο τομέας της ενότητας δεν είναι καλυμμένος με τα ηλιακά κύτταρα (παραδείγματος χάριν, τα πλαίσια και το διάστημα μεταξύ των ενιαίων ηλιακών κυττάρων δεν είναι ενεργή περιοχή), η αξία αποδοτικότητας της ενότητας είναι χαμηλότερη από την αξία αποδοτικότητας του μονού κυττάρου.

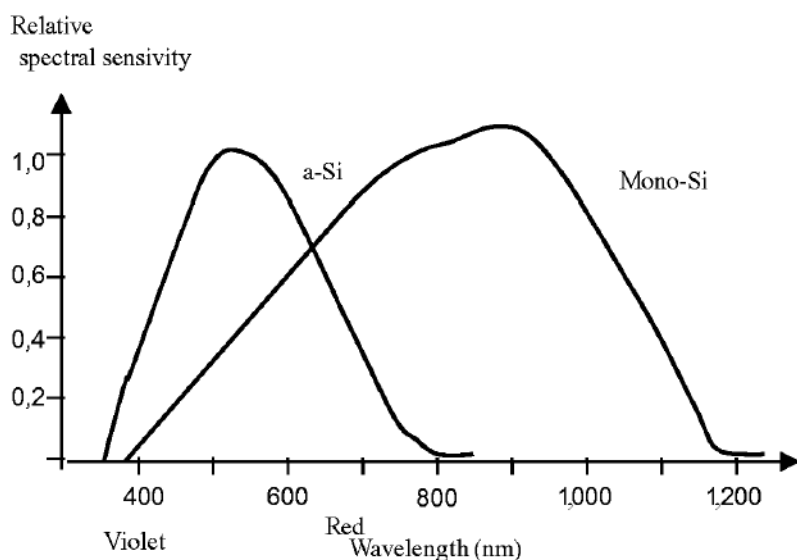
Φασματική ευαισθησία

Ανάλογα με την τεχνολογία και το υλικό που χρησιμοποιείται, τα ηλιακά κύτταρα ποικίλλουν στην ευαισθησία στις διαφορετικές φασματικές σειρές της συναφούς ακτινοβολίας. Σαν παράδειγμα, το σχέδιο 6.5 επεξηγεί τη σχετική φασματική ευαισθησία (ή τη φασματική απάντηση) μιας άμορφης ηλιακής ενότητας πυριτίου και ενός κρυστάλλινου πυριτίου ηλιακό κύτταρο. Μπορεί να

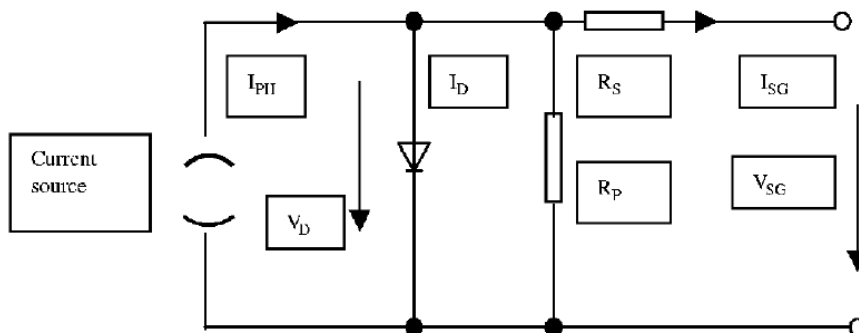
φανεί ότι το τελευταίο, έχει μια υψηλότερη ευαισθησία στη σειρά μεγάλα μήκη κύματος, ενώ η άμορφη ενότητα πυριτίου είναι η πιο ευαίσθητη ορατή φασματική σειρά. Όπως παρουσιάστηκε η απορρόφηση διαφορετικών μηκών κύματος εξαρτώνται από το χάσμα ζωνών του υλικού των ηλιακών κυττάρων.

Fill Factor (Παράγοντας Αφθονίας)

Το απλουστευμένο ισοδύναμο διάγραμμα κυκλωμάτων, που φαίνεται στο σχέδιο 4.2 , για να εξηγήσει τη θεμελιώδη συμπεριφορά των κρυστάλλινων ηλιακών κυττάρων πυριτίου, πρέπει να τροποποιηθεί συμπεριλαμβάνοντας δύο αντιστάτες για μια ακριβέστερη περιγραφή. Ο αντιστάτης σειράς R_s αποτελείται από την αντίσταση μέσω της wafer πυριτίου, η αντίσταση της επαφής στην πίσω επιφάνεια και το πλέγμα επαφών στην μπροστινή επιφάνεια, και, περαιτέρω, η αντίσταση κυκλωμάτων από τις συνδέσεις και τα τερματικά. Ο παράλληλος αντιστάτης R_p προκύπτει, ιδιαίτερα, από τα ρεύματα απώλειας στις άκρες ανομοιογένειες των ηλιακών κυττάρων και της επιφάνειας (σχέδιο 4.6).



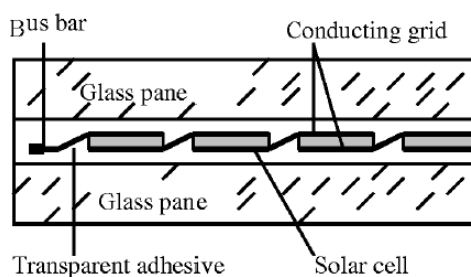
Σχέδιο 4.5. Σχετική φασματική ευαισθησία (φασματική απάντηση) μιας άμορφης ηλιακής ενότητας πυριτίου και ενός κρυστάλλινου ηλιακού κυττάρου



Σχέδιο 4.6. Εκτεταμένο ισοδύναμο διάγραμμα κυκλωμάτων για ένα κρυστάλλινο ηλιακό κύτταρο πυριτίου. Το SG αναφέρεται στην ηλιακή γεννήτρια

Και οι δύο αντιστάτες καθιστούν τη χαρακτηριστική καμπύλη λιγότερο ορθογώνια, και η μέγιστη παραγωγή δύναμης μειώνεται. Ένα περαιτέρω μέτρο για την ποιότητα ενός κρυστάλλινου ηλιακού κυττάρου πυριτίου είναι επομένως ο παράγοντας αφθονίας (FF), ο οποίος περιγράφει πόσο πολύ η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης προσεγγίζει την ιδανική μορφή ορθογωνίων, σχέδιο 2.5.

Ο παράγοντας αφθονίας για τα κρυστάλλινα ηλιακά κύτταρα πυριτίου είναι περίπου 0.7 έως 0.8, και ο παράγοντας αφθονίας των άμορφων ηλιακών ενότητων πυριτίου είναι περίπου 0.5 έως 0.7.



Σχέδιο 4.7. Διατομή μέσω μιας χαρακτηριστικής ενότητας των κρυστάλλινων ηλιακών κυττάρων πυριτίου

4.2 Τεχνολογίες ενότητας

Ένα ενιαίο κρυστάλλινο ηλιακό κύτταρο πυριτίου με μια έκταση επιφάνειας περίπου 100 τ.εκ. παράγει ρεύμα 3A σε μια τάση 0.5V όταν εκτίθεται σε πλήρη ηλιοφάνεια. Μέχρι πέντε έτη πριν, η χαρακτηριστική ενότητα PV φτιαγμένη από κρυστάλλινο πυρίτιο αποτελείτο από 30 έως 36 κύτταρα που συνδέθηκαν σωρηδόν με μια μέγιστη δύναμη περίπου 50 W. Σήμερα, οι ενότητες με μια μέγιστη δύναμη μέχρι 300W εμπορευματοποιούνται. Μια τέτοια ενότητα αποτελείται από περισσότερα από 100 ηλιακά κύτταρα που συνδέονται σε σειρές και παράλληλα. Περισσότερες πληροφορίες για τις αρχές σύνδεσης των ηλιακών κυττάρων και των ηλιακών ενοτήτων θα δούμε στο κεφ. 5.

Στην περίπτωση των λεπτών υλικών (π.χ., άμορφο πυρίτιο ή δισεληνιούχο ίνδιο χαλκού), πλήρεις ενότητες κατασκευάζονται. Έτσι το προαναφερθέν βήμα από το ενιαίο ηλιακό κύτταρο σε μια ηλιακή ενότητα δεν είναι απαραίτητο.

Μια διατομή μέσω μιας χαρακτηριστικής ενότητας των κρυστάλλινων ηλιακών κυττάρων πυριτίου παρουσιάζεται στο σχέδιο 4.7. Τα κορυφαία στρώματα της ενότητας είναι διαφανή. Το πιο ακραίο στρώμα, το γυαλί κάλυψης, προστατεύει την υπόλοιπη δομή από το περιβάλλον. Κρατά έξω το νερό, τους υδρατμούς, και οι αεριώδεις ρύποι που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τη διάβρωση ενός κυττάρου εάν μπορούσαν να διαπεράσουν την ενότητα κατά τη διάρκεια της μακροχρόνιας υπαίθριας χρήσης του. Το γυαλί κάλυψης συχνά σκληρύνεται για να προστατεύσει το κύτταρο από τη ζημία χαλαζιού ή αέρα. Μια διαφανής κόλλα κρατά το γυαλί στο κύτταρο. Το ίδιο το κύτταρο καλύπτεται συνήθως με ένα ανταντανακλαστικό επίστρωμα. Μερικοί κατασκευαστές χαράζουν ή σημαδεύουν την επιφάνεια των κυττάρων για να μειώσουν περαιτέρω την αντανάκλαση.

Το κατώτατο στρώμα του κυττάρου καλείται «πίσω επαφή» και είναι μια μεταλλική ταινία, η οποία σε συνδιασμό με την μπροστινή επαφή δημιουργεί μια γέφυρα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Η πίσω πλευρά της ενότητας καλύπτεται είτε με ένα στρώμα Tedlar™, είτε του γυαλιού, όπως φαίνεται στο σχέδιο 4.7. Συχνά ένα πλαίσιο αργιλίου ή του σύνθετου υλικού δίνει στην

ενότητα την αναγκαία μηχανική σταθερότητα για τη τοποθέτηση με διαφορετικούς τρόπους .

Ένα ενιαίο κρυστάλλινο ηλιακό κύτταρο πυριτίου παράγει ηλεκτρική δύναμη σε μια σειρά 1.5Wp το μέγιστο μόνο. Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, αυτό δεν είναι αρκετό. Επομένως, είναι απαραίτητο να διασυνδεθούν ορισμένα ηλιακά κύτταρα σε μια ηλιακή ενότητα. Ανάλογα με τη σειρά δύναμης μιας ενότητας PV, η σύνδεση από τα χωριστά ηλιακά κύτταρα μπορεί να πραγματοποιηθεί σωρηδόν μόνο ή και τα δύο σωρηδόν και παράλληλα.

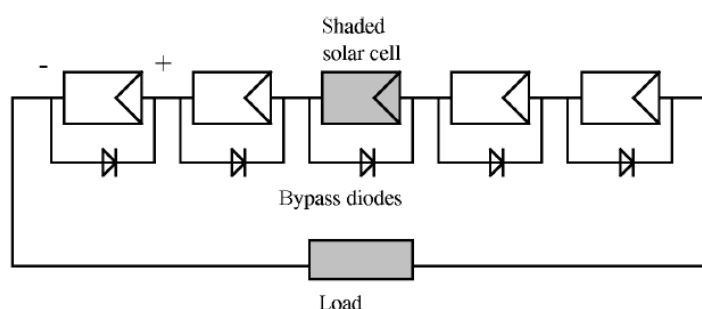
Στη βιομηχανική κατασκευή, η σύνδεση των ηλιακών κυττάρων για να παράγουν ηλιακή ενότητα PV απαιτεί διάφορα διαφορετικά στάδια, τα οποία δεν θα είναι περιγραφούν λεπτομερώς εδώ. Έχει μεγάλη διαφορά εάν οι ενότητες PV παράγονται σε εγκαταστάσεις με μεγάλη παραγωγή, ίσως 20MWp το χρόνο ή σε μικρότερες εγκαταστάσεις με μια παραγωγή λιγότερο από 1MWp το χρόνο. Η παραγωγική διαδικασία σε εγκαταστάσεις με υψηλή ετήσια παραγωγή των ενότητων PV είναι πλήρως ή σχεδόν πλήρως αυτοματοποιημένη. Στις μικρές εγκαταστάσεις ηλιακών ενότητων PV, πολλά βήματα παραγωγής δεν είναι αυτοματοποιημένα. Πραγματοποιούνται με το χέρι ή με απλές μηχανικές συσκευές.

Ο βαθμός αυτοματοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας έχει μεγάλη επιρροή στο κόστος παραγωγής των ηλιακών ενότητων PV (δείτε το κεφ. 6). Σήμερα, οι ηλιακές ενότητες PV έχουν δύναμη μέχρι 300 WP. Επειδή τα εμπορικά συστήματα PV χρειάζονται συνήθως μια υψηλότερη δύναμη από ότι μπορεί να αποδώσει μία ενιαία ενότητα PV, η σύνδεση διάφορων ενότητων PV σε μια ηλιακή γεννήτρια είναι απαραίτητη.

Οι ίδιες αρχές σύνδεσης όπως για τη σύνδεση των ηλιακών κυττάρων ισχύουν για τις ενότητες, δηλ., μπορούν να συνδεθούν σωρηδόν και παράλληλα ή σωρηδόν μόνο.

Σύνδεση σε σειρά

Το σχήμα 4.8 παρουσιάζει σύνδεση σειράς των ηλιακών κυττάρων. Εδώ, το ίδιο ρεύμα ρέει μέσω κάθε ηλιακού κυττάρου, και η συνολική τάση είναι το άθροισμα του μέσου όρου τάσεων στα μεμονωμένα κύτταρα. Σειρά σύνδεσης των ηλιακών κυττάρων και επίσης των ηλιακών ενότητων προκαλούν μια ανεπιθύμητη επίδραση όταν σκιάζεται ένα ηλιακό κύτταρο ή μια ενότητα πλήρως ή εν μέρει. Η πιο αδύνατη σύνδεση στην αλυσίδα καθορίζει την ποιότητα ολόκληρου του συστήματος. Ακόμα και όταν μόνο ένα κύτταρο (εν μέρει) σκιάζεται, η επίδραση είναι η ίδια σαν όλα τα σε σειρά συνδεδεμένα κύτταρα ή οι ενότητες να σκιάζονταν. Κατά αυτόν τον τρόπο, η δύναμη παραγωγής μειώνεται δραστικά. Κατά συνέπεια, είναι επιτακτικό να αποφευχθούν ακόμη και οι μικρές σκιές, π.χ.



Σχέδιο 4.8. Σειρά σύνδεσης των ηλιακών κυττάρων και των ηλιακών ενότητων. Οι δίοδοι παράκαμψης αποτρέπουν την επίδραση των καυτών σημείων όταν κάποιο από τα κύτταρα σκιάζεται

από τα καλώδια, ή τις κορυφές δέντρων. Μια περαιτέρω ανυπόφορη επίδραση προκαλούμενη από τη σειρά σύνδεσης είναι το περιστατικό των τοπικών καυτών σημείων όταν τα μεμονωμένα κύτταρα είναι εν μέρει σε σκιά. Το περιστατικό του καυτού σημείου μπορεί να γίνει κατανοητό λέγοντας

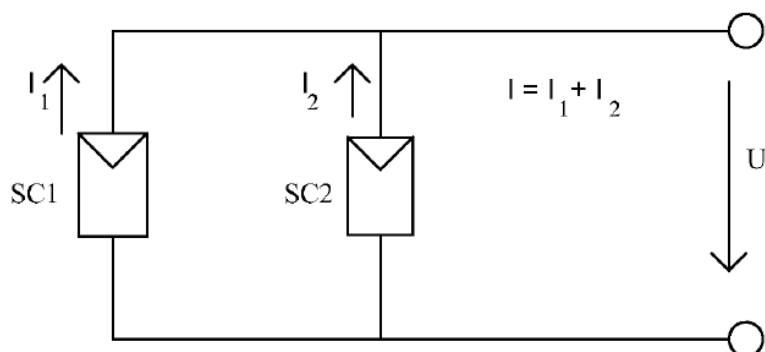
ότι η σκιασμένη δίοδος παρουσιάζει μια πολύ υψηλή αντίσταση έναντι του φορτίου. Κατόπιν, το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης τάσης που παράγεται από το υπόλοιπο των κυττάρων εμφανίζεται στη σκιασμένη δίοδο, η οποία οδηγείται στη διακοπή.

Για να αποφύγουμε αυτόν τον όρο λειτουργίας, οι αποκαλούμενες δίοδοι παράκαμψης συνδέονται αντιπαράλληλα στα ηλιακά κύτταρα έτσι ώστε οι μεγαλύτερες διαφορές τάσης δεν μπορούν να προκύψουν στην αντίστροφα-τρέχουσα κατεύθυνση των ηλιακών κυττάρων. Η ιδανική λύση παρουσιάζεται στο σχέδιο 6.8, με μια τέτοια δίοδο παράκαμψης για κάθε ηλιακό κύτταρο. Εντούτοις, στην πράξη, είναι ικανοποιητικό να παρασχεθεί μια δίοδος παράκαμψης για κάθε 15 έως 20 ηλιακά κύτταρα. Γενικά, οι συνδέσεις για αυτά περιλαμβάνονται από τον κατασκευαστή στο κιβώτιο σύνδεσης. Επειδή, όπως αναφέρεται ανωτέρω, όταν συνδέουμε ηλιακές ενότητες σωρηδόν, η πιο αδύνατη σύνδεση στην αλυσίδα καθορίζει την ποιότητα της πλήρους σειράς, οι ηλιακές ενότητες των διαφορετικών τεχνολογιών ή των διαφορετικών κατασκευαστών πρέπει να μην είναι σε σειρά συνδεδεμένα με μια ηλιακή γεννήτρια. Αυτό επίσης εμφανίζεται για τη σύνδεση σε σειρά διάφορων ηλιακών κυττάρων σε μια ενότητα. Στην πράξη, διαφορές στην αποδοτικότητα των ηλιακών κυττάρων ή των ενοτήτων μεταξύ των μεμονωμένων δαπανών παραγωγής από τον ίδιο κατασκευαστή είναι πιθανές. Αυτή η κατάσταση καλείται «κακός συνδυασμός», και οι απώλειες καλούνται «απώλειες κακού συνδυασμού».

Παράλληλη σύνδεση

Εάν τα υψηλότερα ρεύματα απαιτούνται σε ένα σύστημα, αυτά μπορούν να ληφθούν από την παράλληλη σύνδεση των μεμονωμένων σειρών, όπως παρουσιάζεται στο σχέδιο 4.9. Σε μια παράλληλη διαμόρφωση, η τάση σε κάθε ηλιακό κύτταρο ή ηλιακή ενότητα είναι ίση, ενώ το συνολικό ρεύμα είναι

το άθροισμα όλων των μέσων όρων των ρευμάτων των κυττάρων ή της ενότητας.



Σχέδιο 4.9. Παράλληλη σύνδεση των ηλιακών κυττάρων και των ηλιακών ενοτήτων .

Προσανατολισμός και ανύψωση των ενοτήτων

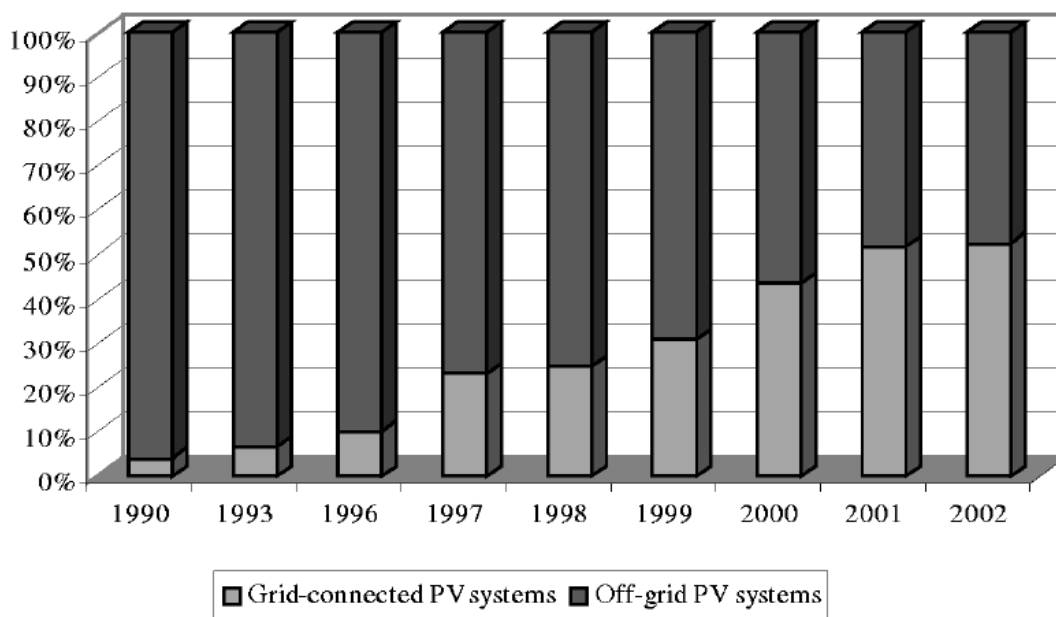
Είναι προφανές ότι μια ηλιακή ενότητα θα αποδώσει τη μέγιστη δύναμη εάν είναι προσανατολισμένη κάθετα στην εισερχόμενη ακτινοβολία. Αυτό μπορεί μόνο να επιτευχθεί στα πλεγματικά συστήματα, αλλά στις περισσότερες εφαρμογές οι ενότητες εγκαθίστανται σε μια σταθερή θέση. Κατόπιν η καλύτερα υπολογισμένη κατά μέσο όρο ακτινοβολία πρέπει να επιλεγεί σαν συμβιβασμός. Για τις γεννήτριες στην κεντρική Ευρώπη οι ακόλουθοι όροι συστήνονται: Προσανατολισμός προς το νότο, αλλά μια απόκλιση από 10 έως 15 βαθμούς δεν μειώνει αρκετά την παραγωγή. Η κλίση πρέπει να είναι προς τον οριζόντιο άξονα 30°-42° για μια βελτιστοποιημένη παραγωγή κατά τη διάρκεια του έτους. Εάν η παραγωγή πρόκειται να βελτιστοποιηθεί για την άνοιξη, το φθινόπωρο, και τον χειμώνα, η κλίση πρέπει να αυξάνεται σε 45°-60°. Άλλες γεωγραφικές θέσεις απαιτούν διαφορετικούς κανόνες βελτιστοποίησης. Γενικά, σε όλες τις θέσεις στο βόρειο ημισφαίριο, μία ηλιακή γεννήτρια πρέπει να προσανατολιστεί όσο το δυνατόν περισσότερο προς το νότο και το νότιο ημισφαίριο προς το Βορρά. Για την κλίση σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος β , ο ακόλουθος τύπος για τη βελτιστοποιημένη ετήσια παραγωγή ισχύει:

$$\beta = \text{γεωγραφικό πλάτος} \pm 10^\circ \quad (4.1)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συστήματα PV

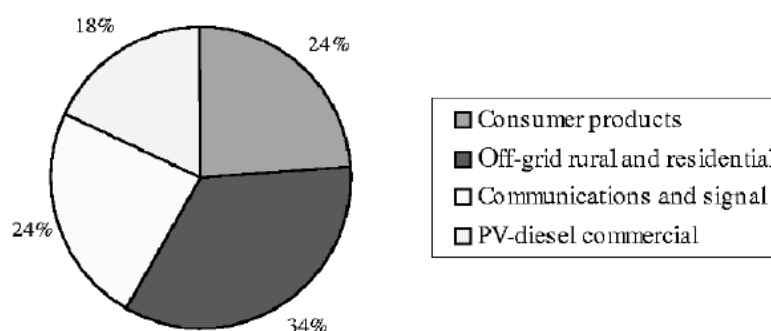
Οι επίγειες φωτοβολταϊκές εφαρμογές μπορούν να διαιρεθούν σε: - αυτόνομα συστήματα PV και διασυνδεδεμένα συστήματα PV. Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει το ετήσιο ποσοστό των διασυνδεδεμένων συστημάτων PV και offgrid ή των αυτόνομων συστημάτων PV στην παγκόσμια PV αγορά από το 1990 ως το 2002. Σαφώς, βλέπουμε ότι το ποσοστό διασυνδεδεμένων συστημάτων αυξάνεται γρήγορα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου .



Σχέδιο 5.1. Ποσοστό των grid-connected (πλεγματικά) και συστημάτων από-πλέγματος PV στην παγκόσμια PV αγορά

5.1 αυτόνομα συστήματα PV

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά τροφοδοτημένα συστήματα με τις μέγιστες δυνάμεις PV μπορούν να έχουν από milliwatts σε διάφορα kilowatts. Δεν έχουν μια σύνδεση σε ένα πλέγμα ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ο ανεφοδιασμός του αυτόνομου συστήματος με ηλεκτρική δύναμη ακόμη κ τις στιγμές χωρίς ακτινοβολία (π.χ., τη νύχτα) ή με πολύ



Σχέδιο 5.2. Ποσοστό από τον τομέα εφαρμογής στο από-πλέγμα ή αυτόνομη παγκόσμια αγορά PV το 2002

η χαμηλή ακτινοβολία (π.χ., κατά περιόδους με μια ισχυρή κάλυψη σύννεφων), τα αυτόνομα συστήματα έχουν συνήθως ένα ενσωματωμένο σύστημα αποθήκευσης. Εάν τα συστήματα χρησιμοποιούνται μόνο κατά τη διάρκεια του χρόνου όπου η ακτινοβολία είναι επαρκής για να παρέχει στο σύστημα την ηλεκτρική δύναμη άμεσα, ένα σύστημα αποθήκευσης δεν είναι απαραίτητο. Αυτό ισχύει επίσης για την κατάσταση στην οποία το προϊόν που παραδίδεται από το σύστημα μπορεί να αποθηκευτεί (π.χ., νερό).

Αυτή τη στιγμή, μια πολύ μεγάλη ποικιλία του αυτόνομου συστήματος υπάρχει. Τα παραδείγματα ποικίλουν, από τους ηλιακούς υπολογιστές και τα ρολόγια στα συστήματα για τον έλεγχο της κυκλοφορίας, στα συστήματα που είναι σε θέση να παρέχουν σε ένα ή περισσότερα κτήρια στις απομονωμένες περιοχές ηλεκτρική δύναμη. Μπορούν να είναι συνεχή συστήματα με ή χωρίς

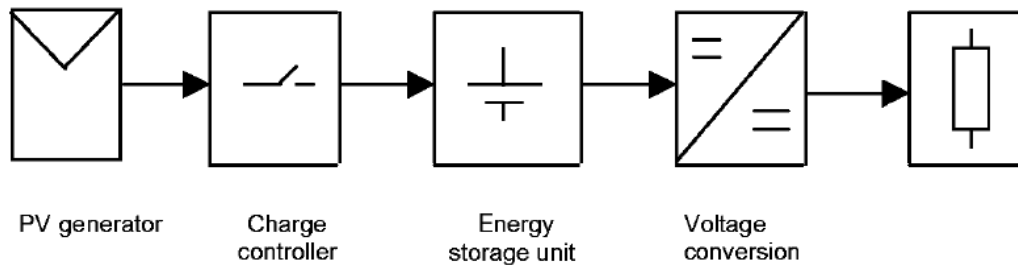
μια μπαταρία αποθήκευσης, ή μπορούν να είναι συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος με έναν αναστροφέα.

Τα αυτόνομα συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν με μια γεννήτρια PV ως τη μόνη πηγή ισχύος ή με τις βοηθητικές πηγές ισχύος, ως αποκαλούμενα υβριδικά συστήματα, όπου οι πρόσθετες γεννήτριες που χρησιμοποιούν το ορυκτό καύσιμο (παραδείγματος χάριν, καύσιμα diesel ή αέριο) ή τη ανανεώσιμη ενέργεια (παραδείγματος χάριν, αέρας, υδρενέργεια, ή βιομάζα) συμπληρώνουν τη ενεργειακή παραγωγή PV. Η επιλογή χωρητικότητας και της σχετικής δύναμης μιας γεννήτριας PV και μιας βοηθητικής πηγής ισχύος εξαρτάται από τους όρους ακτινοβολίας, την απαραίτητη ασφάλεια του ανεφοδιασμού, και τελευταίο αλλά όχι ασήμαντο, από τα οικονομικά. Σήμερα, οι σχεδιαστές συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα προγράμματα σχεδιαγράμματος που το καθιστούν εύκολο να βρουν το βέλτιστο.

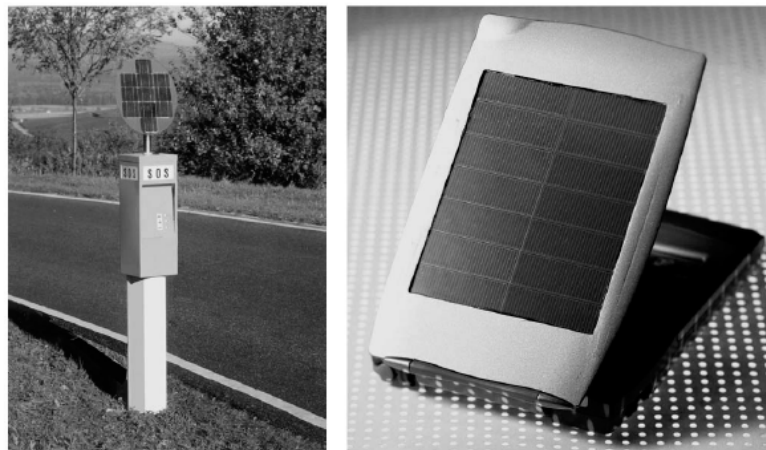
Το σχήμα 7.2 δίνει μια επισκόπηση του ποσοστού από την εφαρμογή στο off grid αντίστοιχα στην αυτόνομη παγκόσμια αγορά PV. Περισσότερο από ένα τρίτο όλων των αυτόνομων PV συστημάτων χρησιμοποιούνται για τα αγροτικά και οικιακά συστήματα από-πλέγματος.

5.1.1 Καταναλωτικές εφαρμογές

Οι ηλιακοί υπολογιστές ήταν μεταξύ των πρώτων καταναλωτικών εφαρμογών. Είναι μια ιδανική εφαρμογή επειδή καμία αποθήκευση δεν απαιτείται. Ο ηλιακός υπολογιστής λειτουργεί όποτε υπάρχει αρκετό φως για να διαβάσει την ένδειξη. Σήμερα, τα ηλιακά ρολόγια, οι φορτιστές μπαταριών, και τα διάφορα άλλα προϊόντα είναι διαθέσιμα με ηλιακή δύναμη. Όλα τα προϊόντα είναι εξοπλισμένα με τις μικρές ενσωματωμένες ενότητες PV, μια τάση DC/DC



Σχέδιο 5.3. Διάγραμμα φραγμών μιας φωτοβολταϊκής παροχής ηλεκτρικού ρεύματος για ένα μικρό καταναλωτικό προϊόν



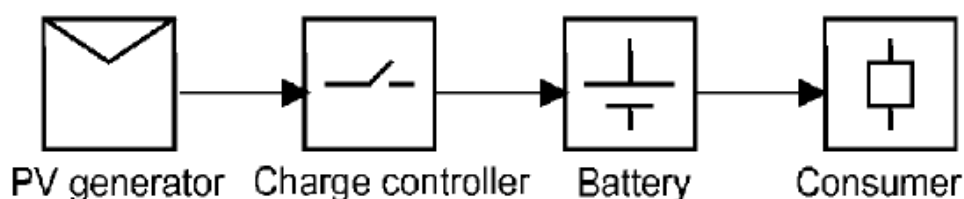
Σχέδιο 5.4. Δύο παραδείγματα των φωτοβολταϊκών συσκευών.

μετατροπέα, και, στις περισσότερες περιπτώσεις, μια μονάδα ενεργειακής αποθήκευσης και έναν ελεγκτή δαπανών (σχέδιο 7.3). Στο σχέδιο 7.4, μερικά παραδείγματα των φωτοβολταϊκών συσκευών παρουσιάζονται. Από τα αριστερά στα δεξιά : ένα σύστημα PV για να ικανοποιήσει την απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας ενός τηλεφώνου σε μια σιδηροδρομική γραμμή και ενός διοργανωτή με μια ενσωματωμένη μικρή ενότητα PV.

5.1.2 Ηλιακά εγχώρια συστήματα

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, περίπου δύο χιλιάδες εκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο δεν έχουν μια σύνδεση σε ένα δημόσιο πλέγμα. Και οι μισοί από αυτούς ζούν σε περιοχές χωρίς οποιαδήποτε πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Οι υψηλές δαπάνες επένδυσης σε συνδυασμό με μια μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (λιγότερο από 1kWh ανά ημέρα) θα ενεργήσουν ενάντια στο πλέγμα που επεκτείνεται σε αυτές τις μακρινές, αραιά κατοικημένες περιοχές μέσα στο εγγύς μέλλον.

Για αυτές τις περιοχές, ο ανεφοδιασμός με την ηλεκτρική ενέργεια μπορεί μόνο να πραγματοποιηθεί από τις αποκεντρωμένες, μικρές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Συχνότερα χρησιμοποιούνται οι γεννήτριες πετρελαίου. Η λειτουργία τους όμως συνδέεται με τις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως ο θόρυβος και τα επιβλαβή αέρια. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει, μια υποδομή για την παροχή των γεννητριών πετρελαίου με το μαζούτ και τη συντήρηση στις απομακρυσμένες θέσεις. Εντούτοις,



Σχέδιο 5.5. Σχηματική αρχή ενός απλού ηλιακού εγχώριου συστήματος

στις μακρινές και αραιά κατοικημένες περιοχές στην Αφρική, την Ασία, και τη Λατινική Αμερική υπάρχουν σπάνια παντός καιρού οδοί ή συνδέσεις ραγών. Δεν είναι εκπληκτικό, επομένως, ότι μόνο πολύ λίγες οικογένειες μπορούν να αντέξουν οικονομικά τέτοιες γεννήτριες. Τα φωτοβολταϊκά υπό μορφή αποκαλούμενων ηλιακών εγχώριων συστημάτων φαίνονται ως οι καλύτεροι

υποψήφιοι για να λύσουν τα προβλήματα ενεργειακού εφοδιασμού σε αυτά τα εδάφη.

Ένα απλό ηλιακό οικιακό σύστημα (SHS) αποτελείται από την ηλιακή γεννήτρια (PV ενότητα), μια μπαταρία μολύβδου, και έναν ελεγκτή δαπανών, καθώς επίσης και τις άμεσα συνδεδεμένες συσκευές συνεχούς ρεύματος (δείτε το σχέδιο 5.5). Επιπλέον, μια δομή υποστήριξης για την ενότητα, καλώδια, και υποδοχές για τις συσκευές απαιτούνται. Ένα τέτοιο SHS είναι σε θέση να παρέχει την ηλεκτρική δύναμη που απαιτείται για φωτισμό, TV, ραδιόφωνο, ή για ένα μικρό ψυγείο.

Σε ένα απλό SHS, κυρίως οι συνεχούς ρεύματος τροφοδοτούμενες ηλεκτρικές συσκευές χρησιμοποιούνται. Ενώ η αποδοχή των φωτοβολταϊκών συστημάτων περιστρέφεται γύρω από την αλάνθαστη λειτουργία όλων των τμημάτων των συστημάτων, η υψηλή ποιότητα απαιτείται για αυτές τις συσκευές. Ακόμα, απαιτούνται τα εξής:

- μακροχρόνια διάρκεια ζωής,
- υψηλή αποδοτικότητα,
- υψηλή αξιοπιστία, ακόμα και όταν χρησιμοποιείται ανακριβώς,
- σωστή λειτουργία ακόμη και στις ακραίες θερμοκρασίες,
- άψογη λειτουργία για όλες τις πιθανές τάσεις εισαγωγής που προσφέρονται από τη λειτουργία μπαταριών, και
- χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης και υπηρεσιών.

Αυτή τη στιγμή, εκατοντάδες χιλιάδες SHS είναι σε λειτουργία στην Αφρική, Ασία, και Λατινική Αμερική (σχέδιο 5.6).

Υπολογίζεται ότι περίπου 200.000 ηλιακά εγχώρια συστήματα (SHS) πωλούνται ετησίως. Και μια σταθερή αύξηση αναμένεται για τα επόμενα έτη.

Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για φωτισμό, δηλ., φωτιά, τα κεριά, και οι λαμπτήρες κηροζίνης, τα οφέλη των SHS είναι πολλαπλά :

- η βελτιωμένη ποιότητα του φωτισμού παρέχει ευκαιρίες για την επιμήκυνση του ωραρίου εργασίας και την ανάγνωση και τις δραστηριότητες ελεύθερου χρόνου

- δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος για την υγεία που συνδέεται με τον καπνό και τη μυρωδιά και

- δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος πυρκαγιάς.

Αυτή η βελτίωση στις συνθήκες διαβίωσης μπορεί να οδηγήσει σε μια πτώση στην αγροτική έξοδο.

Εκτός από αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τη μακροχρόνια διάρκεια ζωής ενός SHS – το πλαίσιο διαρκεί περισσότερο από είκοσι έτη, οι μηνιαίες δαπάνες για τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας συχνά



Σχέδιο 5.6. Ηλιακό εγχώριο σύστημα στη Βολιβία

υπερβαίνουν τις μηνιαίες δαπάνες ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Και ακόμα κι αν τα οφέλη είναι πολυάριθμα και πολύ υψηλά τεχνολογικά πρότυπα έχουν πραγματοποιηθεί, τα προβλήματα πρέπει να αντιμετωπιστούν σχετικά με μια διαδεδομένη διάδοση των SHS.

Ένα από τα κύρια εμπόδια στην ανάπτυξη των αγροτικών αγορών ηλεκτρισμού με τα φωτοβολταϊκά είναι η χρηματοδότηση της υψηλής επένδυσης ενός SHS, το οποίο είναι το κρίσιμο σημείο για τις περισσότερες από τις αγροτικές οικογένειες, καθώς επίσης και για πολλούς φωτοβολταϊκούς μεσάζοντες. Ανάλογα με το μέγεθος της τοπικής αγοράς, τους φόρους, το μερίδιο των τοπικά κατασκευασμένων συστατικών, και την κυβερνητική πολιτική σχετικά με την ηλιακή τεχνολογία και την αγροτική ηλεκτρίση, ένα SHS κοστίζει μεταξύ των \$500 - \$1.500. Ακόμη και με την ύπαρξη των επιχορηγήσεων για την εγκατάσταση ενός SHS, τέτοιες δαπάνες επένδυσης είναι πολύ πάρα πολύ υψηλές συγκρινόμενες με το μέσο εισόδημα των οικογενειών- στόχων. Για αυτόν τον λόγο, τα σχέδια χρηματοδότησης που επιτρέπουν την πληρωμή με δόσεις, πρέπει να προσφερθούν - απαιτούνται στα εθνικά προγράμματα ηλεκτρίσης όπως στις εμπορικές αγορές.

Επ'αυτού, τα όργανα μικρής-χρηματοδότησης (MFI) θα μπορούσαν να διαδραματίσουν έναν ουσιαστικό ρόλο στη διάδοση των SHS. Αυτό όχι μόνο αντιπροσωπεύει μια λύση για τα υπάρχοντα εμπόδια σχετικά με την ηλεκτρίση των μακρινών αγροτικών οικογενειών, αλλά παράλληλα προσφέρει ευκαιρίες για νέες αγορές προσφορών για MFI, παραδείγματος χάριν, με τη μορφή αγροτικών δανείων ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία προσφέρουν πρόσθετα την ευκολία των ασφαλών εγγυήσεων του υλικού, ειδικά του ηλιακού πλαισίου.

Για να πραγματοποιήσει αυτήν την επιχείρηση, το MFI, αρμόδιο για την οικονομική ροή, θα μπορούσε να εισαχθεί σε μια επιχειρησιακή σχέση με μια αγροτική επιχείρηση ηλεκτρίσης αρμόδια για την τεχνική ροή, δηλ., την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρηση, και κατάρτιση χρηστών. Η σύμβαση μεταξύ αυτών των οντοτήτων περιλαμβάνει τις ρυθμίσεις στη μεταπώληση και την ανάκτηση του ηλιακού πλαισίου στην περίπτωση της μη πληρωμής πίστωσης για να διευκολύνει τη χρησιμοποίηση του υλικού ως εγγύηση. Ένα μέρος αυτής της συμφωνίας για άμεσο της πίστωσης στην επιχείρηση - μετά από την εγκατάσταση του συστήματος - πρέπει να θεωρηθεί για να χαμηλώσει τον κίνδυνο, ότι ο πελάτης χρησιμοποιεί την πίστωση για έναν διαφορετικό σκοπό.

Η προαναφερθείσα δυνατότητα του συνδυασμού της μικρο-χρηματοδότησης με την ποιότητα του SHS και την κατάρτιση του χρήστη είναι πολύ σημαντική.

Η διάδοση του SHS μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά εάν το SHS ή τα συστατικά του δεν λειτουργούν χωρίς πρόβλημα δηλ., ο ελεγκτής δαπανών έχει συχνά μια διακοπή, η μπαταρία έχει μια χαμηλή αποδοτικότητα, ή η αποδοτικότητα των ηλιακών ενοτήτων είναι χαμηλότερη στην πραγματικότητα από ότι είναι σημειωμένη στο φύλλο στοιχείων. Ένας λόγος για αυτό το πρόβλημα είναι ότι οι τοπικές επιχειρήσεις πωλούν σε μερικές περιπτώσεις τα φτηνά συστατικά κακής ποιότητας. Κατά συνέπεια, το SHS έχει μια χαμηλή αποδοτικότητα, μια χαμηλή ενεργειακή παραγωγή, και ο ιδιοκτήτης του SHS είναι δυσαρεστημένος.

Επίσης σημαντική είναι η κατάρτιση των δυνητικών χρηστών ενός SHS. Αυτοί πρέπει να έχουν τη γνώση της βασικής αρχής λειτουργίας ενός SHS.

Εντούτοις, τα περισσότερα SHS πωλούνται στις αγροτικές περιοχές της Αφρικής, της Ασίας και της Λατινικής Αμερικής, όπου οι άνθρωποι δεν είναι ικανοί να διαβάσουν ένα λεπτομερές εγχειρίδιο οδηγίας. Έτσι οι πληροφορίες για το SHS πρέπει να δοθούν σε μια πολύ απλή μορφή, δηλ., με εικόνες ή ως ιστορία σε σκίτσα. Μόνο εάν οι δυνητικοί χρήστες SHS έχουν ενημερωθεί για τις λειτουργίες ενός SHS ή για τις λειτουργίες των κύριων συστατικών από μια ανακριβή λειτουργία SHS του συστήματος ή την ανακριβή και αντίστοιχα παράνομη λειτουργία, αυτή μπορεί να αποτραπεί. Ένα παράδειγμα που παρατηρείται συχνά είναι το εξής: Ο ιδιοκτήτης ενός SHS έχει αγοράσει επιπρόσθετα ηλεκτρικές συσκευές. Τώρα, το SHS δεν μπορεί να συναντήσει την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας όταν όλες οι συσκευές χρησιμοποιούνται συγχρόνως. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ιδιοκτήτης SHS μπαίνει στον πειρασμό πλαστογράφησης του ελεγκτή δαπανών για να απαλλάξει πλήρως την μπαταρία. Αυτή δουλεύει για μια σύντομη περίοδο αλλά μειώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής των μπαταριών.

5.1.3 Οικιακά συστήματα

Μια άλλη χρήση των αυτόνομων συστημάτων PV παρέχει τα ενιαία κτήρια με ηλεκτρική ενέργεια. Όποτε τα σπίτια δεν έχουν καμία σύνδεση στο δημόσιο πλέγμα, το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι μια πολύ ελκυστική οικονομική εναλλακτική λύση σε σχέση με μια μηχανή πετρελαίου.

Ακόμη και στην κεντρική Ευρώπη, που έχει ένα εκτεταμένο δημόσιο πλέγμα δύναμης, εκεί υπάρχουν μερικές εκατοντάδες κτήρια που δεν συνδέονται με αυτό το πλέγμα. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι τοποθετημένοι στις απομονωμένες περιοχές όπως σε ορειβατικές κατοικίες και σε άλλα κτήρια στα ευρωπαϊκά βουνά (π.χ., οι Άλπεις και το Black Forest). Αυτήν την περίοδο, στο γερμανικό μέρος των Άλπεων η ορειβάσια περισσότερες από τριάντα ορειβατικές κατοικίες ή πανδοχεία των οδοιπόρων παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια από τα αυτόνομα συστήματα PV με διαφορετικές σειρές δύναμης (σχέδιο 5.7).



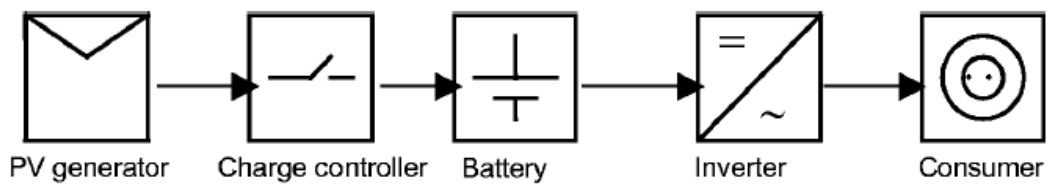
Σχέδιο 5.7. Ένα σύστημα PV παρέχει ενέργεια σε ορειβατικές κατοικίες στις γερμανικές Άλπεις .

Συνήθως το εσωτερικό πλέγμα του σπιτιού λειτουργεί με τη δύναμη εναλλασσόμενου ρεύματος. Επομένως, το σύστημα PV περιλαμβάνει έναν ή δύο αναστροφείς (για τη λειτουργία των αναστροφών. Επειδή η ένταση ακτινοβολίας αλλάζει με το χρόνο της ημέρας καθώς επίσης και με τις καιρικές συνθήκες κάθε εποχής, ένα αυτόνομο σύστημα PV που χρησιμοποιείται για να παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια σε ένα κτήριο πρέπει επίσης να έχει μια μπαταρία αποθήκευσης και έναν ελεγκτή δαπανών. Η σχηματική αρχή του αυτόνομου PV συστήματος που εφοδιάζει ένα κτήριο δίνεται στο σχ. 5.8.

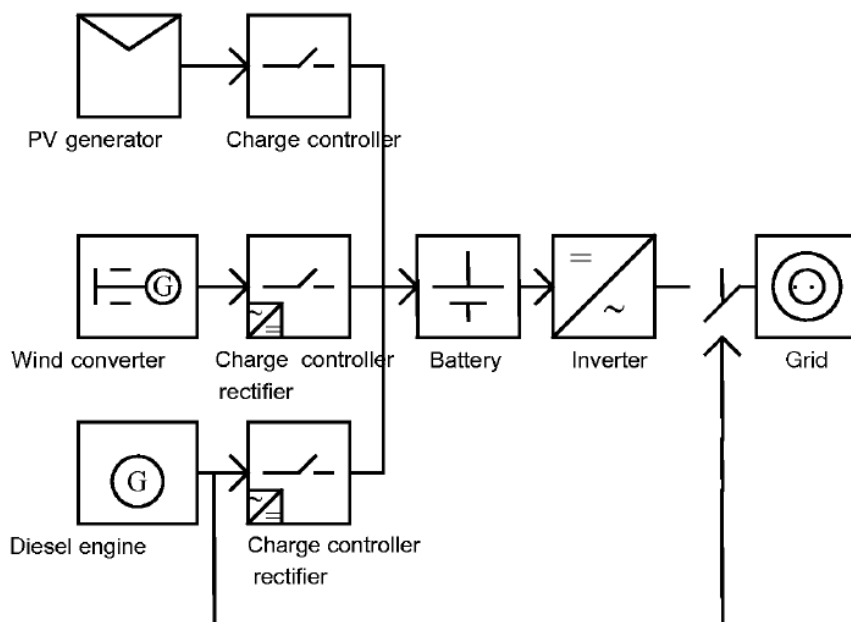
Μπαταρίες - στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μπαταρίες μολύβδου χρησιμοποιούνται για αυτόν το λόγο. Πρόσφατα, μερικές εταιρίες άρχισαν να προσφέρουν τις αποκαλούμενες ηλιακές μπαταρίες που σχεδιάστηκαν συγκεκριμένα για τα αυτόνομα συστήματα PV. Πρέπει να τονιστεί ότι οι μπαταρίες σε ένα σύστημα PV λειτουργούν σε ένα πολύ απαιτητικό περιβάλλον, και ιδιαίτερα, εποχιακές περίοδοι με πολύ χαμηλές τιμές

αντιμετωπίζονται. Αυτή η κατάσταση ανακουφίζεται στα υβριδικά συστήματα στα οποία η βοηθητική γεννήτρια μπορεί να φορτίσει την μπαταρία κατά τη διάρκεια τέτοιων περιόδων.

Ελεγκτής δαπανών - ένας ελεγκτής δαπανών μπαταριών PV χρησιμεύει γενικά για να προστατεύσει την μπαταρία από την υπερφόρτωση και τη βαθιά απαλλαγή. Είναι απολύτως απαραίτητο για τους αποδοτικούς λειτουργούντες όρους της μπαταρίας και του πλήρους συστήματος PV.



Σχέδιο 5.8. Σχηματική αρχή ενός αυτόνομου συστήματος PV που παρέχει ένα κτήριο.



Σχέδιο 5.9 Σχηματική αρχή ενός υβριδικού συστήματος με PV, αέρα και γεννήτριες πετρελαίου

5.1.4 Υβριδικά συστήματα

Λόγω της ετήσιας διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας στα περισσότερα μέρη του κόσμου, ένα αποκλειστικά φωτοβολταϊκό σύστημα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος θα απαιτούσε μια μεγάλη ηλιακή γεννήτρια ή/και μια μεγάλη μπαταρία αποθήκευσης. Ένα τέτοιο σύστημα PV είναι πολύ ακριβό. Αυτό ισχύει επίσης για τα φωτοβολταϊκά συστήματα για τα οποία η ασφάλεια του ανεφοδιασμού είναι πολύ σημαντική. Επομένως, συνήθως οι διαφορετικοί τύποι γεννητριών ηλεκτρικής ενέργειας συνδυάζονται σε ένα αποκαλούμενο υβριδικό σύστημα. Ένας συνδυασμός φωτοβολταϊκού και οι απολιθωμένες-τροφοδοτημένες με καύσιμα γεννήτριες εγγυώνται την ίδια αξιοπιστία ανεφοδιασμού με το δημόσιο πλέγμα.

Υπό ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, η συνολική ζήτηση ενέργειας λαμβάνεται από την ηλιακή γεννήτρια. Η ενέργεια πλεονάσματος αποθηκεύεται στις μπαταρίες. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ή του δυσμενούς καιρού, η ζήτηση ενέργειας καλύπτεται αρχικά από τις μπαταρίες. Εάν υπάρχει κίνδυνος βαθιάς απαλλαγής, μια γεννήτρια πετρελαίου ή γκαζιού παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια και φορτίζει ταυτόχρονα την μπαταρία.

Επί των θυελλωδών τόπων, το σύστημα μπορεί να περιλάβει έναν ενεργειακό μετατροπέα αέρα. Καθώς η φωτοβολταϊκή γεννήτρια και ο ενεργειακός μετατροπέας αέρα συμπληρώνουν κατά ένα μεγάλο μέρος ο ένας τον άλλο, εφόσον διαστασιολογούνται σωστά, ο χρόνος λειτουργίας της τροφοδοτημένης με φυσικά καύσιμα γεννήτριας, και επομένως η κατανάλωση καυσίμων, μειώνονται (σχέδιο 5.9).

Μερικά έτη πριν στη Γερμανία, μια ανάλυση του κόστους της ηλεκτρικής παραγωγής των υβριδικών συστημάτων που εφοδιάζουν περισσότερες από τριάντα ορειβατικές κατοικίες ή τα πανδοχεία των οδοιπόρων στις γερμανικές και αυστριακές Άλπεις πραγματοποιήθηκε. Έγιναν επίσης υπολογισμοί για τους όρους ακτινοβολίας στο Μεξικό. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης ,



Σχέδιο 5.10. Το Rappeneck (ένα εστιατόριο των οδοιπόρων στο Black Forest)

έδειξαν ότι τα υβριδικά συστήματα είναι η οικονομικότερη λύση για την παροχή αυτών των κτηρίων με ηλεκτρική δύναμη, όχι μόνο για τους κλιματολογικούς όρους στις γερμανικές και αυστριακές Άλπεις, αλλά και υπό τους κλιματολογικούς όρους του Μεξικό. Και στις δύο περιπτώσεις, ένα ηλιακό τμήμα περισσότερο από 80% ήταν αντισυμβατικό.

Το σχήμα 5.10 παρουσιάζει το Rappeneck, ένα εστιατόριο των οδοιπόρων στο Black Forest κοντά στο Freiburg στη Γερμανία. Το κτήριο είναι τοποθετημένο σχεδόν 1.000 μ. επάνω από το επίπεδο της θάλασσας, και σύνδεση στο δημόσιο πλέγμα δεν υπάρχει. Η γεννήτρια PV έχει μια μέγιστη δύναμη 3.8 KW και είναι προσανατολισμένη στο νότο και ενσωματωμένη σε μια επικλινή στέγη. Το σύστημα PV λειτουργεί από το 1986, όταν εγκαταστάθηκε από το ίδρυμα Fraunhofer χωρίς οποιαδήποτε ατέλεια, παρέχοντας στο κτήριο μεγάλο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειάς του. Εκτός από τη γεννήτρια PV, μια τροφοδοτημένη με καύσιμα γεννήτρια και ένας μετατροπέας αέρα με μια δύναμη 1kW μπορούν να παραδώσουν τη συνοδευτική ηλεκτρική ενέργεια όποτε υπάρχουν δυσμενείς καιρικές συνθήκες ή υπάρχει κίνδυνος από τη βαθιά απαλλαγή των μπαταριών. Πολύ

πρόσφατα, ένα κύτταρο καυσίμου εγκαταστάθηκε για να συμπληρώσει το ενεργειακό σύστημα.

Το Rappeneck είναι ένα παράδειγμα ενός υβριδικού συστήματος στη Γερμανία. Αλλά σχεδόν το ίδιο σχέδιο μπορεί να εφαρμοστεί για τα σπίτια ή τις μικρές ομάδες σπιτιών που δεν έχουν καμία σύνδεση στο δημόσιο πλέγμα σε πολλές άλλες περιοχές του κόσμου. Στην περίπτωση μιας ομάδας σπιτιών, δεν απαιτείται κάθε σπίτι να έχει το σύστημα PV του ή ένα ηλιακό εγχώριο σύστημα. Ένα υβριδικό σύστημα με μεγαλύτερη δύναμη μπορεί να παρέχει ολόκληρη την ομάδα σπιτιών όπως ένας μικρός κεντρικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Μια νέα ανακάλυψη είναι η πιθανότητα ενός συμπληρωματικού κυττάρου καυσίμου στο σύστημα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος ενός υβριδικού ή άλλου αυτόνομου συστήματος PV. Όπως αναφέρεται, τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα χρειάζονται αποθήκευση που υπερνικά τον κακό συνδυασμό μεταξύ της άφιξης ηλιακής ακτινοβολίας και του ηλεκτρικού φορτίου. Για να παρέχει συνεχή παραγωγή δύναμης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ένα συνοδευτικό ηλεκτρικό σύστημα συχνά θα είναι απαραίτητο. Μια αποτελεσματική λύση στο ζήτημα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης των συστημάτων PV είναι βασισμένη στη χρησιμοποίηση των κυττάρων καυσίμου και της τεχνολογίας υδρογόνου στη



Σχέδιο 5.11. Το αυτόνομο ηλιακό σπίτι (SSSH) στο Freiburg, που εγκαινιάστηκε το 1992 (Γερμανία)

σύνδεση με το PV. Ένα αυτόνομο PV-H₂ σύστημα αποτελείται από μια σειρά PV, μπαταρία, ηλεκτρολύτη, αποθήκευση υδρογόνου, μονάδα διαχείρισης αερίου, κύτταρο καυσίμου, και μονάδα ελέγχου. Η μπαταρία έχει λειτουργία της βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης. Η μακροπρόθεσμη αποθήκευση παρέχεται από την H₂ αποθήκευση αερίου. Το κύτταρο καυσίμου παράγει ηλεκτρικό ενέργεια από τον επανασυνδυασμό του υδρογόνου και του οξυγόνου με το νερό, ο οποίος μπορεί να ανακυκλώνεται από τον ηλεκτρολύτη. Κατά αυτόν τον τρόπο, ένα σύστημα κλειστών βρόγχων πραγματοποιείται. Προς το παρόν, το κόστος ενός τέτοιου συστήματος είναι ακόμα πάρα πολύ υψηλό για γενική εφαρμογή, αλλά η ανάπτυξη προχωρά πολύ γρήγορα.

Έπειτα, η χρήση των κυττάρων καυσίμου σχετικά με τα συστήματα PV θα ανοίξει νέες δυνατότητες για τη μελλοντική μείωση δαπανών.

Από περιβαλλοντικής άποψης, η αντικατάσταση του συμβατικού μέρους ενός χαρακτηριστικού υβριδικού συστήματος από ένα κύτταρο καυσίμου/ηλεκτρολύτη όχι μόνο θα οδηγήσει σε μια μείωση της μόλυνσης του αέρα και της ηχορρύπανσης, αλλά θα οδηγήσει επίσης στη συντήρηση της φύσης και σε μια καλύτερη χρήση των ανανεώσιμων πόρων .

Αυτό το σχέδιο, πραγματοποιήθηκε ήδη σε ένα πειραματικό σπίτι το 1992. Έπειτα από τρία έτη έρευνας, προγραμματισμού, και σχεδίου, το πρώτο αυτόνομο ηλιακό σπίτι (SSSH) στον κόσμο ολοκληρώθηκε στο Freiburg της Γερμανίας (Σχέδιο 5.11). Η ηλιακή ακτινοβολία ήταν η μόνη πηγή ενέργειας για να εφοδιάσει τους κατοίκους του SSSH με θερμότητα και την ηλεκτρική ενέργεια. Το σπίτι δεν είχε καμία σύνδεση πλέγματος, και κανένα βοηθητικό φυσικό καύσιμο δεν χρησιμοποιήθηκε. Για την παροχή θερμότητας, μια διαφανής μόνωση στους νότιους τοίχους της οικοδομής χρησιμοποιήθηκε και ένας δυο όψεων επίπεδος συλλέκτης (πίατο) παρείχε στο εσωτερικό, ζεστό νερό.

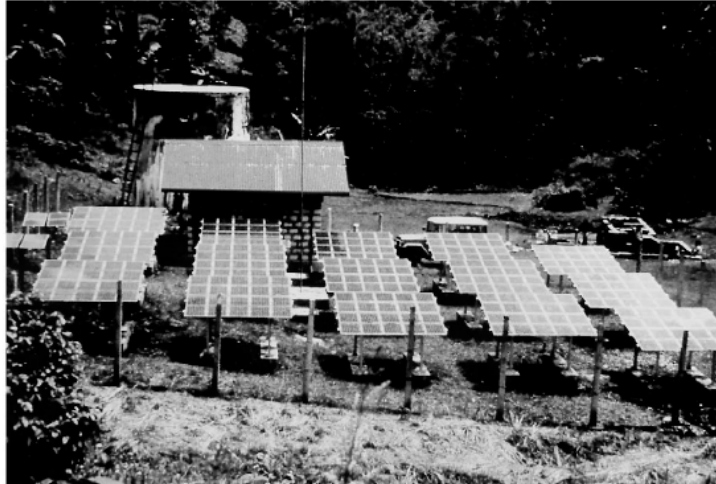
Μια γεννήτρια PV 4kWp παραδίδει όλη την ηλεκτρική ενέργεια για τις συσκευές και το σύστημα ελέγχου και, έμμεσα, το αέριο υδρογόνου για το

μαγείρεμα. Μια μπαταρία μολύβδου παρείχε τη βραχυπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση. Για τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση (καλοκαίρι προς χειμώνα), ένας ηλεκτρολύτης παρήγαγε το υδρογόνο και το οξυγόνο. Τα αέρια αποθηκεύτηκαν σε δύο χωριστές δεξαμενές. Το χειμώνα, τα αέρια είτε μετασχηματίστηκαν στην ηλεκτρική ενέργεια για τις ηλεκτρικές συσκευές από ένα κύτταρο καυσίμου είτε χρησιμοποιήθηκαν άμεσα για το μαγείρεμα και την πολύ μικρή συνοδευτική απαίτηση θερμότητας. Η οικογένεια εξοπλίστηκε με τις αποδοτικότερες (εκείνη τη στιγμή) διαθέσιμες στο εμπόριο ηλεκτρικές συσκευές για 230V εναλλασσόμενο ρεύμα. Το πρόγραμμα λειτούργησε για αρκετά έτη σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα προσομοίωσης.

5.1.5 Φωτοβολταϊκή άντληση νερού

Τα συστήματα PV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άντληση του νερού για την άρδευση του εδάφους, καθώς επίσης και για την άντληση πόσιμου νερού (σχέδιο 5.12). Συχνά αυτές οι δύο δυνατότητες δεν μπορούν να χωριστούν σαφώς. Το νερό που αντλείται για την άρδευση εδάφους μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σαν πόσιμο νερό. Επομένως, τα συστήματα PV για την άρδευση και την κατανάλωση νερού θα περιγραφούν από κοινού. Η πρόσβαση σε μια ασφαλή και καθαρή παροχή νερού είναι ένας από τους αρχικούς παράγοντες στη βελτίωση της υγείας και της ποιότητας ζωής στις αγροτικές κοινότητες. Στον αναπτυσσόμενες χώρες, ειδικά στην Αφρική, την Ασία, και τη Λατινική Αμερική, πολλοί άνθρωποι δεν έχουν την επιλογή της χρήσης καθαρού νερού για κατανάλωση. Αυτές οι μακρινές περιοχές δεν συνδέονται με ένα συγκεντρωμένο σύστημα για τον ανεφοδιασμό πόσιμου νερού. Τα κύρια μέσα της άντλησης του νερού στον αναπτυσσόμενο κόσμο είναι προς το παρόν η αντλία χειρών για τις μικρότερες απαιτήσεις και η αντλία με μηχανή πετρελαίου για μεγαλύτερο ποσότητες. Η ηλιακή άντληση PV μπορεί να είναι πιο κατάλληλη από αυτές τις τεχνολογίες σε πολλές εφαρμογές. Δεδομένου ότι οι κοινότητες επεκτείνονται, η χειροκίνητη αντλία δεν μπορεί να είναι ικανοποιητική ακόμα κι αν η ικανότητα φρεατίων είναι αρκετά μεγάλη. Τα μειονεκτήματα των γεννητριών πετρελαίου έχουν επισημανθεί ήδη. Τα ανταλλακτικά και τα καύσιμα μπορεί να είναι δύσκολο ή

ακριβό να ληφθούν, και η ποιότητα των καυσίμων είναι συχνά φτωχά από τη νόθευση, η οποία οδηγεί σε μικρότερες χρονικές περιόδους συντήρησης.



Σχέδιο 5.12. Παράδειγμα της άντλησης νερού με το PV στην Ταϊλάνδη.



Σχέδιο 5.13 Σύστημα PV για τον καθαρισμό νερού (μικροδιήθηση)

Η άντληση PV προσφέρει μια αξιόπιστη, παροχή νερού χαμηλής-συντήρησης, η οποία έχει μηδενικά κόστη καυσίμων και δεν απαιτούν να είναι κάποιος παρών κατά τη λειτουργία. Επίσης, επειδή ο χρόνος της μέγιστης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία συμπίπτει συχνά με το χρόνο της μέγιστης απαίτησης νερού, η προσφορά και η ζήτηση αντιστοιχούνται ικανοποιητικά. Η ηλιακή άντληση εισήχθη αρχικά στον τομέα προς το τέλος της δεκαετίας του '70, και από τότε οι κατασκευαστές έχουν εξελίξει τα προϊόντα τους για να δώσουν τις ιδιαίτερες βελτιώσεις στην απόδοση και την αξιοπιστία. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της άντλησης νερού PV είναι ότι καμία ενεργειακή αποθήκευση δεν απαιτείται από το ίδιο το προϊόν, δηλ., το νερό μπορεί να αποθηκευτεί.

Παραδείγματος χάριν, η σημασία των PV-τροφοδοτημένων συστημάτων νερού περιγράφεται εδώ και για την Ινδία. Σε αυτήν την χώρα, περισσότερα από 5.000 ηλιακά συστήματα PV άντλησης νερού εγκαθίστανται από τους διάφορους κατασκευαστές. Μεταξύ αυτών είναι σχεδόν 300 αντλίες για την κατανάλωση πόσιμου νερού. Μικρά συστήματα άντλησης με μια ικανότητα σειράς 300-360Wr αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '80. Το 1993, ένα νέο πρόγραμμα με υψηλότερες ικανότητες συστημάτων εισήχθη. Υπό αυτό το πρόγραμμα, προσφέρθηκε στους χρήστες ένας συνδυασμός επιχορηγήσεων και δανείων με ευνοϊκούς όρους. Σε μια πρόσφατη πρωτοβουλία, το Υπουργείο μη συμβατικών πηγών ενέργειας (MNES) παρείχε υποστήριξη στο ενεργειακό Οργανισμό Ανάπτυξης του Punjab για την ανάπτυξη 500 ηλιακών αντλιών με μια σειρά 1,800Wr PV και ένα σύνολο μηχανών άντλησης συνεχούς ρεύματος 2hr. Αυτό είναι δυνατό να ποτίσει περίπου 2-3 εκτάρια του εδάφους που χρησιμοποιεί τέτοιες ηλιακές αντλίες.

Μερικά κράτη στην Ινδία προγραμματίζουν και εφαρμόζουν όλο και μεγαλύτερα ηλιακά προγράμματα άντλησης, επειδή γίνεται αυξανόμενα αντιοικονομικό για τις κυβερνήσεις να επεκτείνουν το δημόσιο πλέγμα. Το PV μπορεί να είναι χρήσιμο όχι μόνο για άντληση νερού, αλλά και για τον καθαρισμό και την αφαλάτωση νερού (σχ.5.13). Μερικές από τις πιθανές μεθόδους παρατίθενται εδώ:

- μικροδιήθηση,
- υπεριώδης ακτινοβολία
- φωτοβολταϊκής λειτουργίας εργοστάσια αντίστροφης όσμωσης.

Αναφέρεται ότι σύμφωνα με μια ανάλυση που έγινε από το Worldwatch ίδρυμα στο D.C.της Ουάσιγκτον,στις ΗΠΑ,το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού θα ζει στις χώρες με ακραία έλλειψη νερού μέχρι το έτος 2025. Αυτή η προσδοκία το καθιστά απαραίτητο για την ανθρωπότητα να παρουσιαστούν οι νέοι εναλλακτικοί τρόποι για έναν αξιόπιστο ανεφοδιασμό πόσιμου νερού. Η σημασία αυτού το προβλήματος αυξάνεται στις υπανάπτυκτες χώρες καθώς επίσης και στις βιομηχανοποιημένες περιοχές. Η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού και του υφαλμυρού νερού είναι μερικές από τις εναλλακτικές λύσεις. Τα τελευταία χρόνια, η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης έχει γίνει όλο και περισσότερο σημαντική έναντι άλλων διαδικασιών αφαλάτωσης. Μερικοί από τους λόγους για αυτήν την τάση είναι η μικρή συγκεκριμένη κατανάλωση ενέργειας αυτής της διαδικασίας και η σημαντική πρόοδος που έγινε στην τεχνολογία μεμβρανών.

5.2 Grid-Connected συστήματα PV

Τα συνδεδεμένα συστήματα PV έχουν πάντα μια σύνδεση στο δημόσιο πλέγμα ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός κατάλληλου αναστροφέα, επειδή μια ενότητα PV παραδίδει μόνο τη συνεχή δύναμη.

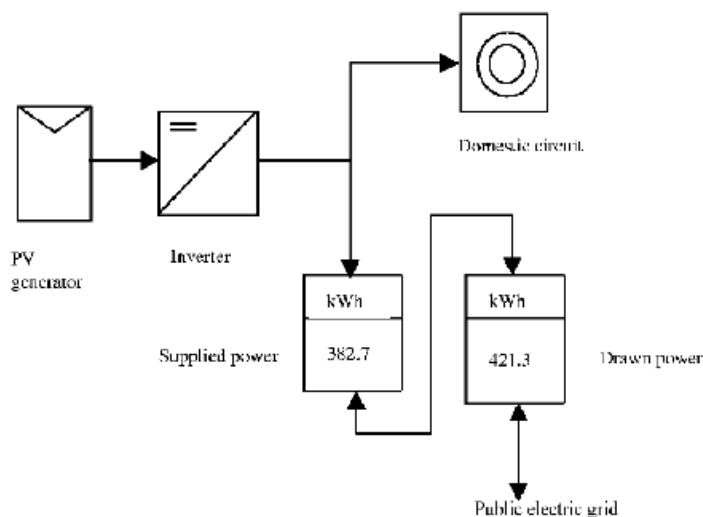
Κανονικά δεν υπάρχει σχεδόν κανένα αποτέλεσμα των συστημάτων PV στο πλέγμα που έχει επιπτώσεις στην ποιότητα δύναμης,τις γραμμές φορτίου , τους μετασχηματιστές, κ.λ.π. Εντούτοις, για ένα μεγαλύτερο μερίδιο του PV στα χαμηλής τάσης πλέγματα, όπως στις ηλιακές εγκαταστάσεις, αυτές οι πτυχές πρέπει να ληφθούν υπόψη. Από τεχνικής άποψης,δεν θα υπάρξει δυσκολία στην ενσωμάτωση τόσο του PV στα χαμηλής τάσης πλέγματα όσο το μέγιστο φορτίο του αντίστοιχου τμήματος . Τα συνδεδεμένα συστήματα PV μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο είδη:

- αποκεντρωμένα συνδεδεμένα συστήματα PV,
- κεντρικά συνδεδεμένα συστήματα PV.

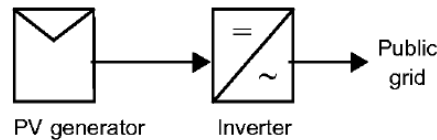
5.2.1 Αποκεντρωμένα συνδεδεμένα συστήματα PV

Τα αποκεντρωμένα συνδεδεμένα συστήματα PV έχουν συνήθως μια μικρή σειρά δύναμης και είναι εγκατεστημένα στη στέγη των κτηρίων (εγκατάσταση στέγης ή επίπεδης στέγης) ή ενσωματωμένα στην οικοδόμηση των προσόψεων .

Η ενεργειακή αποθήκευση δεν είναι απαραίτητη σε αυτήν την περίπτωση. Τις ηλιόλουστες ημέρες, η ηλιακή γεννήτρια παρέχει την ενέργεια, π.χ., για τις ηλεκτρικές συσκευές στο σπίτι.



Σχέδιο 5.14. Διάγραμμα φραγμών της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος για ένα σπίτι με μια αποκεντρωμένη σύνδεση συστημάτων και πλέγματος PV



Σχέδιο 5.15. Σχηματική αρχή ενός grid-connected συστήματος PV η ενέργεια παρέχεται στο δημόσιο πλέγμα.

Υπερβολική ενέργεια παρέχεται από το δημόσιο πλέγμα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας και των συννεφιασμένων ημερών, το σπίτι σύρει τη δύναμη από το πλέγμα (σχέδιο 5.14). Κατά αυτόν τον τρόπο, το ηλεκτρικό πλέγμα μπορεί να θεωρηθεί ως μεγάλη «μονάδα αποθήκευσης». Στην περίπτωση ενός ευνοϊκού, σε ποσοστό, βασισμένο δασμολόγιο για την ηλεκτρική ενέργεια PV, όπως είναι σε ισχύ σε μερικές χώρες, συμφέρει περισσότερο να τροφοδοτήσει όλη την ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια στο πλέγμα.

Παραδείγματος χάριν στη Γερμανία περίπου το 80% των περισσότερων από 50.000 που υπάρχουν συνδεδεμένα συστήματα PV εγκαθίστανται είτε στη στέγη ενός κτηρίου είτε ενσωματώνονται σε μια πρόσοψη οικοδόμησης. Το όφελος της εγκατάστασης ενός συστήματος PV μέσα ή επάνω σε ένα κτήριο είναι ότι καμία ξεχωριστή περιοχή για την ηλιακή γεννήτρια δεν απαιτείται.

5.2.2 Κεντρικά συνδεδεμένα συστήματα PV

Τα κεντρικά συνδεδεμένα συστήματα PV έχουν μια εγκατεστημένη δύναμη μέχρι την MW σειρά. Με τέτοιους κεντρικούς φωτοβολταϊκούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος είναι δυνατό να τροφοδοτηθούν άμεσα στο πλέγμα μεσαίων ή υψηλών τάσεων (σχέδιο 5.15). Κυρίως οι κεντρικοί φωτοβολταϊκοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος είναι οργανωμένοι στο ειδάλως αχρησιμοποίητο έδαφος, αλλά σε μερικές περιπτώσεις η εγκατάσταση στα κτήρια, συνήθως στην επίπεδη στέγη των μεγαλύτερων κτηρίων, είναι επίσης δυνατή. Όπως μπορούμε να δούμε στα σχήματα 5.14

και 5.15 και τα αποκεντρωμένα και τα κεντρικά συνδεδεμένα συστήματα PV αποτελούνται από τα ακόλουθα δύο κύρια συστατικά:

-την ενότητα PV,

-τον αναστροφέα.

Το πλήρες σύστημα αποτελείται από μια δομή, μια καλωδίωση, και άλλα συμβατικά συστατικά, τα οποία δεν μας αφορούν εδώ. Εκτός από τις ενότητες, το πιο σημαντικό μέρος ενός συστήματος είναι ο αναστροφέας, ο οποίος περιγράφεται έπειτα.

5.2.3 Αναστροφέας

Οι αναστροφείς χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν το συνεχές ρεύμα ενός συστήματος PV ή μιας μπαταρίας αποθήκευσης στο εναλλασσόμενο ρεύμα, είτε για να τροφοδοτηθεί το πλέγμα είτε για να εφοδιάσει ένα αυτόνομο σύστημα. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ηλεκτρονικών τοπολογιών δύναμης που χρησιμοποιούνται στην αγορά. Τα πρόωρα συστήματα PV εξοπλίστηκαν με thyristor αναστροφείς, οι οποίοι μεταστρέφονται από το πλέγμα. Λόγω της μικρής τάσης και της ποιότητας του ρεύματος – τέτοιοι αναστροφείς έχουν πολύ μεγάλες αρμονικές - έχουν αντικατασταθεί στην αγορά με self commutating αναστροφείς (με IGBT ή MOSFET ως ημιαγωγό διακόπτης). Μόνο για τους πολύ μεγάλους αναστροφείς PV στα 100 KW thyristor σειράς δύναμης οι αναστροφείς χρησιμοποιούνται ακόμα. Οι πρώτοι self commutating αναστροφείς χρησιμοποιούμενοι διενεργηθέντες διαμόρφωση ημίτονο-κυμάτων του ρεύματος παραγωγής στην αρχική πλευρά και 50 Hz μετασχηματιστής για να προσαρμόσει το επίπεδο τάσης στην τάση πλέγματος. Τέτοιοι αναστροφείς συμβάλλουν ακόμα ένα σημαντικό μερίδιο αγοράς. Μερικοί κατασκευαστές προσφέρουν σήμερα τις συσκευές με τους υψηλής συχνότητας μετασχηματιστές αντί αυτού, κατά συνέπεια μειώνοντας έντονα το βάρος - το κόστος της αποδοτικότητας. Στις χώρες όπου να στηρίξει της γεννήτριας PV είναι οι μη υποχρεωτικοί, μη μετατρέψιμοι transformerless αναστροφείς εισάγονται όλο και περισσότερο. Αυτοί είναι ελαφρύτερος και αποδοτικότερος, αλλά η ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να ληφθεί EMC και ανίχνευση ρευμάτων ελαττωμάτων. Η τμηματική παραγωγή των

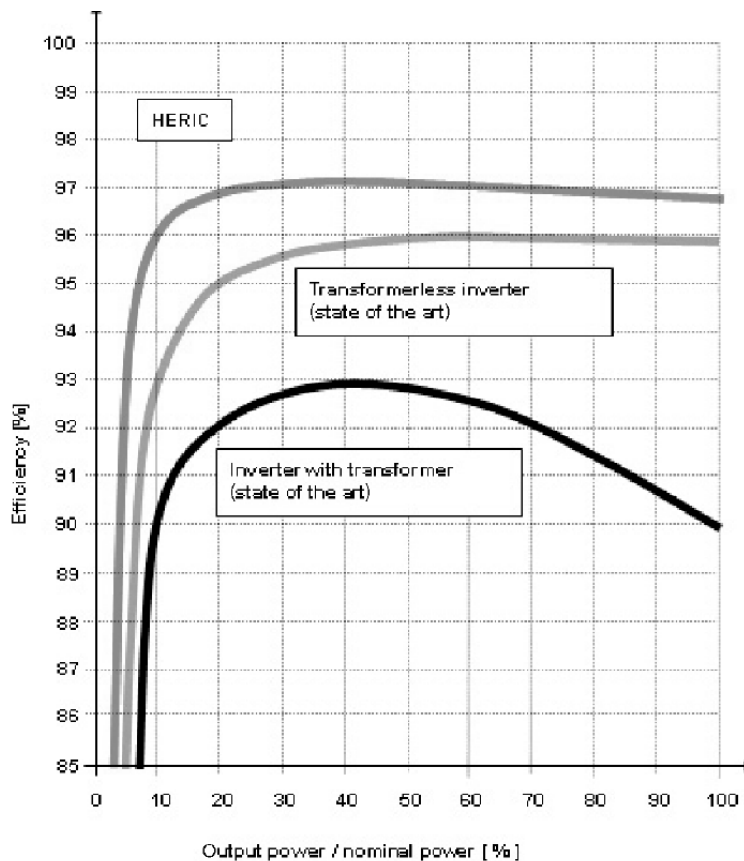
αναστροφών PV προωθήθηκε στη δεκαετία του '90 . Πριν από εκείνο τον χρόνο, μόνο ένας μικρός αριθμός αναστροφών απαιτήθηκε, συνήθως για αυτόνομες εφαρμογές, παραδείγματος χάριν, για τα κατοικημένα συστήματα PV. Επειδή δεν υπήρξε καμία σύνδεση στο δημόσιο πλέγμα, τα πρότυπα της ποιότητας δύναμης μέσα το σύστημα δεν ήταν τόσο σημαντικό όπως πρέπει να είναι εάν η παραγμένη δύναμη τροφοδοτείται το πλέγμα. Ενώ οι πρώτοι αναστροφείς PV ήταν συχνά υιοθετήσεις των ήδη υπαρχόντων αναστροφών για τις ηλεκτρικές κινήσεις, οι σημερινές συσκευές είναι συγκεκριμένες εξελίξεις, λήψη στον απολογισμό η συγκεκριμένες πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις για τις εφαρμογές PV. Αναστροφείας η αποδοτικότητα είναι γενικά σημαντικότερη στις εφαρμογές PV αλλά ιδιαίτερου η σημασία στο μερικό φορτίο, ως όγκο της ενέργειας παράγεται σε μερικό φορτίο. Επιπλέον, με μια γεννήτρια μεγάλος-περιοχής PV που συνδέεται με τη DC πλευρά ο αναστροφείας και το δημόσιο πλέγμα στα δευτερεύοντα, ακριβέστερα πρότυπα εναλλασσόμενου ρεύματος πρέπει συναντιέται όσον αφορά τις αρμονικές και το EMC. Κάποιες κριτήρια σχεδίου και λειτουργία των αναστροφών PV είναι:

- αποδοτικότητα: αρκετά παραπάνω από 90% ήδη κατά 5% του ονομαστικού φορτίου,
- κόστος,
- τάση και τρέχουσα ποιότητα: αρμονικές και EMC,
- ικανότητα υπερφόρτωσης: περίπου 20-30% για τους grid-connected αναστροφείς, μέχρι 200% για τη βραχυπρόθεσμη υπερφόρτωση των αναστροφών νησιών,
- ακριβής και γερή MPP καταδίωξη (σοβαρά που βρίσκει γενικό MPP μέσα μερικές σκιάζοντας καταστάσεις),
- επίβλεψη του πλέγματος, safety/ENS2,
- απόκτηση και έλεγχος στοιχείων.

Προκειμένου να αποτελέσει το γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια PV παράγεται μετά από μια χαρακτηριστική χρονική διανομή, στην Ευρώπη που

ένα σταθμισμένο μέτρο αποδοτικότητας είναι χρησιμοποιημένος για να αθροίσει την καμπύλη αποδοτικότητας των αναστροφών, αποκαλούμενος «ο ευρωπαϊκός αποδοτικότητα.» Οι καλοί αναστροφείς στη σειρά δύναμης KW έχουν μια ευρωπαϊκή αποδοτικότητα από 92-96% και μέχρι 98% για τους μεγάλους κεντρικούς αναστροφείς. Ένας πρόσφατα αναπτυγμένος αναστροφέας που χρησιμοποιεί το HERIC r_ (ιδιαίτερα - αποδοτικό & Αξιόπιστη έννοια αναστροφών) η τοπολογία φθάνει σε μια αποδοτικότητα περίπου 98% Οι αναστροφείς εκτελούν επίσης MPP την καταδίωξη προκειμένου να χρησιμοποιηθεί βέλτιστα Γεννήτρια PV. Πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για MPP την καταδίωξη, προσπάθεια για να αντιμετωπίσει τρεις σημαντικούς στόχους:

- ακρίβεια: υψηλή ακρίβεια MPP της μεγάλης ακρίβειας μέτρησης αναγκών καταδίωξης συστατικά,
- εύρεση της σφαιρικής μέγιστης παραγωγής δύναμης στην περίπτωση της μερικής σκίασης, όταν ένα τοπικό μέγιστο μπορεί να εμφανιστεί,
- γρήγορα αρκετή προσαρμογή MPP στη μεταβαλλόμενη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, π.χ., εάν σύννεφα πέρασμα κοντά. 2 το ENΣ (επίσης αποκαλούμενο MSD) είναι μια συσκευή πρόληψης. Έχει γίνει στάνταρ πρότυπο για τα νέα συστήματα PV. Ελέγχει την τάση πλέγματος, τη συχνότητα πλέγματος, τη σύνθετη αντίσταση πλέγματος, και το ρεύμα επίγειας διαρροής, και αποσυνδέει τον αναστροφέα εάν μια παράμετρος είναι από τα όρια.



Σχέδιο 5.16. Οι καμπύλες αποδοτικότητας τριών αναστροφέων που χρησιμοποιούν το διαφορετικό σχήμα τοπολογιών.

Στο σχέδιο 5.16 παρουσιάζονται καμπύλες αποδοτικότητας τριών αναστροφέων που χρησιμοποιούν διαφορετικές τοπολογίες αναστροφέων. Η κορυφαία καμπύλη είναι για έναν νέο αναστροφέα που χρησιμοποιεί την HERIC τοπολογία. Ο δεύτερος είναι η καμπύλη αποδοτικότητας ενός μη μετατρέψιμου αναστροφέα και το τρίτο η καμπύλη αποδοτικότητας ενός αναστροφέα με το μετασχηματιστή. Τα δύο τελευταία χαρακτηρίζουν την κατάσταση προόδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6 Περιβαλλοντικές επιδράσεις από τα συστήματα PV

Οι επιδράσεις περιβάλλοντος που προκαλούνται από τα συστήματα PV μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες:

- επιδράσεις από την παραγωγή των συστατικών ενός συστήματος PV -
επιδράσεις από την καθημερινή λειτουργία των συστημάτων PV.

6.1 Περιβαλλοντικές επιδράσεις λόγω της κατασκευής από τα συστήματα PV

Το πυρίτιο, το πιο κοινό υλικό ηλιακών κυττάρων, είναι προϊόν της χημικής βιομηχανίας. Ο καθαρισμός περιλαμβάνει πολλά βήματα διαδικασίας που, εντούτοις, ελέγχονται στενά και υπάγονται σε ακριβείς κανονισμούς. Η διαδικασία χρησιμοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο ως κλειστός βρόχος με την ανακύκλωση των αντιδραστηρίων (δείτε το κεφ. 3 για τις λεπτομέρειες της διαδικασίας). Η κατασκευή ηλιακών κυττάρων απαιτεί τη διάχυση, την οξείδωση, και την επαφή των βημάτων για τα οποία διαφορετικές χημικές ουσίες απαιτούνται (κεφ. 4). Είτε ανακυκλώνονται είτε αποβάλλονται με έναν πολύ ελεγχόμενο τρόπο. Οι ενότητες περιλαμβάνουν τις διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής, οι οποίες μερικές φορές αποβάλλουν επιβλαβή αέρια. Όλα αυτά τα βήματα ελέγχονται στενά και κανένα ατύχημα δεν έχει συμβεί ποτέ στην κατασκευή ηλιακών κυττάρων.

Τα κύτταρα ή οι ενότητες που είναι κατεστραμμένα κατά τη διάρκεια της παραγωγής ανακυκλώνονται (δείτε 6.5) κατά τη διαδικασία.

Ο αναστροφέας δεν διαφέρει από κάποιον άλλο ηλεκτρονικό εξοπλισμό και κατασκευάζεται κάτω από τα ίδια πρότυπα της προστασίας του περιβάλλοντος. Επομένως, τονίζει ότι δεν υπάρχει καμία περιβαλλοντική επίδραση από την παραγωγή συστημάτων PV.

Οι ενεργειακές δαπάνες και η εκπομπή άνθρακα από την παραγωγή των συστημάτων PV είναι συζητώνται σχετικά με το χρόνο ενεργειακής επιστροφής κατωτέρω.

6.2 περιβαλλοντικές επιδράσεις από τη λειτουργία από τα συστήματα PV

Κανονικά τα συστήματα PV δεν έχουν καμία επίδραση στο περιβάλλον από τη λειτουργία τους. Δεν διαχέουν το θόρυβο, τα στερεά απόβλητα, ή τα αέρια που θα μπορούσαν να βλάψουν το περιβάλλον. Κατά αυτόν τον τρόπο, τα συστήματα PV και η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν, έχουν μια σημαντική συμβολή στην προστασία του περιβάλλοντος. Αυτό ισχύει για τις βιομηχανικές και αναπτυσσόμενες χώρες. Παραδείγματος χάριν, στις βιομηχανικές χώρες με κάθε KWH που παράγεται από τις εγκαταστάσεις PV αποφεύγεται μια παραγωγή του αερίου θερμοκηπίων διοξειδίου του άνθρακα. Η ποσοτική αποφυγή των συγκεκριμένων εκπομπών θερμοκηπίου εξαρτώνται από το πραγματικό ενεργειακό μίγμα σε κάθε χώρα. Παραδείγματος χάριν, στη Γερμανία για κάθε KWH που παράγεται από τα συστήματα PV αποφεύγονται σχεδόν 650 γραμμάρια του διοξειδίου του άνθρακα, αλλά σε αυτήν την περίπτωση το ποσοστό του καφέ και σκληρού άνθρακα στο επίπεδο αρχικής ενέργειας είναι σχετικά υψηλά. Σε μερικές άλλες χώρες όπως τη Νορβηγία ή την Ελβετία, ένα μεγάλο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από τις εγκαταστάσεις υδρο παραγωγής ενέργειας, και έτσι η αποφυγή των συγκεκριμένων εκπομπών θερμοκηπίων από κάθε KWH παραγμένα από το PV τα συστήματα είναι σαφώς χαμηλότερη. Μια άλλη άποψη είναι ότι στις αναπτυσσόμενες χώρες τα συστήματα PV είναι συχνά η μόνη εναλλακτική λύση στη χρήση του ορυκτού καυσίμου, όπως το υγρό αέριο ή το μαζούτ. Σε αυτήν την περίπτωση, η αποφυγή των συγκεκριμένων εκπομπών θερμοκηπίων είναι εξαιρετικά υψηλή.

Από τότε, όπως αναφέρεται ανωτέρω, τα συστήματα PV δεν παράγουν τις εκπομπές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους που όλες οι εκπομπές του κύκλου ζωής του διοξειδίου του άνθρακα είναι έμμεσοι. Προκύπτουν από τη

διαδικασία παραγωγής και μπορούν να υπολογιστούν με τη διαίρεση του συνολικού ποσού των εκπομπών που παράγονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής όλων των αναγκαίων συστατικών του συστήματος PV, συμπεριλαμβανομένων των πιθανών αντικαταστάσεων, από τη συνολική ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής τους .

Σε περίπτωση ατελειών στην επένδυση των συστατικών των συστημάτων κατά τη λειτουργία, τα χαλασμένα συστατικά πρέπει να αντικατασταθούν με νέα. Εάν τα συστατικά δεν είναι διορθώσιμα, πρέπει να επιστραφούν για ανακύκλωση . (Στις αναπτυσσόμενες χώρες αυτό μπορεί να είναι δύσκολο.) Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι το ανθεκτικότερο μέρος ενός συστήματος PV είναι η ίδια η ηλιακή ενότητα.

6.3 Χρόνος ενεργειακής επιστροφής

Ο χρόνος ενεργειακής επιστροφής ορίζεται ως ο χρόνος που η πηγή ενέργειας - σε αυτήν την περίπτωση η ενότητα PV - πρέπει να λειτουργήσει προκειμένου να ανακτηθεί η ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή της. Υπό την ακριβή έννοια, μόνο οι ανανεωμένες πηγές ενέργειας μπορούν να έχουν έναν χρόνο ενεργειακής επιστροφής, δεδομένου ότι όλα τα άλλα μέσα της ενεργειακής παραγωγής χρειάζονται μια εισαγωγή της αρχικής ενέργειας. Όλες οι προηγούμενες αξιολογήσεις έχουν ρυθμιστεί για να είναι συγκρίσιμες. Οι σταθεροί παράγοντες ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν. - Μόνο οι ενότητες, κανένα τμήμα συστημάτων, συμπεριλήφθηκαν. - Οι τεχνολογίες παραγωγής που μελετήθηκαν ήταν κοντά στις παρούσες τεχνολογίες παραγωγής. Οι μέσοι χρόνοι ενεργειακής επιστροφής για τις διαφορετικές τεχνολογίες παρατίθενται στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1. Σημάνετε τους χρόνους ενεργειακής επιστροφής για τις ενότητες PV των διαφορετικών τεχνολογιών.

Technology	Mono-Si	Multicrys. Si	a-Si	CIS	CdTe
Mean payback time [years]	7.3	4.6	2.8	1.9	1.5

Πίνακας 6.2. Χρόνος ενεργειακής επιστροφής (έτη) για τα πλήρη συστήματα PV

Technology ¹⁾	Alsema	Jungbluth	Knapp	Kato
Single crystal	5.2	5.5	7.0	...
Poly crystal	4.4	4.8	...	...
A-Si	3.6	...	...	3.5
CdTe	...	...	...	2.8
CIS	...	...	3.9	...

¹⁾ all PV modules with frame

Οι χρόνοι επιστροφής πρέπει τώρα να συγκριθούν με τη διάρκεια ζωής των ενότητων. Για τα μόνα και πολύ πολυκρυσταλλικά, οι περισσότεροι κατασκευαστές δίνουν μια εξουσιοδότηση 25 ετών, τα οποία μπορούν να ερμηνευθούν ως πρακτική διάρκεια ζωής τουλάχιστον 30 ετών. Για τις νεώτερες λεπτές τεχνολογίες, οι δεκαετίες εγγυήσεις είναι συνήθεις, αλλά αυτό οφείλεται στην περιορισμένη εμπειρία. Η συνέπεια του πίνακα 9.1 είναι ότι οι ενότητες PV παράγουν μεταξύ 4.1 και 6.7 φορές περισσότερης ενέργειας από ότι απαιτείται για την παραγωγή τους. Ένα περαιτέρω σημείο επ'αυτού είναι το ακόλουθο: Η τεχνολογία κατασκευής σήμερα δεν βελτιστοποιείται για την ελάχιστη ενεργειακή εισαγωγή αλλά για το χαμηλότερο κόστος. Δεδομένου ότι η ενέργεια είναι σχετικά ανέξοδη, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ο πιθανός χρόνος επιστροφής είναι σημαντικά χαμηλότερος από τι παρουσιάζεται εδώ.

Ο πίνακας 6.2 περιέχει τα αποτελέσματα των νεώτερων ερευνών για τους χρόνους ενεργειακής επιστροφής για τα πλήρη συστήματα PV [120].

Με τη σύγκριση των στοιχείων που περιλαμβάνονται στους ανωτέρω δύο πίνακες, μπορεί να είναι βλέποντας ότι δεν υπάρχει μια μεγάλη διαφορά ακόμα κι αν ο πίνακας 6.1 παρουσιάζει ενεργειακή επιστροφή για τις ενότητες PV μόνο και ο πίνακας 6.2 παρουσιάζει χρόνο ενεργειακής επιστροφής για τα πλήρη συστήματα PV. Ακολουθεί ότι η ζήτηση ενέργειας για την κατασκευή των ηλιακών ενοτήτων είναι το κύριο μερίδιο της ζήτησης ενέργειας που απαιτείται για ένα πλήρες σύστημα PV. Η μεγάλη διάδοση των αριθμών δίνει επίσης μια ένδειξη της υψηλής αβεβαιότητας που περιλαμβάνεται σε αυτές τις μελέτες.

6.4 Περιοχή γης που απαιτείται από τα συστήματα PV

Η πρώτη επιλογή για την εγκατάσταση ενός συστήματος PV είναι στα κτήρια ή σε άλλη ανθρώπινη κατασκευή όπως τα εμπόδια ήχου ή τη σκίαση των μερών χώρων στάθμευσης. Πρόσφατα, μερικές μεγάλες εγκαταστάσεις PV δημιουργήθηκαν επίσης στην ανοικτή επαρχία. Σε αυτήν την περίπτωση,



Σχέδιο 6.1. Λεπτομερής άποψη του Solarpark Sonnen (Γερμανία)

υποστηρίζεται ότι μπορούν να καταστρέψουν το τοπίο επειδή καταναλώνουν πολλή περιοχή. Η περιοχή ενότητας μόνο για 1kWp είναι για 10m², αλλά επειδή από τις ενότητες βρίσκονται σε ράφια με διάστημα μεταξύ για να αποτρέπεται η σκίαση, η πραγματική κατανάλωση διαστήματος είναι σημαντικά περισσότερος, όπως φαίνεται στο σχέδιο 5.2. Μέχρι τώρα, μόνο το έδαφος που δεν χρησιμοποιείται για άλλους λόγους έχει χρησιμοποιηθεί για τις εγκαταστάσεις PV, αλλά, όπως επίσης περιγράφεται στη αίρεση. 5.2, είναι δυνατό να συνδυαστεί η γεωργία και η αναπαραγωγή αποθεμάτων με το PV στην ίδια περιοχή.

Το σχήμα 6.1 παρουσιάζει λεπτομερή άποψη του Solarpark Sonnen κοντά σε Passau (Γερμανία), το οποίο ήταν σε λειτουργία από τις Αυγούστου 2002. Η δύναμη αυτής της εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας PV είναι γύρω από 1.7MWp, και οι ηλιακές ενότητες έχουν στηθεί στην ανοικτή ύπαιθρο. Η περιοχή των εγκαταστάσεων χρησιμοποιείται ως λιβάδι για τα πρόβατα συγχρόνως. Συμπερασματικά, αυτά τα παραδείγματα δείχνουν ότι η εγκατάσταση του PV δεν οδηγεί απαραίτητως στην καταστροφή του τοπίου.

6.5 Ανακύκλωση των συστημάτων PV

Ένα συνδεδεμένα σύστημα PV αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά (δείτε επίσης τη αίρεση. 5.2):

- ηλιακή ενότητα,
- αναστροφέας, και
- υλικό εγκαταστάσεων (π.χ., να τοποθετήσει ράφια, καλώδια, κ.λπ.). Για τα αυτόνομα συστήματα (δείτε το κεφ. 5), συχνά ένας αναστροφέας δεν είναι απαραίτητος, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις χρειάζονται έναν ελεγκτή δαπανών και τις μπαταρίες. Τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά συστατικά ενός συστήματος PV όπως ο αναστροφέας, μπαταρίες, ο ελεγκτής δαπανών, και τα καλώδια μπορούν να ανακυκλωθούν από τις υπάρχουσες και αποδεδειγμένες τεχνολογίες χωρίς οποιαδήποτε προβλήματα.

Τα υλικά εγκατάστασης (παραδείγματος χάριν, τοποθετώντας υποστηρίξεις ή πλαίσια για την ολοκλήρωση προσόψεων των ηλιακών

ενοτήτων) συνήθως αποτελούνται από μέταλλο (αρίστης ποιότητας χάλυβας ή αλουμίνιο), τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν όπως το κανονικό παλιοσίδηρο.

Οι ειδικές τεχνολογίες απαιτούνται για την ανακύκλωση των ηλιακών ενοτήτων ανεξάρτητα από εάν οι ηλιακές ενότητες γίνονται από το κρυστάλλινο πυρίτιο, το άμορφο πυρίτιο, ή άλλο λεπτό υλικό. Η αυξανόμενη χρήση των φωτοβολταϊκών το καθιστά απαραίτητο όχι μόνο να αναπτύξει τις μεθόδους για την ενέργεια και την υλική αποδοτική παραγωγή των ηλιακών ενοτήτων, αλλά και να δημιουργήσει τις αποδοτικές μεθόδους για η ανακύκλωση των ηλιακών ενοτήτων . Η ανακύκλωση των ενοτήτων PV έχει ερευνηθεί και ουσιαστικά και θεωρητικά. Δεν υπάρχουν προβλήματα με την ανακύκλωση, αλλά μόνο μια δυνατότητα ανακύκλωσης λειτουργεί, όπως περιγράφεται κατωτέρω. Λόγω της μακροχρόνιας διάρκειας ζωής των ενοτήτων, δεν υπήρξε απλά τίποτα που να ανακυκλώνεται. Ήδη οι περισσότεροι κατασκευαστές δίνουν εγγύηση σήμερα ότι όλα τα υλικά που χρησιμοποιούν για την παραγωγή της ενότητας PV ή των συστημάτων μπορούν να ανακυκλωθούν. Στο μέλλον, θα είναι απαραίτητο να καθιερωθεί ένα πανεθνικό σύστημα συλλογής για τις ελαττωματικές ή παλαιές ενότητες. Μια άλλη δυνατότητα είναι ότι στο μέλλον όλοι οι κατασκευαστές των ηλιακών ενοτήτων θα υποχρεωθούν στην ανάκληση ηλιακών ενοτήτων από την παραγωγή τους. Για αυτό, ο κατασκευαστής ή οι εταιρίες εγκαταστάσεων, θα πρέπει να συλλέξουν τις ελαττωματικές ηλιακές ενότητες άμεσα από τους χειριστές των συστημάτων PV.

6.5.1 Ανακύκλωση των κρυστάλλινων ενοτήτων πυριτίου PV

Με μια χρονική καθυστέρηση που καθορίζεται από τη διάρκεια ζωής των ηλιακών ενοτήτων, το ποσό των ελαττωματικών ενοτήτων που διατίθενται ή που ανακυκλώνονται αυξάνεται γρήγορα. Εάν υποθετικά έχουμε μια μέση διάρκεια ζωής ηλιακών ενοτήτων των είκοσι ετών, οι ηλιακές ενότητες που κατασκευάστηκαν το 1985 εμφανίζονται για ανακύκλωση το 2005 και οι ενότητες που κατασκευάστηκαν το 2003 δεν εμφανίζονται για την ανακύκλωση πριν από το έτος 2023.

Όπως αναφέρεται εδώ , ένας τομέας των ηλιακών ενοτήτων περίπου 0.228km² με μια μάζα σχεδόν 2.300 τ κατασκευάστηκε το 1985. Μόνο δέκα έτη αργότερα, η κατασκευασμένη μάζα των ηλιακών ενοτήτων αυξήθηκε σε 8.480 τ . Αυτό είναι ισοδύναμο με μια περιοχή περίπου 0.848km². Το μεγαλύτερο μέρος αυτού είναι ενιαίο κρύσταλλο ή πολυκρυσταλλικές ενότητες. Το ποσοστό των λεπτών ενοτήτων είναι πολύ χαμηλό.

Στην αρχή του νέου αιώνα, η ετήσια παγκόσμια παραγωγή των ηλιακών ενοτήτων αυξήθηκε σε περίπου 400MWp . Αυτό αποτελεί μια περιοχή ενότητας περίπου 4.0km² και μια ηλιακής μάζας ενότητα σχεδόν 40.000 τ. Πρέπει να αναμένεται ότι η ετήσια παραγωγή θα αυξηθεί τουλάχιστον κατά περίπου 15% το χρόνο.

Περισσότερο από 80% εκείνων των ηλιακών ενοτήτων θα γίνει από ενιαίος ή πολυ κρυστάλλινο πυρίτιο. Αυτή τη στιγμή, οι κατασκευαστές δίνουν μια εγγύηση για τη διάρκεια ζωής της ενότητας περίπου των είκοσι πέντε ετών, αλλά μπορεί να υποθεθεί ότι η πραγματική διάρκεια ζωής.

Table 9.3. Classification of crystalline silicon solar modules [123]

Type of module	Embedding material	Front and back side
Standard modules	Film compound (EVA)	Glass – glass Glass – Tedlar TM Glass – Tefzel TM Fluorine polymer – fluorine polymer
	Cast resin (acrylate)	Glass – glass
Facade modules	Film compound (EVA, PVB)	Glass – glass Glass – insulation glass
	Cast resin (acrylate)	Glass – glass
Other module types	As above	As above

Πίνακας 6.3. Ταξινόμηση των κρυστάλλινων ηλιακών ενοτήτων πυριτίου.

των ηλιακών ενοτήτων είναι μακρύτερη από τον εγγυημένο χρόνο, ίσως περίπου τριάντα έτη. Επομένως, το χρόνο στον οποίο η ανακύκλωση ενός

τέτοιου μεγάλου ποσού ηλιακών ενότητων που είναι απαραίτητη θα καθυστερήσει μέχρι το έτος 2030 και αργότερα.

Ένα πρόσθετο γεγονός πρέπει επίσης να εξεταστεί. Στα ερχόμενα έτη, οι ενότητες θα παραχθούν με καλύτερες αποδοτικότητες από ότι οι ενότητες σήμερα. Είναι κατανοητό ότι οι πλήρως λειτουργικές ενότητες θα αντικατασταθούν με νεώτερες και καλύτερες, και επίσης οι αντικατεστημένες θα πρέπει να ανακυκλωθούν.

Εξετάζοντας αυτά τα γεγονότα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μέχρι το 2015/2020 οι οικονομικές και αποδοτικές μέθοδοι ανακύκλωσης για τις ηλιακές ενότητες πρέπει να είναι σε ισχύ.

Οι προς το παρόν διαθέσιμες κρυστάλλινες ηλιακές ενότητες πυριτίου μπορούν να διαιρεθούν σε διάφορες κατηγορίες, όπως φαίνεται στον πίνακα 6.3.

Ανάλογα με τον κατασκευαστή, οι ηλιακές ενότητες περιέχουν διαφορετικά υλικά για το στρώμα αντανάκλασης, την επιμετάλλωση, συνδέσεις κυττάρων, κιβώτιο καλωδίων, σφραγισμένα υλικά, και πλαίσια. Ο πίνακας 6.4 παρουσιάζει έναν κατάλογο υλικών που μπορεί να βρεθεί στις ηλιακές ενότητες και τα κατά προσέγγιση μαζικά ποσοστά τους.

Τα στοιχεία στον πίνακα 6.4 δεν περιέχουν τα πλαίσια και τα υλικά τους. Το μαζικό ποσοστό των πλαισίων μπορεί να ανέλθει μέχρι 50%. Στον πίνακα 6.4, τα συστατικά και τα υλικά μιας αποκαλούμενης τυποποιημένης ηλιακής ενότητας με μια περιοχή 0.5m² παρατίθενται. Σε αυτήν την περίπτωση, το μαζικό ποσοστό του πλαισίου είναι μεταξύ 10 και 25%. Ο πίνακας 6.4 δείχνει ότι οι ηλιακές ενότητες περιέχουν ένα πλήθος διαφορετικών υλικών. Επομένως, μια τεχνολογία ανακύκλωσης είναι πολύ απαιτητική.

Οι κατασκευαστές έχουν ήδη κάποια εμπειρία στην ανακύκλωση, επειδή όχι όλες οι ενότητες ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές. Μερικοί μπορούν να πωληθούν σε χαμηλότερες τιμές, αλλά μερικές πρέπει να απορριφθούν και ανακυκλώνονται στο εργοστάσιο. Εκτός από την εσωτερική ανακύκλωση, οι εξωτερικές τεχνολογίες ανακύκλωσης αναπτύσσονται προς το παρόν.

Οι ακόλουθες μέθοδοι έχουν προταθεί και αποτελούν αυτή τη στιγμή τα αντικείμενα των δραστηριοτήτων έρευνας και ανάπτυξης.

Ο πλήρης χωρισμός των ηλιακών ενοτήτων στα συστατικά τους (π.χ., γυαλί, ηλιακά κύτταρα, μέταλλο) με στόχο να χρησιμοποιούν τα συστατικά για να κατασκευάσουν νέες ηλιακές ενότητες. Για αυτόν το λόγο, μια πολύ λεπτομερής ταξινόμηση των ενοτήτων στην ανακύκλωση, είναι απαραίτητη.

Components	Used materials	Approximate mass percentage without frames (%)
Glass (2–10 mm)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO, MgO, Na ₂ O, K ₂ O, SO ₃	30–65
Transparent adhesive (1–2 mm)	EVA, acrylate (PVB)	5–10
Solar cell (200–400 μm)	silicon	5–10
Connection material (0.04 × 2–0.2 × 5)	Cu (Sn, Pb, Ag), Al (Mg, Si)	1
Metallization	Ag, SiO ₂ , Cu, Ni, Al, Ti, Pd, Sn	< 0.1
Antireflection layer	TiOx, SixNy	> 0.1
Doping	B or Al, Ga, In, P or As, Sb	
Cable 1.5–2.5 mm ²	Cu, PVC, rubber, silicone, PTFE	1
Connection box	PVC, PC, PET, ABS, Cu, brass, steel, rubber	0–5
Sealing, gum	silicone, butyl, polysulfide, cyanacrylate	0–10
Back side material	chlorofluorcarbon, polyester	0–10

Πίνακας 6.4. Υλικά που περιλαμβάνονται στις ηλιακές ενότητες

Η ταξινόμηση πρέπει να διακρίνεται μεταξύ των ενοτήτων από διαφορετικούς κατασκευαστές και, σε μερικές περιπτώσεις, ακόμη και μεταξύ των τύπων ενότητας των ίδιων κατασκευαστών. Μετατροπή της πλήρους ενότητας στην αποκαλούμενη σιδηροσιλικόνη από μια υψηλής θερμοκρασίας θερμική διαδικασία. Ο χωρισμός στα συστατικά δεν είναι έπειτα απαραίτητος. Το μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας ανακύκλωσης είναι ότι το υλικό δεν γίνεται να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των ηλιακών κυττάρων ή των

ηλιακών ενοτήτων. Η προκύπτουσα σιδηροσιλικόνη μπορεί μόνο να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του χάλυβα.

Χωρισμός του πλήρους ηλιακού κυττάρου πυριτίου από τη διαφανή κόλλα και το υλικό ενσωμάτωσης με την ενυδάτωση στα οξέα. Τα εργαστηριακά τεστ που πραγματοποιούνται από τη BP έχουν δείξει ότι κατά αυτόν τον τρόπο περίπου 75% των γκοφρετών θα μπορούσε να παρθεί για την κατασκευή των νέων ηλιακών κυττάρων, τα οποία, εντούτοις, είχαν μια χαμηλότερη αποδοτικότητα.

Κάψιμο του υλικού ενσωμάτωσης υπό ελεγχόμενες συνθήκες – με έναν τρόπο που οι πλάκες γυαλιού, το μέταλλο, και το σχεδόν 90% των κρυστάλλινων ηλιακών κυττάρων πυριτίου μπορούν να χωριστούν από την ενότητα. Μόλυνση με το μέταλλο και τα πλαστικά δεν συμβαίνει. Σε ένα επόμενο βήμα επεξεργασίας, οι επιφάνειες των ηλιακών κυττάρων καθαρίζονται. Τα προκύπτοντα ηλιακά κύτταρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή νέων ηλιακών ενοτήτων. Η αποδοτικότητά τους δεν είναι διαφορετική από αυτήν των πρόσφατα κατασκευασμένων κυττάρων. Η ποιότητα του προκύπτοντος γυαλιού είναι επαρκής για κατασκευή των ενοτήτων.

Όπως αναφέρεται, ειδικά στη Γερμανία, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε χωριστές ηλιακές ενότητες στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις για την ανακύκλωση του comrod γυαλί. Αλλά οι δοκιμές έχουν δείξει ότι αυτό δεν είναι οικονομικό ακόμα και για το μέλλον και ότι το προϊόν δεν έφθασε στο απαραίτητο αποτέλεσμα για την περαιτέρω επεξεργασία.

Λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερθείσες πληροφορίες, η ανακύκλωση των ηλιακών ενοτήτων με στόχο να χρησιμοποιηθούν τα προκύπτοντα συστατικά για την κατασκευή νέων ηλιακών ενοτήτων μπορούν να πραγματοποιηθούν από τις πρόσθετες τεχνολογίες. Προς το παρόν, τις καλύτερες πιθανότητες έχει μια θερμική διαδικασία.

Οι πρώτες παγκόσμιες πειραματικές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνολογία ανακύκλωσης άρχισαν τη λειτουργία τον Ιούνιο 2003 στο Solar World στο Freiberg, της Γερμανίας. Οι παλαιές ή κατεστραμμένες

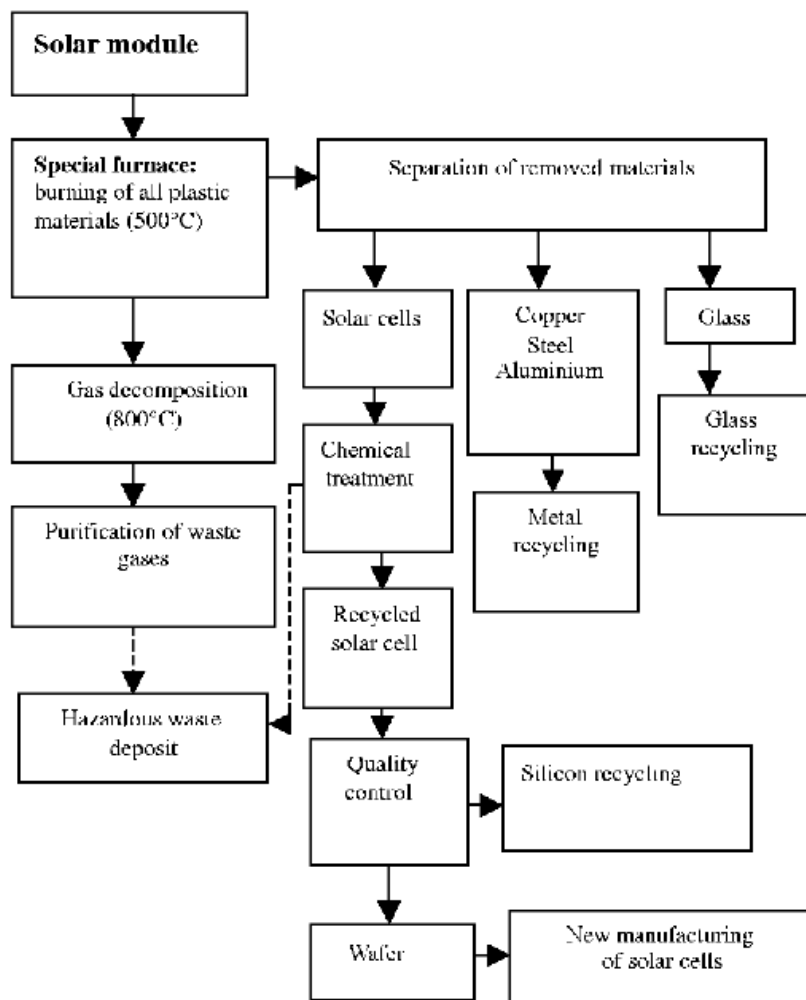
ενότητες τοποθετούνται σε έναν πρόσθετο φούρνο που θερμαίνεται με το φυσικό αέριο. Η θερμοκρασία της λειτουργίας είναι μέχρι 500°C. Σε αυτήν την θερμοκρασία όλα τα πλαστικά υλικά που περιλαμβάνονται στις ενότητες αποσυντίθενται. Μόνο τα ανόργανα υλικά παραμένουν: χάλυβας, χαλκός ή αλουμίνιο, πλάκες γυαλιού, και τα ηλιακά κύτταρα. Τα μεταλλικά υλικά εισάγονται σε μια συμβατική διαδικασία ανακύκλωσης μετάλλων. Το ανακτημένο γυαλί επιστρέφεται στη διαδικασία γυαλιού επιπλεόντων σωμάτων. Τα ηλιακά κύτταρα, εάν από τη θερμική επεξεργασία δεν έχουν σπάσει, είναι χωρισμένα από το πλέγμα μετάλλων στην επιφάνεια και το μεταλλικό στρώμα στην πίσω πλευρά και από το στρώμα αντανάκλασης με μια διαδικασία χαρακτηριστικής. Επίσης, και οι ναρκωμένες ζώνες είναι χαραγμένες. Τα σπασμένα ηλιακά κύτταρα μπορούν να ανακυκλωθούν μαζί με άλλα απόβλητα πυριτίου.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι μια σχεδόν νέα γκοφρέτα πυριτίου που μπορεί να τροφοδοτείται από την παραγωγή των ηλιακών κυττάρων χωρίς προβλήματα. Ο φούρνος των πειραματικών εγκαταστάσεων μπορεί να επεξεργαστεί τις ηλιακές ενότητες έως ένα μέγεθος 1.50 έως 2.20 μέτρων. Για αυτήν την διαδικασία, μια λεπτομερής προεργασία των ηλιακών ενοτήτων που ανακυκλώνονται δεν είναι απαραίτητο. Το κάψιμο των πλαστικών υλικών που περιλαμβάνονται στις ηλιακές ενότητες προκαλεί την εκπομπή μερικών επιβλαβών αερίων όπως το φθορίδιο υδρογόνου. Αυτά τα αέρια αποσυντίθενται σε 800°C και έπειτα καθαρίζονται περαιτέρω. Στο σχήμα 9.2, μια σχηματική έρευνα για τη διαδικασία δίνεται.

Με τη χρησιμοποίηση αυτής της θερμικής διαδικασίας, σχεδόν 80% της αρχικής ενέργειας μιας κανονικής ηλιακής ενότητας μπορεί να σωθεί. Οι πειραματικές εγκαταστάσεις στο Freiberg είναι σε θέση να ανακυκλώσουν περίπου 150 τόνους των ηλιακών ενοτήτων το χρόνο σε μια one-shift λειτουργία. Η βελτιστοποίηση των πειραματικών εγκαταστάσεων πρέπει να έχει τελειώσει στις αρχές του 2005. Γενικά, ο Solar World προγραμματίζει μια τεχνική λύση για ολόκληρη τη φωτοβολταϊκή βιομηχανία στην Ευρώπη για την ανάπτυξη αυτής της διαδικασίας.

6.5.2 Ανακύκλωση των άμορφων ενοτήτων πυριτίου PV

Αυτή τη στιγμή και επίσης στο κοντινό μέλλον, το ποσοστό των ενοτήτων άμορφου πυριτίου που ανακυκλώνονται είναι και θα παραμείνουν χαμηλές. Επιπλέον, το υλικό κυττάρων είναι μια πολύ λεπτή ταινία που αποτελεί το λιγότερο από το 1% της ενότητας. Το διαφανές αγωγίμο στρώμα ITO (ίνδιο-κασσίτερος-οξειδίων) περιέχει μια μικρή ποσότητα



Σχέδιο 6.2. Σχηματική έρευνα για τη θερμική διαδικασία για την ηλιακή ανακύκλωση ενότητας

από βαριά μέταλλα In και Sn. Ένας καλός τρόπος να ανακυκλωθεί το άμορφο πυρίτιο PV των ενοτήτων είναι να αφαιρεθούν τα ενεργά στρώματα από το γυαλί με την αμμόστρωση. Δεν είναι οικονομικό να χωριστούν τα λεπτά υλικά. Μόνο το γυαλί μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Η θερμική διαδικασία που περιγράφεται ανωτέρω είναι επίσης χρήσιμη για τις άμορφες ενότητες.

6.5.3 Ανακύκλωση του σύνθετου ημιαγωγού

Λεπτές ενότητες PV

Σε αντίθεση με τις άμορφες ενότητες, άλλες λεπτές ενότητες περιέχουν τα τοξικά υλικά όπως telluride καδμίου ή το σελήνιο (δείτε κατωτέρω).

Μια απλή, οικονομικώς αποδοτική μέθοδος για την ανακύκλωση των ενοτήτων CdTe έχει επινοηθεί για να εξετάσει τα περιβαλλοντολογικά θέματα που συνεπάγονται τη νέα φωτοβολταϊκή τεχνολογία CdTe. Η μέθοδος είναι βασισμένη σε έναν κλειστό βρόγχο ηλεκτροχημικής προσέγγισης για να μετατρέψει γρήγορα τις ελαττωματικές ή ξοδευμένες ενότητες σε αποδοτικές συσκευές. Αυτή η μέθοδος αφαιρεί και χωρίζει τα τμήματα συσκευών και αναπαράγει τις ταινίες ημιαγωγών σε μια νέα επιτροπή σε ένα ενιαίο συμπαγές σύστημα, που δεν αφήνει κανένα απόβλητο .

6.5.4 Ζήτηση ενέργειας για την ανακύκλωση των ενοτήτων

PV

Επειδή οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες για την ανακύκλωση των ενοτήτων PV είναι ακόμα στην κατάσταση έρευνας και ανάπτυξης, καμία αξιόπιστη πληροφορία για τη ζήτηση ενέργειας για ανακύκλωση δεν είναι διαθέσιμη. Η θερμική διαδικασία για την ανακύκλωση ηλιακών ενοτήτων που περιγράφονται στο κεφ. 6.5.1 εξοικονομεί σχεδόν το 80% της αρχικής ζήτησης ενέργειας που είναι απαραίτητη για την κανονική κατασκευή μιας κρυστάλλινης ηλιακής ενότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7 Το μέλλον του PV

7.1 Όροι για τη μελλοντική ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών

7.1.1 Κόστος ανάπτυξης της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας

Το κόστος ανάπτυξης της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένας πολύ σημαντικός όρος για τη μελλοντική χρήση των φωτοβολταϊκών . Γενικά, μπορεί να υποθεθεί ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας πλέγματος θα αυξηθεί αργά κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών. Η κλίση αυτής της ανόδου εξαρτάται από τις ακόλουθες επιρροές: βαθμός φιλελευθεροποίησης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, περιθώρια για την ασφάλεια του ανεφοδιασμού, αναλογία από τη διανεμημένη παραγωγή, π.χ., συμπαραγωγή, περιβαλλοντικοί περιορισμοί, και τελευταίο αλλά όχι ασήμαντο, τη μοίρα της ατομικής ενέργειας. Σχεδόν όλες αυτές οι επιρροές, με εξαίρεση τη φιλελευθεροποίηση, στρέφονται προς το υψηλότερο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Μια άλλη επιρροή προέρχεται από την ανάπτυξη των τεχνολογιών αποθήκευσης. Προς το παρόν, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ένα τεχνικό, αλλά ένα οικονομικό πρόβλημα. Η μεγάλης κλίμακας, συνδεδεμένη στο πλέγμα αποθήκευση είναι δυνατή μόνο με υδροεγκαταστάσεις άντλησης, οι οποίες είναι πολύ περιορισμένες στη δυνατότητά τους. Οι μπαταρίες αποθήκευσης χρησιμοποιούνται ευρέως στα αυτόνομα και κινητά συστήματα, αλλά είναι επίσης πολύ ακριβές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας του πλέγματος. Εάν το μέγιστο των δυνατοτήτων των φωτοβολταϊκών πρόκειται να πραγματοποιηθεί, τα καλύτερα μέσα αποθήκευσης είναι απαραίτητα. Η οικονομία υδρογόνου θα ήταν μια λύση στο πρόβλημα της αποθήκευσης, όπως θα επισημανθεί αργότερα.

7.1.2 αποτελέσματα της φιλελευθεροποίησης και των περιβαλλοντικών περιορισμών

Η φιλελευθεροποίηση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που συνεχίζεται παγκοσμίως θα επηρεάσει τη διείσδυση των συνδεδεμένων συστημάτων PV. Οι ακόλουθες τάσεις μπορούν να αναγνωριστούν :

- Η φιλελευθεροποίηση θα οδηγήσει σε αυξημένα οικονομικά, δηλ., χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά αυτό μπορεί να περιοριστεί στους μεγάλης κλίμακας καταναλωτές. Επομένως, η γενική συνέπεια θα μπορούσε να είναι ουδέτερη σχετικά με την επέκταση του PV σε διανεμημένα συστήματα.

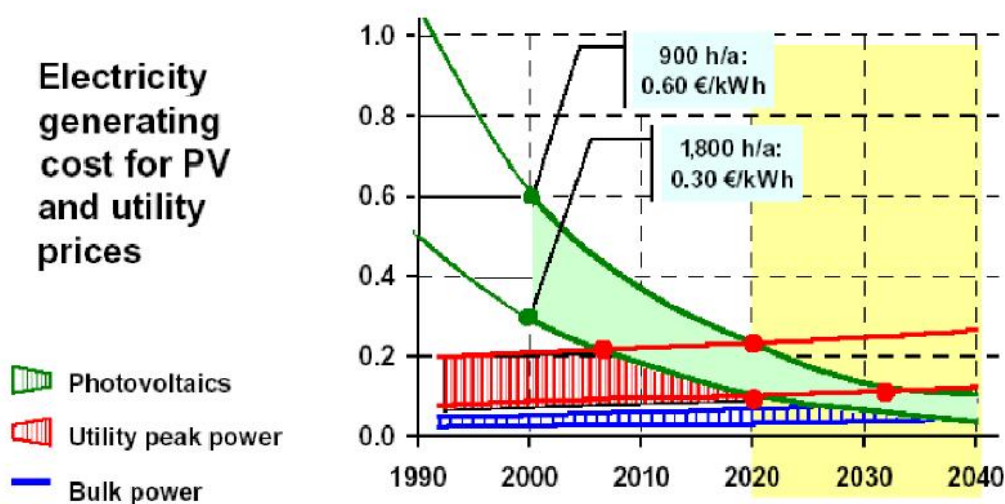
- Οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας θα απεικονίσουν το πραγματικό κόστος της παραγωγής. Οι τιμές θα κυμανθούν ευρέως ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την εποχή. Από την στιγμή που ένα μεγάλο μέρος από την ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κατά τη διάρκεια της περιόδου υψηλών τιμών, αυτό θα είναι ευεργετικό για το PV.

- Το κόστος της απόδοσης θα οδηγήσει σε μια χαμηλότερη ασφάλεια του ανεφοδιασμού. Ο ρόλος του PV ως συνοδευτική πηγή θα είναι ευνοϊκός για αυτήν την αγορά.

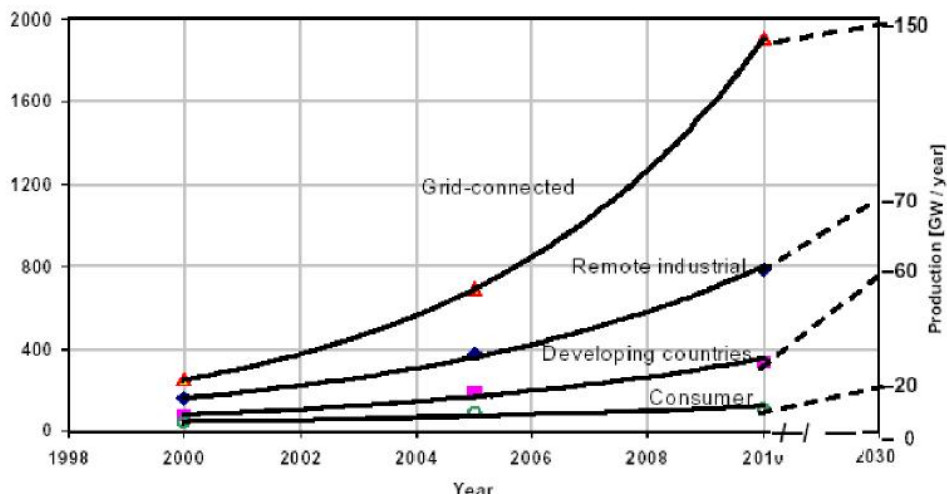
7.2 Κόστος και ανάπτυξη αγοράς αυτόνομου και συνδεδεμένου συστήματος

Το μέλλον του PV εξαρτάται κυρίως από την ανάπτυξη δαπανών για τις ενότητες και ολόκληρα τα συστήματα. Αυτή η ανάπτυξη μπορεί να προβλεφθεί με την παρέκταση της καμπύλης μάθησης. Αυτή η καμπύλη δείχνει τη σύνδεση μεταξύ της συσσωρευμένης (ή της συνολικά εγκατεστημένης) ικανότητας σε kWp και της τιμής. Για τις ενότητες, οι οποίες είναι το ακριβότερο μέρος του συστήματος η καμπύλη, είναι καθιερωμένη για περισσότερο από είκοσι έτη. Προβλέπει μια μείωση τιμών της τάξεως του 20% για κάθε διπλασιασμό της συσσωρευμένης παραγωγής. Πρέπει να γίνουν υποθέσεις για την ανάπτυξη της αγοράς για μια τέτοια πρόβλεψη. Εάν οι παρόντες μηχανισμοί υποστήριξης διατηρηθούν, το τρέχον ποσοστό αύξησης

θα συνεχιστεί και στο μέλλον. Μια εκτίμηση για την ανάπτυξη της αγοράς δίνεται από τον W. Hoffmann : 30% το χρόνο έως το 2010 και 25% έκτοτε. Με τέτοιες υποθέσεις, η ανάπτυξη τιμών που παρουσιάζεται στο σχέδιο 7.1 μπορούν να προβλεφθούν. Το σχήμα 7.1 δίνει ένα πιθανό σενάριο για τα συνδεδεμένα συστήματα. Το κόστος για το διανεμημένο PV σχεδιάζεται για διαφορετικά μέρη της Ευρώπης, έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία 900 h/year για την κεντρική Ευρώπη, και 1.800 για τη νότια Ευρώπη. Αυτό συγκρίνεται με τη χρησιμότητα του φάσματος τιμών πώλησης για τη μέγιστη δύναμη. Επίσης σχεδιάζεται το κόστος της μαζικής δύναμης. Δεδομένου ότι η δύναμη PV είναι κατά ένα μεγάλο μέρος η μέγιστη δύναμη, το PV έχει μια πιθανότητα για να γίνει ανταγωνιστικό με τη μέγιστη δύναμη χρησιμότητας στη νότια Ευρώπη μεταξύ του 2008 και του 2020 και περίπου το 2030 στη βόρεια και κεντρική Ευρώπη. Ο ανταγωνισμός με τη μαζική δύναμη θα πάρει πολύ περισσότερο.



Σχέδιο 7.1. Τιμή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προβλέπεται έως το 2040



Σχέδιο 7.2. Πρόβλεψη της ανάπτυξης των διαφορετικών τομέων της αγοράς έως το 2030. (Σημειώστε τη διαφορετική κλίμακα στη δεξιά πλευρά της γραφικής παράστασης)

Μελλοντική ανάπτυξη των αγορών

Το σχήμα 7.2 δίνει μια εντύπωση της μελλοντικής ανάπτυξης των διαφορετικών αγορών, επίσης από . Η αγορά θα παραμείνει ο σημαντικότερος τομέας, αλλά οι άλλοι τομείς, μακρινές βιομηχανίες, οι αναπτυσσόμενες χώρες και τα καταναλωτικά προϊόντα μαζί σχεδόν φθάνουν το ίδιο μέγεθος. Αυτές οι αγορές είναι, φυσικά, αλληλοεξαρτώμενες. Μόνο από τις μειώσεις τιμών λόγω της επέκτασης της αγοράς συνδεδεμένου PV, μπορούν οι άλλοι τομείς να αυξηθούν αναλόγως.

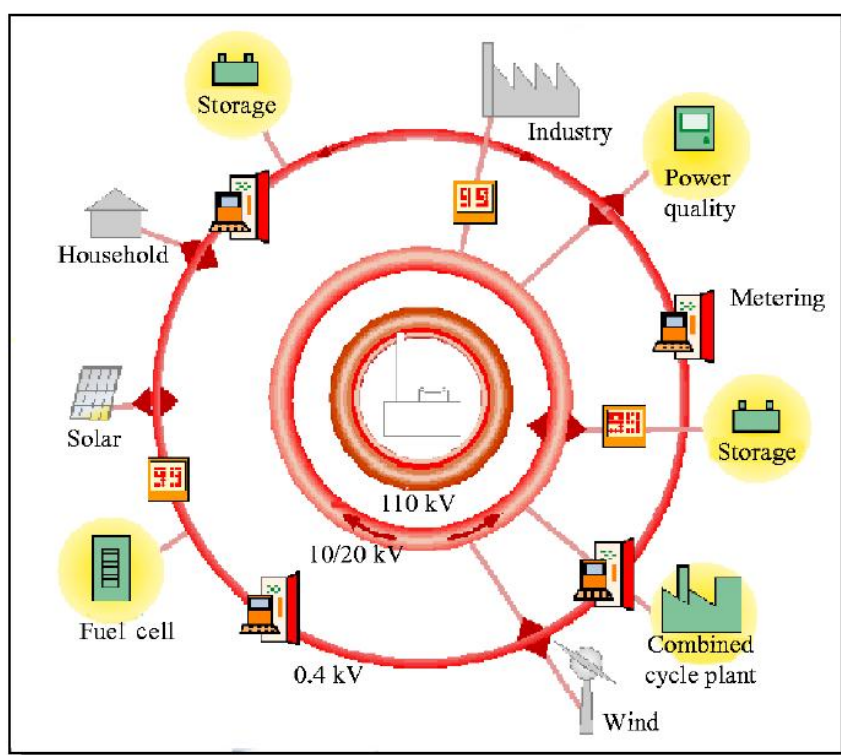
7.3 PV σε ένα φιλελευθεροποιημένο μέλλον και εν μέρει αποκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα

Τα μελλοντικά πλέγματα ηλεκτρικής ενέργειας θα έχουν ένα μίγμα κεντρικής και αποκεντρωμένης ικανότητας παραγωγής. Οι κεντρικές συμβατικές και ανανεώσιμες εγκαταστάσεις θα συγχρονιστούν με τη μικρή και μέση διανεμημένη παραγωγή. Η σύγχρονη ηλεκτρονική θα επιτρέψει έναν υψηλό βαθμό του ελέγχου, οδηγώντας σε μια γρήγορη ρύθμιση του οικονομικού

βέλτιστου. Πολύ σημαντική σε αυτό το σχέδιο είναι η δυνατότητα της τοπικής αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

7.3.1 Ένταξη του PV σε ένα αποκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα

Τα παρόντα πρότυπα ενός διανεμημένου ενεργειακού συστήματος προβλέπουν το PV σε πολλές στέγες ή παρόμοιες δομές που αλληλεπιδρούν με ένα πλέγμα ηλεκτρικής ενέργειας και άλλες τοπικές γεννήτριες και καταναλωτές. Η απαίτηση μπορεί να προσαρμοστεί σε κάποιο βαθμό από κεντρικό έλεγχο. Εκτός από το PV, άλλες μικρές γεννήτριες μπορούν να συνδεθούν με το πλέγμα όπως οι συνδυασμένες εγκαταστάσεις θερμότητας και παραγωγής ενέργειας, μερικές βασισμένες στα βιολογικά καύσιμα, τα κύτταρα καυσίμου, και



Σχέδιο 7.3. Δομή ενός μελλοντικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

η τοπική αποθήκευση στις μπαταρίες ή πιθανότερα από το υδρογόνο. Οι κεντρικές εγκαταστάσεις μπορούν να προγραμματιστούν από τις καιρικές προβλέψεις που προβλέπουν τον αέρα και την ηλιοφάνεια. Οι διαφορετικές ανανεώσιμες ενέργειες που ενεργούν από κοινού έχουν την πολύ χαμηλότερη διακύμανση από καθεμία απ' ότι οι ίδιες. Ένα ιδιαίτερο ποσοστό της τοπικής παραγωγής και της αποθήκευσης μπορεί να μειώσει το κόστος των πλεγμάτων διανομής και να ενισχύσει την ασφάλεια του ανεφοδιασμού. Πολλή εργασία παραμένει να γίνει στην επίλυση των δομών πλέγματος και ελέγχου για ένα τέτοιο σενάριο. Αναμφισβήτητα, το PV θα παίξει έναν κύριο ρόλο σε μια τέτοια νέα σκηνή ηλεκτρικής ενέργειας. Το έργο του Edison που υποστηρίζεται από το γερμανικό Υπουργείο Οικονομικών και Τεχνολογίας έχει στόχο την ανάπτυξη και επίδειξη «έξυπνων» συστημάτων για τέτοια διανεμημένα πλέγματα. Περιλαμβάνει ιδιαίτερα, το συνδυασμό του ηλεκτρικού πλέγματος και των συστημάτων επικοινωνιών. Η δομή ενός τέτοιου μελλοντικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στο σχέδιο 7.3.

7.3.2 Πλήρως αυτόνομα συστήματα, αυτόνομα σχέδια για σπίτια

Ένα πλήρως αυτόνομο σύστημα έχει καταδειχθεί ήδη ως το μόνο «αυτάρκες ηλιακό σπίτι» (κεφ. 5.1.4). Σε αυτό το πρόγραμμα, οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες τεχνικές ενσωματώθηκαν ήδη και εξετάστηκαν. Το πότε θα πραγματοποιηθούν είναι κυρίως ένα θέμα του κόστους. Τα κύτταρα καυσίμου βρίσκονται σε πολύ έντονη ανάπτυξη για τις κινητές εφαρμογές που είναι πιο απαιτητικές από τις στάσιμες. Εάν τα κύτταρα καυσίμου είναι διαθέσιμα πιο εύκολα, η τοπική αποθήκευση του υδρογόνου θα καταστήσει τα διανεμημένα συστήματα πιο ανεξάρτητα. Από τη σημερινή άποψη, η πλήρης αυτονομία δεν είναι μια πολύ πιθανή επιλογή. Αλλά αφού το πλέγμα είναι ήδη στη θέση του, γιατί να μην χρησιμοποιήσει τα πλεονεκτήματά του. Εάν μια κατοικία με τοπική παραγωγή είναι συνδεδεμένη στο πλέγμα, μπορεί να παραδώσει τα πλεονάσματα στο πλέγμα και η τοπική αποθήκευση δεν είναι απαραίτητο να καλύψει τις ακραίες καταστάσεις. Η ενέργεια που αποθηκεύεται τοπικά μπορεί

να τροφοδοτήσει το πλέγμα σε περίοδο μέγιστης δύναμης και να αποδώσει μια υψηλότερη τιμή. Μια τέτοια κατοικία θα είχε μια χαμηλή ζήτηση θέρμανσης που θα καλυπτόταν από μια συνδυασμένη θερμότητα και οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, οι οποίες θα μπορούσαν, εκτός από την κάλυψη της τοπικής απαίτησης, να διοχετεύσουν την ενέργεια στο πλέγμα όταν η ζήτηση είναι υψηλή.

Ένα περαιτέρω σενάριο που αναπτύχθηκε πριν από καιρό αναγνωρίζει το γεγονός ότι καθώς η ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτήρια βελτιώνεται το κέντρο της απαίτησης μεταβάλλεται σε κινητικότητα. Η μηχανή ενός αυτοκινήτου είναι, σε τελευταία ανάλυση, μια συνδυασμένη εγκατάσταση δύναμης και θερμότητας.

7.4 PV σε ένα συγκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα

Το PV θα μπορούσε σε ένα πολύ μακροπρόθεσμο σενάριο να διαδραματίσει επίσης έναν ρόλο σε ένα συγκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα. Οι μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας PV σε μέγεθος multi-megawatt, μπορούν να προβλεφθούν για να παραγάγουν την ηλεκτρική ενέργεια στις πάντα ηλιόλουστες περιοχές ερήμων ή ακόμα και στο διάστημα. Τέτοια σενάρια απαιτούν πολύ χαμηλό αλλά ακόμα πιθανό κόστος για τις ενότητες και τα συστήματα. Είναι αρκετά σαφές ότι αυτά τα οράματα μπορούν να γίνουν πραγματικότητα μόνο στο απώτερο μέλλον, ίσως γύρω στα μέσα αυτού του αιώνα. Τα σημαντικότερα από αυτά τα σχέδια θα περιγραφούν τώρα.

7.4.1 Ηλεκτρική ενέργεια από την έρημο

Οι έρημοι είναι περιοχές άφθονης ηλιοφάνειας αλλά ελάχιστης καλής χρήσης. Φανταζόμαστε ότι μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις ηλιακής ενέργειας σε τέτοιες περιοχές όπου είναι αποδοτικότερες από, ότι στις περιοχές όπου καταναλώνεται η περισσότερη ενέργεια. Η μεγάλη πρόκληση είναι να μεταφερθεί η ενέργεια μέσω μεγάλων αποστάσεων στους καταναλωτές. Δύο κύριες τεχνικές μπορούν να προσδιοριστούν σήμερα: ηλεκτροφόρα καλώδια υψηλής έντασης και μετατροπή στο υδρογόνο.

Η μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτροφόρων καλωδίων πέρα σε μεγάλες αποστάσεις είναι τεχνικά δυνατή σήμερα. Η μετάδοση υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος λειτουργεί με χαμηλές απώλειες και ήταν λειτουργική για πολλά έτη. Τέτοιες γραμμές θα μπορούσαν να δημιουργηθούν για παράδειγμα, μεταξύ της βόρειας Αφρικής και της Ευρώπης ή από την έρημο Gobi μέχρι την Ιαπωνία. Περαιτέρω, η επίτευξη της ιδέας πρόκειται να καθιερώσει ένα παγκόσμιο πλέγμα ηλεκτρικής ενέργειας. Κατόπιν το πρόβλημα αποθήκευσης θα μπορούσε να λυθεί πολύ κομψά, επειδή ο ήλιος φωτίζει πάντα στο μισό του κόσμου. Και οι εποχιακές διαφορές μπορούν επίσης να υπερνικηθούν από την ενεργειακή ανταλλαγή μεταξύ του βόρειου και του νότιου ημισφαιρίου. Τέτοια πλέγματα θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αιολική ενέργεια, δεδομένου ότι πολλές περιοχές με τους πολύ καλούς πόρους αέρα βρίσκονται σε μακρινά μέρη του κόσμου. Το κόστος της μετάδοσης έχει υπολογιστεί πρόσφατα για τη μεταφορά από τη Βόρεια Αφρική στην κεντρική Ευρώπη. Μια γραμμή μετάδοσης 5,000km έχει την απώλεια 18% στα 600 kV και 14% απώλεια στα 800 kV. Το κόστος των απωλειών υπολογίζεται στα 0.5 cts ανά kWh και το κόστος της μετάδοσης σε 0.5 έως 1.0 cts ανά kWh. Ο Kurokawa έχει αναπτύξει το σχέδιο των πλεγμάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμια εμβέλεια και πρόσφατα έχει υποκινήσει μια πολύ λεπτομερή μελέτη για τη μεγάλης κλίμακας παραγωγή στην έρημο Gobi με μεταφορά στην Ιαπωνία. Το κόστος παραγωγής, υπολογίζοντας την παρούσα τεχνολογία, ήταν για την Αμερική 17.7 cts/kWh για τις πολυκρυσταλλικές ενότητες και 18.8 cts/kWh για το άμορφο πυρίτιο. Το κόστος του άμορφου πυριτίου ήταν υψηλότερο λόγω της χαμηλότερης αποδοτικότητάς του.

Η δεύτερη επιλογή για την ενεργειακή μεταφορά είναι το υδρογόνο. Το νερό είναι χωρισμένο στο υδρογόνο και στο οξυγόνο από την ηλεκτρόλυση και το υδρογόνο μπορεί έπειτα να χρησιμοποιηθεί ως ενεργειακός μεταφορέας. Η μεταφορά του υδρογόνου μπορεί να ολοκληρωθεί σε τρία διαφορετικά στάδια :

- Το υδρογόνο υγροποιείται κοντά σε ένα λιμάνι και έπειτα μεταφέρεται μακριά με τα βυτιοφόρα.

- Το υδρογόνο διατηρείται σε σταθερή ατμοσφαιρική πίεση και διοχετευμένο με σωλήνες στους καταναλωτές διαμέσου σωληνώσεων.

- Το τρίτο στάδιο είναι ελάχιστα εξερευνημένο και η πραγματοποίησή του είναι αβέβαιη: Το υδρογόνο δημιουργεί χημική αντίδραση, ώστε να σχηματίσει έναν υγρό ενεργειακό μεταφορέα που μπορεί να μεταφέρεται, όπως περιγράφεται ανωτέρω, για το υγρό υδρογόνο, αλλά δεν απαιτεί την ψύξη.

Στο τέλος της αλυσίδας μεταφοράς, η ένωση αποσυντίθεται και το υδρογόνο χρησιμοποιείται για ενεργητικούς λόγους. Επίσης μπορεί να μεταφερθεί πίσω στην περιοχή της ηλεκτρόλυσης και να επαναχρησιμοποιηθεί. Διάφορες χημικές αντιδράσεις για την διαδικασία που περιγράφεται έχουν προσδιοριστεί, αλλά καμία μεγάλης κλίμακας επίδειξη δεν έχει αναληφθεί μέχρι τώρα. Εάν αναπτυσσόταν στο μέλλον μια οικονομία υδρογόνου, το PV θα μπορούσε να ταιριάζει πολύ καλά σε αυτό το σενάριο. Ένα πρόβλημα είναι η ενεργειακή εισαγωγή για την ηλεκτρόλυση, την ψύξη, και τη μεταφορά του υδρογόνου, που καθιστά αυτήν την διάβαση λιγότερο αποδοτική από την άμεση μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως περιγράφεται ανωτέρω. Εντούτοις, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα μέσο αποθήκευσης για την ενέργεια και είναι επίσης κατάλληλο για τις κινητές εφαρμογές. Οι ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις θα μπορούσαν να έχουν ένα πλεονέκτημα στις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας στην έρημο. Ποια τεχνολογία κερδίζει τελικά εξαρτάται από το ποιά επιτυγχάνει τους στόχους δαπανών για αυτήν την εφαρμογή πρώτιστα.

7.4.2 Ηλεκτρική ενέργεια από το διάστημα

Η Solar Power Satellite εισήχθη αρχικά από το Δρ Peter Glaser του αρθούρου D. Little, το 1968. Σύμφωνα με αυτήν την πρόταση, οι ειδικοί δορυφόροι με πολύ μεγάλες περιοχές φωτοβολταϊκών ενοτήτων θα τοποθετούνταν σε μια γεωστατική τροχιά. Κάθε δορυφόρος θα είχε μια περιοχή γύρω στα 50km². Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται θα διαβιβαζόταν στην επιφάνεια της γης από τα συστήματα κεραιών

χρησιμοποιώντας μικροκύματα ή ακτίνες λέιζερ. Αυτή η ιδέα έχει παραμείνει μια ουτοπία, αν και λαμβάνεται υπόψη περιοδικά. Πράγματι, έχει ελκυστικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα: Το φως του ήλιου είναι διαθέσιμο σε αυτήν την τροχιά σχεδόν συνεχώς και διακόπτεται μόνο από τα σύννεφα ή την ατμόσφαιρα. Εκτιμάται ότι ένα ηλιακό κύτταρο στο διάστημα θα παρήγε σχεδόν οκτώ φορές περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια απ'ό, τι στη γη. Εξίσου μεγάλα είναι και τα εμπόδια: Το κόστος ανάληψης μεγάλου αριθμού ενοτήτων στο διάστημα εμφανίζεται απαγορευτικό. Επίσης, η ισχυρή ακτινοβολία του μικροκύματος προκαλεί περιβαλλοντικές ανησυχίες. Ένα νεώτερο σχέδιο προτείνει κατασκευασμένα ηλιακά κύτταρα στο φεγγάρι ή σε έναν αστεροειδή προκειμένου να αποφευχθεί η βαρύτητα της γης. Προφανώς, ένας δορυφόρος ηλιακής δύναμης είναι τεχνικά δυνατός, αλλά δεν είναι εφικτός στο εγγύς μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

8 Δημοφιλή επιχειρήματα ενάντια στο PV και γιατί δεν είναι ισχυρά

Σε αυτό το τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζουμε το περιεχόμενο αυτής της έρευνας με την απαρίθμηση των δημοφιλών επιχειρημάτων ενάντια στο PV και παρουσιάζουμε γιατί κάνουν λάθος. Εάν ένας δίνει δημοφιλή οι συζητήσεις για το PV ένα έρχονται αντιμέτωπες αμετάβλητα με αυτά τα επιχειρήματα που είναι εν μέρει ακριβώς προδιαθέτει αλλά εν μέρει επίσης σοβαρές αντιρρήσεις που πρέπει να συζητηθούν. Από το τέλος του 2002 στην αρχή του 2003 το φωτόνιο δημοσίευσε το πρώτο σε σειρά άρθρων σχετικά με ακριβώς αυτό το θέμα. Αυτό το κεφάλαιο παίρνει αυτήν την προσέγγιση που αναφέρεται στα σχετικά προηγούμενα κεφάλαια για περισσότερη λεπτομέρεια.

8.1 Οι ηλιακές ενότητες καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια για την παραγωγή τους απ' ό τι παράγουν

Αυτό το επιχείρημα ακούγεται πολύ συχνά και είναι εξίσου ανακριβές όσο και διαδεδομένο. Αναλύεται λεπτομερώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Εκεί, δείχνουμε ότι ο ενεργειακός χρόνος επιστροφής ποικίλει από 7.3 έτη για το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο σε 1.5 έτη για τις λεπτές ενότητες Αυτοί οι αριθμοί είναι από το 1998. Νεώτερες μελέτες για τα πλήρη συστήματα παρουσιάζουν χρόνους ενεργειακής επιστροφής από 7 έως 2.8 έτη. Αυτό δείχνει ότι οι τεχνολογίες ενότητας και συστημάτων δεν είναι στατικές, αλλά βελτιώνονται συνεχώς. Οι ανωτέρω χρόνοι επιστροφής πρέπει να μελετηθούν υπό την σκέψη ότι όλες οι κρυστάλλινες ενότητες πυριτίου έχουν εγγύηση διάρκειας ζωής είκοσι πέντε ετών και οι λεπτές τεχνολογίες δέκα ετών. Η πραγματική διάρκεια ζωής μπορεί να αναμένεται για να είναι αρκετά υψηλότερη. Ο χρόνος επιστροφής αναμένεται να συρρικνωθεί με το μειωμένο κόστος ενότητας και συστημάτων, επειδή οι βελτιώσεις των κατασκευαστών περιλαμβάνουν συνήθως τη λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Αφ' ετέρου, η ενέργεια είναι μόνο μια δευτερεύουσα συμβολή στο κόστος των ενοτήτων και δεν είναι έτσι

τόσο σημαντική όπως, για παράδειγμα, η εργασία. Επίσης, εάν πραγματοποιείται ανακύκλωση των ενοτήτων, η επιστροφή μειώνεται περαιτέρω. Αυτοί οι αριθμοί ισχύουν για την κεντρική Ευρώπη. Στα πιο ηλιόλουστα κλίματα, αυτοί οι χρόνοι είναι, φυσικά, αρκετά λιγότεροι.

Συγκρίνοντας τα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας με τις συμβατικές εγκαταστάσεις πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι τα εργοστάσια που καίνε ορυκτές ύλες και ούτε οι πυρηνικές εγκαταστάσεις δεν έχουν έναν χρόνο επιστροφής, επειδή χρειάζονται συνεχώς την εισαγωγή της αρχικής ενέργειας. Αυτοί μόνο μετατρέπουν την αρχική ενέργεια στην ηλεκτρική ενέργεια.

8.2 Το PV παράγει περισσότερα αέρια θερμοκηπίου απ'ότι να τα αποτρέπει

Ένας παρόμοιος υπολογισμός όπως για την ενέργεια μπορεί να πραγματοποιηθεί για τα επιβλαβή αέρια: Πόσο καιρό παίρνει για να ανακτηθούν τα αέρια που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής των ενοτήτων και άλλων συστατικών ενός συστήματος PV; οι αριθμοί ποικίλλουν πολύ από τη μια έρευνα στην άλλη. Μερικοί ερευνητές κατέληξαν σε πολύ υψηλές τιμές για την εκπομπή βλαβερών αερίων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των συστημάτων PV. Φάνηκε ότι περιέλαβαν τις συνοδευτικές εγκαταστάσεις ορυκτών υλών (δείτε επίσης τη κεφ. 8.3) της ίδιας δύναμης με το PV σε ισορροπία και πήραν δυσμενή ενεργειακά μίγματα για την παραγωγή του πυριτίου. Το μεγαλύτερο μέρος του ακατέργαστου πυριτίου, εντούτοις, παράγεται με την καθαρή υδρενέργεια σε χώρες όπως η Νορβηγία. Σε ένα ρεαλιστικότερο σενάριο που υπολογίζεται από τον Photon, η αποκατάσταση επιβλαβών αερίων ποικίλλουν μεταξύ 2.4 και 3.6 ετών για το ενεργειακό μίγμα της κεντρικής Ευρώπης.

8.3 Το συνδεδεμένο PV απαιτεί τα μέρη από τις συνοδευτικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ορυκτών υλών

Ένα πολύ αποτελεσματικό επιχείρημα είναι: Τα ηλιακά κύτταρα παράγουν την ενέργεια μόνο όταν ο ήλιος λάμπει. Κατά τη διάρκεια της νύχτας και στις νεφελώδεις περιόδους απαιτείται συνοδευτική δύναμη. Επομένως, το PV δεν

αντικαθιστά τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, μόνο την αρχική ενέργεια. Στην πραγματικότητα, τα ακόλουθα σημεία αλλάζουν την κατάσταση:

- Η απαίτηση κυμαίνεται έντονα και, επομένως, η ικανότητα επιφύλαξης απαιτείται οπωσδήποτε. Οι μελέτες έχουν δείξει ότι μια συμβολή 10%-20% του PV σε σχέση με τη συνολική ικανότητα μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα από το πλέγμα. Σήμερα, είμαστε μακριά από αυτήν την αξία.
- Η ενεργειακή παραγωγή PV συμπίπτει κατά ένα μεγάλο μέρος με τη μέγιστη ζήτηση.
- Σε ένα μεγαλύτερο πλέγμα, οι τοπικές διακυμάνσεις υγραίνονται.
- Το PV δεν είναι η μόνη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας σε ένα μελλοντικό πλέγμα. Άλλες πηγές όπως ο αέρας έχουν έναν διαφορετικό και εν μέρει αντίθετο από τη χρονική εξάρτηση του PV.
- Η αποθήκευση, τοπική ή κεντρική, θα διατεθεί στο μέλλον. Αυτή τη στιγμή, μόνο η υδροαποθήκευση άντλησης μπορεί να δεχτεί τα πλεονάσματα.
- Ο έλεγχος απαίτησης θα είναι πιο διαδεδομένος στο μέλλον. Η απαίτηση μπορεί κατόπιν να προσαρμόζεται στη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας. Πολλά περισσότερα σχέδια μπορούν να υποτεθούν για το μέλλον. Ένα παράδειγμα προσαρμόζει την παραγωγή των πλούσιων σε ενέργεια προϊόντων στη διαθεσιμότητα της ενέργειας και της αποθήκευσης ενός προϊόντος όπως το αργίλιο.

8.4 Το PV είναι πάρα πολύ ακριβό

Η ηλεκτρική ενέργεια PV είναι πράγματι ακριβή, αλλά αυτό είναι μόνο μια παροδική κατάσταση. Κατά γενική ομολογία, το PV είναι η ακριβότερη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Τα συνδεδεμένα συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για περίπου 50 € ανά cts/kWh στην κεντρική Ευρώπη σήμερα, αλλά οι τιμές μειώνονται. Σε περισσότερο ευνοϊκές θέσεις, το κόστος είναι μόνο κατά το ήμισυ τόσο υψηλό. Η καμπύλη μάθησης (σχέδιο 7.7) είναι καθιερωμένη και θα συνεχιστεί ανάλογα με την ανάπτυξη της αγοράς στους επόμενους αιώνες. Θα πάρει ακόμα δεκαετίες συνεχούς υποστήριξης για τα

συνδεδεμένα συστήματα πριν από την πτώση των τιμών σε ένα ανταγωνιστικό επίπεδο. Γιατί θα έπρεπε να υποστούμε όλες αυτές τις δαπάνες; Το PV είναι η μόνη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί παντού στον κόσμο. Έχει σχεδόν απεριόριστη δυνατότητα, είναι μακρόβιο, αξιόπιστο, και δεν βλάπτει το περιβάλλον. Εάν εγκαθίσταται στα κτήρια, δεν καταναλώνει ιδιαίτερο χώρο. Μακροπρόθεσμα, θα είναι ένα αναπόφευκτο μέρος του ενεργειακού συστήματος σχεδόν κάθε χώρας. Από το σχέδιο 8.1, που παρουσιάζει ένα πιθανό σενάριο της ανόδου των τιμών, βλέπουμε ότι το PV θα γίνει αρχικά ανταγωνιστικό με τη μέγιστη δύναμη, αλλά οι τιμές θα συνεχίσουν να μειώνονται πέρα από αυτό το σημείο.

8.5 Το PV δεν είναι έτοιμο για μάρκετινγκ, περισσότερη έρευνα απαιτείται

Η ιστορία της αγοράς PV και της ανάπτυξης της τεχνολογίας είναι ένα καλό παράδειγμα για το πώς η βελτίωση ενός προϊόντος υποκινείται από την αλληλεπίδραση με τις αγορές. Στην αρχή, μόνο τα καταναλωτικά προϊόντα εξοπλίστηκαν με τα ηλιακά κύτταρα. Μεταγενέστερα, οι αυτόνομες και μακρινές εφαρμογές έγιναν ελκυστικές. Αυτές οι αγορές είναι σήμερα πλήρως οικονομικές. Ο πραγματικός στόχος είναι, εντούτοις, να χρησιμοποιηθεί η μεγάλη δυνατότητα του PV για την παγκόσμια παροχή ηλεκτρισμού, η οποία απαιτεί πολύ χαμηλές τιμές. Αυτές οι τιμές είναι τεχνικά εφικτές εάν οι αγορές αυξάνονται γρηγορότερα από ότι η κανονική ανάπτυξη θα επέτρεπε. Η προηγούμενη εμπειρία έχει δείξει ότι μια νέα πηγή ενέργειας δεν μπορεί να ανταγωνιστεί αρχικά τις καθιερωμένες πηγές ενέργειας. Η πυρηνική ενέργεια ακόμη και σήμερα λαμβάνει τις επιχορηγήσεις. Δεν πρέπει να παραμεληθεί ότι ακόμη και η ενέργεια από ορυκτές ύλες επιχορηγείται σε πολλές χώρες. Οι κριτικές λένε ότι αφού το κόστος του PV είναι τόσο υψηλό αυτή τη στιγμή δεν πρέπει να το ωθήσουμε στην αγορά αλλά μάλλον ξοδεύουμε περισσότερων για την έρευνα. Αλλά αυτό δεν θα λειτουργούσε. Αν και περισσότερη έρευνα απαιτείται, η μείωση του κόστους μπορεί μόνο να υλοποιηθεί εάν υπάρχει ανατροφοδότηση από τις αγορές. Αυτό καταδεικνύεται από την παρούσα ταχεία ανάπτυξη των επιδοτούμενων αγορών για τα συνδεδεμένα συστήματα,

η οποία έχει οδηγήσει ακριβώς στις μειώσεις τιμών που προβλέπονται από τη καμπύλη μάθησης.

8.6 Η εγκατάσταση του PV στο βόρειο μισό της Ευρώπης δεν έχει νόημα επειδή τα ίδια ηλιακά κύτταρα παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια πολύ φτηνότερη στο νότο

Είναι βεβαίως αλήθεια ότι μια ενότητα PV μπορεί να παραγάγει σχεδόν διπλάσια ενέργεια σε ένα ηλιόλουστο κλίμα απ'ότι στην κεντρική ή βόρεια Ευρώπη ή σε παρόμοια κλίματα στην Αμερική ή την Ασία. Εντούτοις, είναι ελκυστικό να εγκατασταθούν τα συνδεδεμένα συστήματα σε αυτές τις θέσεις επειδή :

- Η ενέργεια που φθάνει στις εγκαταστάσεις του πελάτη είναι ακριβότερη απ'ότι στις κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Το κόστος στον πελάτη περιλαμβάνει μετάδοση και μέτρηση, απώλειες μετάδοσης, διαχείριση, και φόρους. Κατά συνέπεια, αυτό το κόστος είναι πέντε έως έξι φορές υψηλότερο από το παραγωγικό κόστος.
- Η ηλιακή ενέργεια που παράγεται στο νότο και που μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις αναλαμβάνει το μεγαλύτερο κόστος μετάδοσης και τις απώλειες μετάδοσης. Το κόστος του πρέπει να είναι ανταγωνιστικό με το κόστος στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.
- Οι χώρες της ηλιακής ζώνης στην Αφρική και την Ασία τείνουν να είναι πολιτικά ασταθείς. Ο κίνδυνος ενεργειακής παραγωγής σε αυτές τις χώρες μειώνεται εάν υπάρχει επίσης παραγωγή στην Ευρώπη.

8.7 Το PV περιλαμβάνει τοξικά υλικά

Αυτή η θέση έχει αντιμετωπιστεί στο κεφ. 6.1. Υπάρχει γενική συμφωνία ότι οι ενότητες PV δεν έχουν οποιαδήποτε αρνητικά αποτελέσματα κατά τη λειτουργία. Παραμένει το θέμα της κατασκευής. Το κρυστάλλινο πυρίτιο περιλαμβάνει διαφορετικές χημικές ουσίες και διαφορετικές διεργασίες κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της τεχνολογίας, όπως περιγράφεται στο κεφ. 3.1. Μερικές από αυτές τις χημικές ουσίες είναι τοξικές ή εύφλεκτες, αλλά η τεχνολογία ελέγχεται ικανοποιητικά βασισμένη στις δεκαετίες εμπειρίας της

βιομηχανία των τσιπ. Οι ενότητες οι ίδιες περιέχουν κυρίως το πυρίτιο και το γαλί με τα ίχνη μολύβδου που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση. Οι άμορφες ενότητες πυριτίου είναι εξίσου αβλαβείς. Μερικά λεπτά κύτταρα όπως το CdTe περιλαμβάνουν πράγματι τοξικά στοιχεία. Η κατασκευή τους έχει αποδειχθεί ότι είναι χωρίς προβλήματα, αλλά ερωτήσεις μπορούν να τεθούν για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εάν εκείνες οι ενότητες είναι χαλασμένες ή κατεστραμμένες από την φωτιά. Οι μελέτες έχουν παρουσιάσει ότι το ποσό του Cd σε εκείνες τις ενότητες είναι τόσο μικρό που καμία σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης Cd δεν καταλήγει στο περιβάλλον, ακόμη και σε ένα τέτοιο απίθανο γεγονός. Η μελλοντική ανακύκλωση των ενότητων θα μειώσει περαιτέρω τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, όπως περιγράφεται στο κεφ. 6.5.

8.8 Το PV καταλαμβάνει πολύτιμη περιοχή γης

Προς το παρόν, οι μεγάλες εγκαταστάσεις PV στη σειρά των μεγαβάτ εγκαθίστανται, ειδικά στη Γερμανία. Ο λόγος είναι το υψηλό δασμολόγιο τροφοδότησης προοριζόμενο για την εγκατάσταση στη στέγη, η οποία καθιστά τις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις κερδοφόρες λόγω του χαμηλότερου κόστους τους. Ο νέος νόμος τροφοδότησης αναγνωρίζει αυτό, από ένα σημαντικά χαμηλότερο δασμολόγιο για τέτοιες εγκαταστάσεις. Εντούτοις, δεν προορίζεται να αποβληθεί αυτή η αγορά πλήρως, επειδή η βιομηχανία αισθάνεται ότι χρειάζεται αυτά τα προγράμματα για να στηριχτεί η αύξηση της αγοράς. Αν και τα μεγάλα προγράμματα χρησιμοποιούν το έδαφος που δεν χρησιμοποιείται, όπως ένας παλαιότερος σκουπιδοτοπος ή, σε μια περίπτωση, ένα προηγούμενο στρατόπεδο, η αντίσταση σε τέτοια συστήματα αυξάνεται. Πρέπει να τονιστεί ότι για το εγγύς μέλλον το PV δεν χρειάζεται αυτά τα διαστήματα, επειδή υπάρχει ακόμα ένας τεράστιος χώρος αχρησιμοποίητης στέγης, της πρόσοψης, και μόνωσης.

Εάν οι αγροτικές περιοχές πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη για την εγκατάσταση του PV, είναι επίσης πιθανό να συνεχίσει τη χρήση του και καλλιέργεια, όπως δείξαμε νωρίτερα σε προηγούμενα κεφάλαια. Στις περιοχές με έρημο είναι ακόμη πιο πιθανό να παρέχουμε σκίαση από τις ενότητες που

την ίδια στιγμή παράγει ηλεκτρική ενέργεια για άρδευση και για αφαλάτωση του νερού.

8.9 Το PV ανταγωνίζεται για τα διάστημα στη στέγη με τους θερμικούς συλλέκτες

Ασυζητητί, οι ενότητες PV και οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες χρησιμοποιούν το ίδιο νοτιότερο διάστημα της στέγης, αλλά εν τούτοις κανένας ανταγωνισμός δεν αναμένεται. Καταρχήν, υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χώρος σε στέγες για να προσαρμοστούν και οι δύο. Μερικές επιπλέον εκτιμήσεις μετριάζουν περαιτέρω αυτόν τον ανταγωνισμό.

- Οι θερμικοί συλλέκτες χρειάζονται περιορισμένο διάστημα στέγης επειδή έχουν μια πολύ υψηλή αποδοτικότητα (~ 50%). Εάν χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση νερού, μια αποδεκτή αναλογία είναι 1m² ανά άτομο. Οι κανονικές στέγες είναι πολύ μεγαλύτερες, και το υπόλοιπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το PV. Η κατάσταση είναι διαφορετική εάν οι συλλέκτες χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση του χώρου. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτούνται μεγάλοι συλλέκτες, αλλά την καλοκαιρινή περίοδο αυτοί οι συλλέκτες είναι σε στάση μη απασχόλησης, σε αντίθεση με το PV, το οποίο παράγει πάντα τη χρήσιμη ενέργεια.

- Οι θερμικοί συλλέκτες, σε αντίθεση με το PV, δεν είναι ευαίσθητοι στη μερική σκίαση, έτσι μπορούν να τοποθετηθούν στις θέσεις που δεν είναι κατάλληλες για τις ενότητες, και κατά αυτόν τον τρόπο, το διαθέσιμο διάστημα στεγών μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικότερα.

Στα εργαστήρια σήμερα, είναι επίσης σε εξέλιξη εργασία ώστε να αναπτυχθούν υβριδικοί συλλέκτες που παράγουν και την ηλεκτρική ενέργεια και τη θερμότητα. Σε αυτούς τους συλλέκτες, οι ηλιακές ενότητες χρησιμεύουν ταυτόχρονα ως απορροφητές. Τα κρυστάλλινα κύτταρα πυριτίου δεν είναι ιδιαίτερα πρακτικά για αυτόν το λόγο επειδή με την αυξανόμενη θερμοκρασία τους η αποδοτικότητα μειώνεται, αλλά εάν οι ημιαγωγοί διατεθούν μεγάλο ενεργειακό χάσμα, αυτό το πρόβλημα θα λυθεί. Οι υβριδικοί συλλέκτες θα μπορούσαν να γίνουν ο πιο κομψός τρόπος να λυθεί το πρόβλημα του

διαστήματος των στεγών, το οποίο εν πάση περιπτώσει δεν είναι μεγάλης ανησυχίας σήμερα.

8.10 Ένα δασμολόγιο τροφοδότησης προκαλεί απaráδεκτα υψηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας

Αποδείχθηκε ότι τα δασμολόγια τροφοδότησης είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να υποστηριχθεί η γρήγορη ανάπτυξη της αγοράς PV. Σε μια τέτοια ρύθμιση, το προστιθέμενο κόστος συμπεριλαμβάνεται στο ενεργειακό κόστος του πελάτη. Κατά αυτόν τον τρόπο, καταλήγουμε σε δύο πλεονεκτήματα :

-Καμία κυβερνητική επιδότηση δεν απαιτείται, έτσι οι πολιτικές αβεβαιότητες για τη συνεχή υποστήριξη μπορούν να αποφευχθούν. Αφετέρου, το κόστος διατίθεται στην πηγή του προβλήματος, δηλαδή, την κατανάλωση ενέργειας. Δεδομένου ότι οι χρησιμότητες επιθυμούν να δικαιολογήσουν τις αυξήσεις τιμών με το βαρύ φορτίο λόγω των ανανεώσιμων ενεργειών.