

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ – ΑΡΙΘΜΟΣ 1359

**«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ»**

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή: Γκεζερλής Ιωάννης

Εισηγητής: Σταθάτος Ηλίας

Πάτρα, 11/12/2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε με στόχο να δώσει αρχικά την εικόνα της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων (και κατ' επέκταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων) και στη συνέχεια να παραθέσει συγκεντρωμένες και ιεραρχημένες, όλες τις τεχνολογίες, όλους τους τύπους κατασκευής τους που υπάρχουν κι εφαρμόζονται σήμερα. Έχοντας ως θέμα τις «Τεχνολογίες Κατασκευής Φωτοβολταϊκών Στοιχείων», πραγματοποιήθηκε εκτενής μελέτη όλων των τεχνολογιών κατασκευής, καθώς και αναλυτική παρουσίασή τους.

Η έρευνα βασίστηκε κι επικεντρώθηκε σε βιβλιογραφική αναζήτηση, η οποία παρατίθεται στο τέλος. Η βιβλιογραφική αναζήτηση ήταν απαραίτητη όχι μόνο γιατί απετέλεσε τον βασικό άξονα για την ορθή απόδοση και ανάλυση των όρων, των φαινομένων και των τεχνολογιών, αλλά και γιατί οδήγησε και στην παράθεση πινάκων που με τη σειρά τους συνεισέφεραν στην συγκεντρωτική παράθεση-παρουσίαση των διαφορετικών τεχνολογιών κατασκευής αλλά και την παράθεση-σύγκριση μέσω πινάκων διαφόρων σημείων που παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τεχνολογιών που ανήκουν όμως στην ίδια ανώτερη ή κύρια κατηγορία τεχνολογιών κατασκευής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και ανάλυση των τεχνολογιών κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Συγκεκριμένα, η μελέτη αυτή έχει ιεραρχηθεί και κατηγοριοποιηθεί σε πέντε κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή σε βασικές έννοιες των φωτοβολταϊκών, με την παράθεση των βασικών ορισμών των φωτοβολταϊκών στοιχείων – πλαισίων - πάνελ – συστημάτων, των πλεονεκτημάτων – μειονεκτημάτων τους και τη λύση σε ενεργειακές που προσφέρουν, καθώς και τον σχεδιασμό που γίνεται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, ξεκινώντας από την ιστορία των φωτοβολταϊκών στοιχείων και προχωρώντας στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το φωτορεύμα, το μοντέλο και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων, το πυρίτιο και τις ιδιότητές του που το ανάδειξαν ως ιδανικό για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ενώ τέλος γίνεται μία σύντομη αναφορά στις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων που θα παρατεθούν και αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Οι δύο βασικές κατηγορίες τεχνολογιών είναι τα πλαίσια «Μεγάλου Πάχους» (Thick Films) και τα πλαίσια «Μικρού Πάχους» (Thin Films). Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας παραθέτονται και αναλύονται οι τύποι της πρώτης βασικής κατηγορίας, οι οποίοι είναι τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου και αυτά του τύπου ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon).

Στο τέταρτο κεφάλαιο παραθέτονται και αναλύονται οι τύποι φωτοβολταϊκών της δεύτερης κατηγορίας (Thin Films), την οποία αποτελούν τα φωτοβολταϊκά τύπου φιλμ άμορφου πυριτίου (Thin Film Silicon), δισεληνιούχου Ινδίου-Χαλκού (CuInSe_2 ή CIS, με προσθήκη CIGS), Τελουριούχου Καδμίου (CdTe), Αρσενιούχου Γαλλίου (GaAs), τα οργανικά και τέλος τα νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά.

Τέλος, στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, καταγράφονται τα συμπεράσματα από τη μελέτη των παραπάνω τεχνολογιών, ενώ επίσης παρατίθενται και συγκεντρωτικοί – συγκριτικοί πίνακες που μας βοηθούν ως προς την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας αλλά και ως προς τη σύγκριση μεταξύ φωτοβολταϊκών πλαισίων της ίδιας τεχνολογίας σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the study and analysis of photovoltaic manufacturing technologies. Specifically, this study has prioritized and categorized into five chapters.

The first chapter is an introduction to basic concepts of PV, indicating the basic definitions of the modules – frameworks - panels - systems, the advantages - disadvantages and energy solution PV are offering, as the planning done for photovoltaics' installation.

The second chapter analyzes the photovoltaic technology, starting from the history of photovoltaic modules and moving towards the photovoltaic effect, the photocurrent, the model and the electrical characteristics of the photovoltaic cells, silicon and its properties that follows as ideal for solar cells, and finally there is a brief reference to photovoltaic items' technologies that will be listed and analyzed in the following chapters.

The two main categories of technologies are under “Thick Films” and " Thin Films”. In the third chapter, there will be presented an analysis of the types of the first base class, who are photovoltaic monocrystalline silicon, polycrystalline silicon and those of strip-type silicon (Ribbon Silicon).

In the fourth chapter, an analysis of the types of photovoltaics in the second category (Thin Films) is listed. Thin Films PV are composed of photovoltaic film-type amorphous silicon (Thin Film Silicon), selenium Indium - Copper (CuInSe₂ or CIS, adding CIGS), cadmium telluride (CdTe) , GaAs, organic and finally nanocrystalline photovoltaics.

Finally, in the fifth and final chapter, the conclusions from the study of these technologies are listed, while also are listed aggregated - comparative tables that help us not only in the choice of appropriate technology, but also in the comparison between modules of the same technology into concrete characteristics .

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας παρουσιάζουν σήμερα τεράστιο ρυθμό αύξησης, γεγονός που οφείλεται στην μεγάλη πληθυσμιακή αύξηση, στην βελτίωση του βιοτικού επιπέδου σε όλο και μεγαλύτερο τμήμα του πλανήτη και στη ολοένα αυξανόμενη σπατάλη ενέργειας στις ανεπτυγμένες χώρες. Επιπλέον, στις αναπτυσσόμενες χώρες οι επιπρόσθετες ενεργειακές ανάγκες έχουν αυξηθεί δραματικά. Γενικά, η απαίτηση για κάλυψη πρόσθετων ενεργειακών αναγκών σε πλανητικό επίπεδο ισοδυναμεί με δραματική αύξηση της κατανάλωσης των συμβατικών ενεργειακών πηγών και κατά συνέπεια αντίστοιχη αύξηση των αποβλήτων αερίων που συμβάλλουν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Σχεδόν το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθώς κι ένα σημαντικό μέρος της θερμικής ρύπανσης οφείλονται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων (άνθρακας και πετρέλαιο). Επίσης, το 50% της εκπομπής αερίων που συμβάλλουν στην ανάπτυξη του φαινομένου του θερμοκηπίου συναρτώνται με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, το 22% με τις μεταφορές και το 2% με την οικιακή ενέργεια.

Για την αντιμετώπιση του αυξημένου ενεργειακού προβλήματος και των εμφανών, πλέον, περιβαλλοντικών προβλημάτων είναι καθοριστική η σημασία της αξιοποίησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Μετά από σχεδόν δύο αιώνες καταστροφικής για το περιβάλλον κατάχρησης των φυσικών πόρων, οι κυβερνήσεις ανά τον κόσμο προσπαθούν με την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και με την εφαρμογή της λεγόμενης «Πράσινης Πολιτικής» να αντιστρέψουν σταδιακά τα αρνητικά αποτελέσματα στο περιβάλλον κι επομένως και σε εμάς τους ίδιους. Τα τελευταία χρόνια, λοιπόν, τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα μπαίνουν περισσότερο στη ζωή μας, όπως και τα Αιολικά Συστήματα.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια καθιερώνονται όλο και πιο πολύ και πλέον είναι έτοιμα για εμπορική χρήση και ανοίγονται σε όλο τον κόσμο. Αυτά που είναι διαθέσιμα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου ή πυριτίου μεγάλου πάχους ή Thick Films και στα πλαίσια πυριτίου μικρού πάχους ή Thin Films. Τα πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου είναι πιο γνωστά σ' εμάς γιατί έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια, οπότε και καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς σήμερα. Είναι ευρέως διαδεδομένα κι έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές εφαρμογές, όπως σε φωτοβολταϊκά πάρκα. Συγκριτικά όμως με τα άλλα υλικά, το κρυσταλλικό πυρίτιο χρειάζεται πολύ μεγάλο πάχος κι επεξεργασία για να απορροφήσει την ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής να είναι πολύ μεγάλο και ο ρυθμός εξέλιξης μικρός. Για το λόγο αυτό, έχουμε μπει σε μία μεταβατική περίοδο, όπου η ζήτηση των πλακιδίων πυριτίου μικρού πάχους, τα οποία χαρακτηρίζονται από μείωση του ημιαγωγίμου υλικού, αυξάνεται διαρκώς, με βασικότερο λόγο το μικρότερο κόστος κατασκευής. Το αρσενιούχο γάλλιο, το

τελοριούχο κάδμιο, ο δισεληνιούχος χαλκός αλλά και το άμορφο πυρίτιο, καθώς και νέα υλικά που θα συνδυάζουν χαμηλότερες τιμές και υψηλότερες αποδόσεις, είναι στο επίκεντρο των επιστημονικών ερευνών και αλλάζουν σταδιακά το τοπίο στην αγορά. Με πάχος δέκα φορές περίπου λεπτότερο από μία ανθρώπινη τρίχα κι εκατό φορές από τα κρυσταλλικά, αλλά και με μεγάλη χρηστικότητα λόγω ευκαμψίας και χαμηλού βάρους, μπορούν να οδηγήσουν σε μαζικότερη και φθηνότερη παραγωγή.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

1.1 Ορισμοί.....	8
1.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	9
1.3 Φ/Β συστήματα (λύση σε οικιακές-ενεργειακές ανάγκες)	10
1.4 Σχεδιασμός κτιρίων για φωτοβολταϊκά συστήματα	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

2.1 Ιστορία των Φωτοβολταϊκών στοιχείων	14
2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	14
2.3 Φωτορεύμα	15
2.4 Μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου	16
2.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων	18
2.6 Πυρίτιο και φωτοβολταϊκά	20
2.7 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων – σύντομη αναφορά	20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ «ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ» (THICK FILMS)

3.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si)	23
3.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)	28

3.2.1 Κλασσικά Ηλιακά Κύτταρα Si	28
3.2.2 Επιταξιακά Ηλιακά Κύτταρα Si	32
3.3 Φ/Β ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ «ΜΙΚΡΟΥ ΠΑΧΟΥΣ» (THIN FILMS)

4.1 Λεπτά φιλμ άμορφου πυριτίου (Thin Film Silicon)	40
4.2 Δισεληνιούχος Ινδιο-Χαλκός (CuInSe ₂ ή CIS, με προσθήκη CIGS)	43
4.3 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)	45
4.4 Αρσενιούχο Γάλλιο (GaAs)	47
4.5 Οργανικά Φ/Β	51
4.6 Νανοκρυσταλλικά Φ/Β (nc-Si)	54
4.7 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής - HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	56
-----------------------------------	----

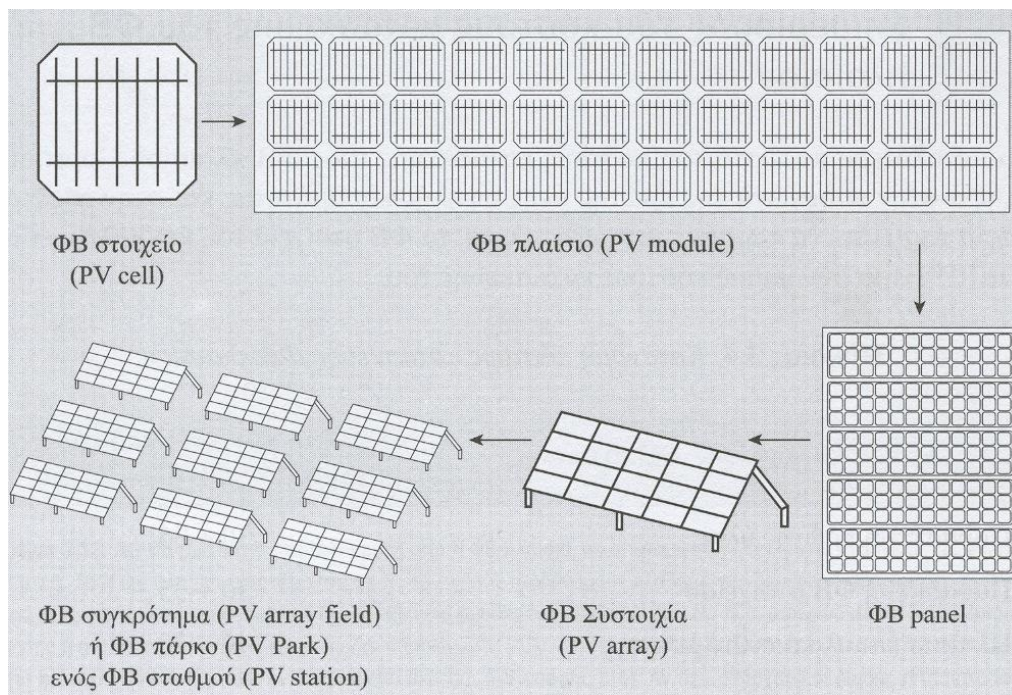
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	64
-----------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69
--------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

1.1 Ορισμοί

- Φωτοβολταϊκό στοιχείο (PV cell) : Η ηλεκτρονική διάταξη που παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν δέχεται ακτινοβολία. Λέγεται ακόμα Φ/Β κύτταρο ή Φ/Β κυψέλη.
- Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module) : Ένα σύνολο Φ/Β στοιχείων που είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα. Αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της Φ/Β γεννήτριας.
- Φωτοβολταϊκό πάνελ (PV panel) : Ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να εγκατασταθεί σε Φ/Β εγκατάσταση.
- Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array) : Μια ομάδα από Φ/Β πλαίσια ή πάνελα με ηλεκτρική σύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης.
- Φωτοβολταϊκή γεννήτρια (PV generator) : Το τμήμα μιας Φ/Β εγκατάστασης που περιέχει Φ/Β στοιχεία και παράγει συνεχές ρεύμα.
- Αντιστροφέας ή μετατροπέας (inverter): Ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο.
- Ρυθμιστής φόρτισης (charge controller): Συσκευή που χρησιμοποιείται σε αυτόνομα συστήματα για να ρυθμίζει τη φόρτιση των συσσωρευτών.



Σχ. 1.1 Σύνθεση φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων [1]

1.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την βοήθεια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποκτά ολοένα και περισσότερους υποστηρικτές στην εποχή μας.

Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πολλά, όπως[2]:

- Λειτουργούν αθόρυβα, καθαρά και χωρίς κατάλοιπα, αποφεύγοντας τη μόλυνση του περιβάλλοντος.
- Λειτουργούν χωρίς καύσιμα και δεν χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια, όπως τα θερμικά συστήματα.
- Μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς κινητά μέρη, συνεπώς απαιτούν και ελάχιστη συντήρηση.
- Έχουν μηδενικό κόστος λειτουργίας, αφού χρησιμοποιούν το φως του ήλιου για να παράγουν ηλεκτρισμό.
- Έχουν αρκετά μεγάλη διάρκεια ζωής (περίπου 25-30 χρόνια)
- Λειτουργούν και κάτω από συνθήκες συννεφιασμένης ατμόσφαιρας λόγω της διάχυτης ακτινοβολίας (ειδικά την χειμερινή περίοδο).
- Έχουν γρήγορη απόκριση σε ξαφνικές μεταβολές της ηλιοφάνειας.
- Λειτουργούν αποδοτικά και σε χαμηλές θερμοκρασίες (για την ακρίβεια πιο αποδοτικά απ' ό,τι σε υψηλές).
- Μπορούν να κατασκευαστούν από πυρίτιο, ένα από τα πιο άφθονα στοιχεία στην Γη.
- Είναι κατάλληλα για επιτόπιες εφαρμογές, όπου δεν υπάρχει ή δεν συμφέρει οικονομικά η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου.
- Έχουν σχετικά μεγάλο λόγο ισχύος/βάρους, άρα είναι κατάλληλα και για εγκατάσταση σε στέγες.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας, αφού έχουν μεγάλες δυνατότητες σε μια ευρεία περιοχή τιμών (mW – MW).
- Αν ένα κομμάτι του συστήματος υποστεί βλάβη, τότε το σύστημα συνεχίζει την λειτουργία του μέχρι την αντικατάσταση εκείνου του μέρους.
- Υπάρχει η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες μας, αλλά και συνδυασμός με άλλου είδους συστήματα Α.Π.Ε. όπως με αιολικά (υβριδικό σύστημα).
- Δυνατότητα μαζικής παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Απ' την άλλη μεριά όμως, όπως όλοι ξέρουμε τα φωτοβολταϊκά συστήματα ακόμα και στις μέρες μας δεν παίζουν τόσο καθοριστικό ρόλο στην συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί παρόλα τα θετικά που αναφέραμε παραπάνω τα Φ/Β έχουν και αρκετά μειονεκτήματα :

- Υψηλό κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 20% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν (προς το παρόν) για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων εξαιτίας του λόγου που αναφέραμε παραπάνω.
- Η παροχή και απόδοση της ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία απαιτείται για τις περισσότερες εφαρμογές λόγω της αστάθειας και της μεγάλης διακύμανσης της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι δαπανηρή.

1.3 Φ/Β συστήματα (λύση σε οικιακές-ενεργειακές ανάγκες)

Ένα κατάλληλα σχεδιασμένο φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να καλύψει ενεργειακές ανάγκες όπως φωτισμός, τηλεπικοινωνίες, ψύξη ακόμα και ηχητική κάλυψη. Τα φωτοβολταϊκά παράγουν συνεχές ρεύμα. Αυτό σημαίνει είτε ότι τα χρησιμοποιούμε για συσκευές συνεχούς ρεύματος είτε μετατρέπουμε αυτό το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο 230 V (σε ρεύμα ίδιο με της ΔΕΗ δηλαδή) με τη βοήθεια κάποιων ηλεκτρονικών συσκευών (inverter). Για λόγους απόδοσης και οικονομίας πάντως, δεν συνιστάται η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων για την τροφοδότηση θερμικών ηλεκτρικών συσκευών, όπως κουζίνες, θερμοσίφωνες, ηλεκτρικά καλοριφέρ ή θερμοσυσσωρευτές. Για τις χρήσεις αυτές υπάρχουν πολύ οικονομικότερες λύσεις που δεν στηρίζονται στον ηλεκτρισμό, όπως οι ηλιακοί θερμοσίφωνες, ο ηλιακός κλιματισμός, οι κουζίνες ή τα συστήματα θέρμανσης φυσικού αερίου, υγραερίου κλπ.

Η αντιοικονομική χρήση γίνεται εύκολα κατανοητή στο παράδειγμα της θέρμανσης του νερού. Αν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρικός θερμοσίφωνα που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, το ηλιακό φως μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό ο οποίος χρησιμοποιείται από το θερμοσίφωνα για να θερμάνει το νερό. Το συνολικό κόστος των δύο αυτών συστημάτων είναι πολύ μεγαλύτερο από έναν ηλιακό θερμοσίφωνα που μετατρέπει απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Η νομοθεσία για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε κτήρια επιβάλλει ως προϋπόθεση την ύπαρξη ηλιακού θερμοσίφωνα και η Ελληνική νοοτροπία αντιτίθεται σε τέτοιους περιορισμούς. Εκτός από την οικονομική προσέγγιση που αναφέρεται πρέπει να τονιστεί η ανάγκη απόκτησης οικολογικής συνείδησης

που δεν συμβαδίζει πάντα με το κέρδος. Μία κατοικία με εγκατεστημένο σύστημα “boiler “ για την θέρμανση του νερού και την παράλληλη θέρμανση του σπιτιού είναι γενικά μια ορθολογική λύση. Στην Ελλάδα παρόλα αυτά οι μήνες που χρειαζόμαστε θέρμανση στο σπίτι μας είναι περιορισμένοι. Άρα αυτή η κατοικία χρησιμοποιεί και πληρώνει πετρέλαιο ακόμα και το καλοκαίρι. Ακόμα και αν κάποιος υποστηρίξει ότι είναι οικονομικά συμφέρουσα επιλογή, δεν παύει να αποτελεί ένα οικολογικό έγκλημα.

Από την άλλη μεριά, ο φωτισμός με λάμπες εξοικονόμησης και η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών (υπολογιστές, ηχητικά συστήματα, ψυγεία, τηλεοράσεις, τηλεπικοινωνίες κλπ) αποτελούν ανάγκες που μπορούν να καλυφθούν εύκολα και οικονομικά με φωτοβολταϊκά.

Η μόνωση του σπιτιού είναι πολύ σημαντική επίσης, καθώς ελλιπής μόνωση αναιρεί την προσπάθεια ψύξης και θέρμανσης του, οδηγώντας σε περιττές και μεγάλες καταναλώσεις. Η εγκατάσταση ηλιακού θερμοσίφωνα για την θέρμανση του νερού σημαίνει αυτόματα εξοικονόμηση του 24% της ενέργειας που καταναλώνει ένα σπίτι και είναι εξίσου σημαντική. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών είναι το επιστέγασμα μιας ουσιαστικής προσπάθειας για την ενεργειακή εξέλιξη των κτιρίων και όχι αυτοσκοπός για το κέρδος.

1.4 Σχεδιασμός κτιρίων για φωτοβολταϊκά συστήματα

Πλέον σωστή διαδικασία αποτελεί το να έχει ενταχθεί από την αρχή στο σχεδιασμό του σπιτιού το φωτοβολταϊκό σύστημα που θα εγκατασταθεί. Μια συνολική μελέτη που να καλύπτει την εξοικονόμηση ενέργειας, όπως για παράδειγμα το θέμα της μόνωσης, των παραθύρων, της σκίασης, το θέμα της θέρμανσης και του κλιματισμού και των αναγκών σε ηλεκτρισμό (με φωτοβολταϊκά), είναι ικανή να οδηγήσει στην επίτευξη του συνδυασμού του καλύτερου αποτελέσματος με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Η θέση των φωτοβολταϊκών έχει μεγάλη σημασία για την απόδοσή τους. Αν η στέγη διαμορφωθεί κατάλληλα από την αρχή ώστε να υποδεχτεί τα φωτοβολταϊκά έχουμε την δυνατότητα βελτιστοποίησης της θέσης των πλαϊσίων για να αξιοποιήσουν στο μέγιστο την ηλιοφάνεια.

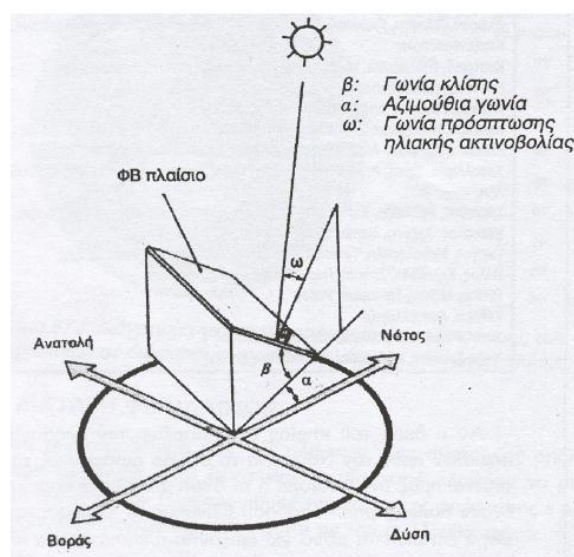
Τα περισσότερα κτίρια είναι κατάλληλα, αρκεί όμως να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις:

- Να υπάρχει επαρκής ελεύθερος και ασκίαστος χώρος. Ως ένα πρόχειρο κανόνα υπολογίζουμε πως χρειαζόμαστε περίπου 0,8 τετραγωνικά μέτρα για κάθε 100 Watt αν χρησιμοποιήσουμε τα συνηθισμένα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά. Αν πάλι τοποθετήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου, το συνολικό κόστος θα

είναι περίπου το ίδιο ή και μικρότερο, θα απαιτηθεί όμως 2-2,5 φορές μεγαλύτερη επιφάνεια. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στο να είναι ο χώρος κατά το δυνατόν ασκίαστος καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Διαφορετικά, το σύστημά θα λειτουργεί με μικρότερη απόδοση.

- Τα φωτοβολταϊκά να έχουν νότιο προσανατολισμό ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση. Αποκλίσεις από το Νότο έως και 45° είναι επιτρεπτές, αλλά μειώνουν την απόδοση.
- Να έχουν σωστή κλίση τα φωτοβολταϊκά σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Σχεδόν πάντα επιλέγεται μια κλίση που να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι η βέλτιστη κλίση είναι ίση ή περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Επειδή βέβαια κάθε κανόνας έχει τις εξαιρέσεις του, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10-15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. [3]

Ο προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από την αζιμούθια γωνία (α) και τη γωνία κλίσης (β). Η αζιμούθια γωνία σχηματίζεται από την προβολή της κατακόρυφου του φωτοβολταϊκού πλαισίου πάνω στον οριζόντιο επίπεδο και από το Νότο. Άρα, όταν $\alpha = 0^\circ$, η αντιστοιχία είναι σε τοποθέτηση του πλαισίου με νότιο προσανατολισμό. Με γωνία $\alpha = -180^\circ$, ο προσανατολισμός είναι προς τον Βορρά. Η γωνία κλίσης σχηματίζεται από το επίπεδο του πλαισίου και το οριζόντιο επίπεδο και δείχνει την κλίση του πλαισίου.



Σχ. 1.2 Προσανατολισμός πλαισίου

Στις περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου τα πλαίσια τοποθετούνται προς το Νότο ($\alpha = 0^\circ$), ενώ στο νότιο ημισφαίριο, τοποθετούνται προς το Βορρά ($\alpha = -180^\circ$). Αν η θέση του κτιρίου δεν επιτρέπει τον προσανατολισμό των πλαισίων προς το Νότο (βόρειο ημισφαίριο), τότε αυτά τοποθετούνται είτε προς την Ανατολή είτε προς τη Δύση, όχι όμως προς τον Βορρά, γιατί τότε θα υπάρχει αρκετά χαμηλή απόδοση. Μόνο για οριζόντια πλαίσια επιτρέπεται ο προσανατολισμός προς τον Βορρά. Στις περιπτώσεις που η τοποθέτηση δεν καθορίζεται από την κλίση της επιφάνειας που τοποθετούνται (π.χ. πλαϊνοί τοίχοι), η βέλτιστη γωνία κλίσης στο βόρειο ημισφαίριο εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και την περίοδο λειτουργίας του συστήματος. Στο μεγαλύτερο ποσοστό των περιπτώσεων, τα πλαίσια τοποθετούνται με σταθερή γωνία κλίσης και λόγω της συνεχούς μετακίνησης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη γωνία κλίσης των πλαισίων διαφέρει από εποχή σε εποχή. Γενικά, ανάλογα με την απαίτηση ισχύος κατά εποχή ανά γεωγραφικό πλάτος λ , ισχύει:

- $\beta = \lambda + 15^\circ$, μεγαλύτερη παραγωγή κατά τους χειμερινούς μήνες
 - $\beta = \lambda - 15^\circ$, μεγαλύτερη παραγωγή κατά τους θερινούς μήνες
 - $\beta = \lambda - 10^\circ$ έως $\lambda - 15^\circ$, μέγιστη ετήσια παραγωγή και αποδοτικότητα
-
- Να υπάρχει κατάλληλος χώρος για τα ηλεκτρονικά συστήματα και τις μπαταρίες, σε περίπτωση αυτόνομου συστήματος

 - Να λαμβάνεται υπόψη ότι μαζί με τις βάσεις, ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα ζυγίζει περίπου 15-20 κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

2.1 Ιστορία των Φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό μετά τα μέσα του εικοστού αιώνα, παρόλο που το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είχε παρατηρηθεί από τον Edmond Becquerel το 1839. Η πρώτη αναφορά για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο δημοσιεύτηκε το 1877 από δύο ερευνητές του πανεπιστημίου του Cambridge τους Adams και Days, ενώ το 1883 κατασκευάστηκε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο από selenium παρόμοιο με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου με απόδοση μικρότερη από 1%.

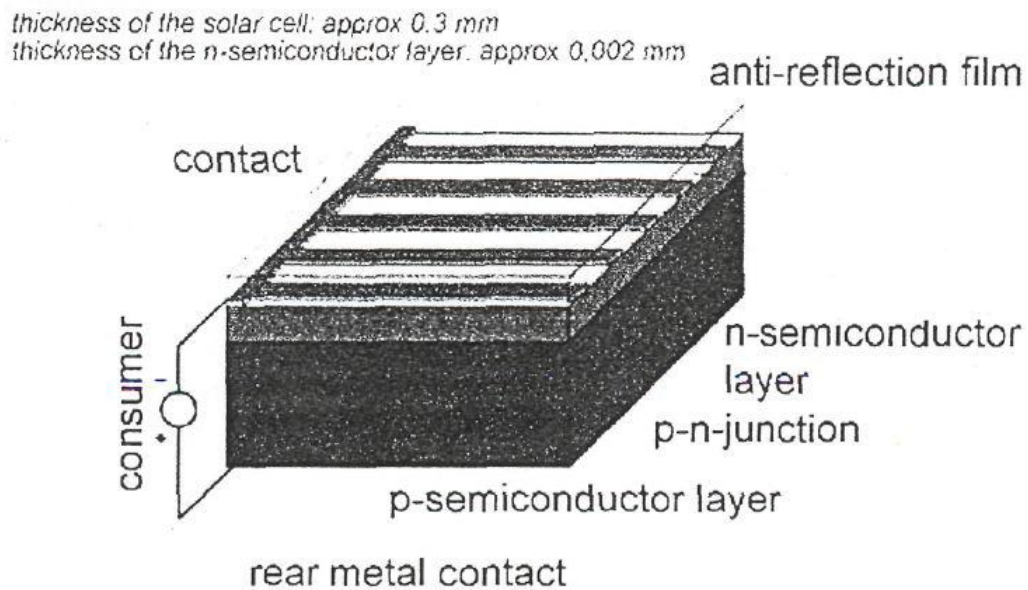
Αργότερα, οι Charin, Fuller και Pearson το 1954 κατασκεύασαν το πρώτο ηλιακό στοιχείο επαφής p-n με απόδοση 6%. Το 1956 διατέθηκαν στην αγορά τα πρώτα εμπορικά φωτοβολταϊκά πλαίσια με κόστος 1000\$/Wp, κατασκευασμένα από κρυσταλλικό πυρίτιο και με απόδοση μεταξύ 5-10%. Σήμερα η απόδοση των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει αγγίξει το 25% για διαστημικές εφαρμογές ενώ εκείνων που προορίζονται για επίγειες βιομηχανικές και οικιακές χρήσεις δεν ξεπερνά το 16%. [3]

2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγωγά υλικά, τα οποία μπορεί να είναι μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή και άμορφα. Ανεξάρτητα από την κρυσταλλική τους δομή, όλα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία εμπεριέχουν μία δίοδο ημιαγωγού που εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου. Συνήθως η δίοδος αυτή δημιουργείται από την επαφή ενός στρώματος τύπου-n με ένα στρώμα τύπου-p ή ακόμα από την επαφή μεταξύ ενός ημιαγωγού και ενός κατάλληλα επιλεγμένου μετάλλου (δίοδος Schottky).[4]

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων βασίζεται στη δημιουργία ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού στο υλικό που δέχεται την ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ζεύγος φορέων (ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας και μιας οπής στη ζώνη σθένους). Από τα παραγόμενα ζεύγη φορέων, εκείνα που θα βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n δέχονται τη δύναμη του ηλεκτροστατικού πεδίου της διόδου με σκοπό την μείωση της δυναμικής τους ενέργειας. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων προς την επαφή τύπου-n και των οπών προς την επαφή τύπου-p, δημιουργώντας μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της διόδου. Η παραπάνω διάταξη

συμπεριφέρεται ως ορθά πολωμένη δίοδος και ως πηγή ηλεκτρικού ρεύματος για όσο διάστημα δέχεται την ακτινοβολία. Η διαδικασία της δημιουργίας διαφοράς δυναμικού στις όψεις ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Σχήμα 2.1: Ηλιακό κύτταρο κρυσταλλικού πυριτίου [5]

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.1. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ζώνης p-n, οπότε θα δεχτούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού της πεδίου. Με τον τρόπο αυτό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της δίοδου. Η εκδήλωση της τάσης αυτής ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της δίοδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη αποτελεί μια πηγή ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

2.3 Φωτορεύμα

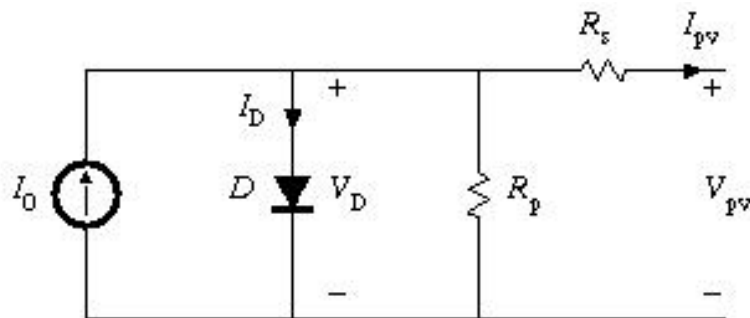
Όταν ένα φωτοβολταϊκό δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία διεγείρεται, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτορεύμα i_{ϕ} , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Η πυκνότητα του φωτορεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$I_p = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda)[1 - R(\lambda)]\Phi(\lambda)d\lambda$$

όπου e , είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο και λ_g , το μέγιστο χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος ακτινοβολίας στον ημιαγωγό. $S(\lambda)$ είναι η φασματική απόκριση που ορίζεται ως το πηλίκο των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με τη φωτονική ροή $\Phi(\lambda)$, δηλαδή με το πηλίκο των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $(\lambda+d\lambda)$. $R(\lambda)$ είναι ο δείκτης ανάκλασης της επιφάνειας του στοιχείου.

2.4 Μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το πιο γνωστό και απλό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του τρόπου λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, είναι το μοντέλο που περιέχει μία δίοδο και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2: Μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Το σημαντικότερο στοιχείο του παραπάνω κυκλώματος είναι η ιδανική πηγή ρεύματος, της οποίας το φωτορεύμα I_{pv} είναι ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ρεύμα της διόδου I_D δίνεται από τη σχέση:

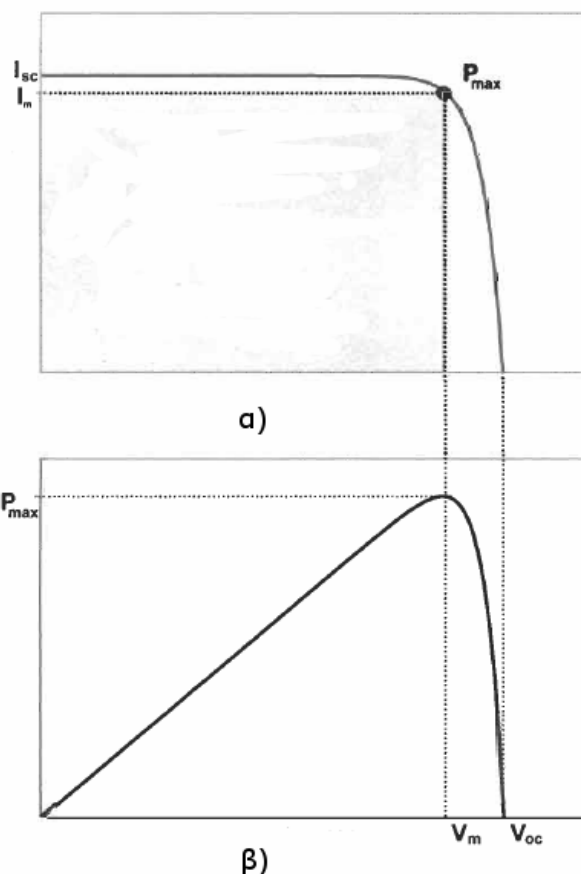
$$I_D = I_0 [\exp (e V_D / m K T) - 1]$$

όπου I_0 είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου, V_D είναι η τάση στα άκρα της διόδου, m είναι ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου, K είναι η σταθερά του Boltzmann, T είναι η απόλυτη θερμοκρασία και e το φορτίο του ηλεκτρονίου.[6]

Η παράλληλη αντίσταση R_p εκφράζει τις απώλειες του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ενώ η σε σειρά αντίσταση R_s εκφράζει τις πρόσθετες απώλειες του φωτοβολταϊκού στοιχείου όταν σε αυτό συνδεθεί κάποιο φορτίο. [7]

Χαρακτηριστικό διάγραμμα ενός ΦΒ αποτελεί η καμπύλη ρεύματος-τάσης ($I-V$) του στοιχείου (Σχήμα 17). Το ρεύμα για το οποίο έχουμε $V = 0$ ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , ενώ η τάση για την οποία ισχύει $I = 0$ ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} .

Η ισχύς $P = IV$ που παράγεται από το στοιχείο παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3β. Η μέγιστη τιμή της, δηλαδή $P=P_{max}$ παρατηρείται για $I=I_m$ και $V=V_m$ αντίστοιχα. Η μέγιστη ισχύς δίνεται από τους κατασκευαστές μετρημένη υπό ειδικές σταθερές συνθήκες (Standard Test Condition, STC), οι οποίες αντιστοιχούν σε ακτινοβολία 1000 W/m^2 , τιμή αέριας μάζας $AM=1.5$ και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (AM: Φασματική Κατανομή)



Σχ. 2.3 Η χαρακτηριστική καμπύλη α) $I-V$ β) $P-V$

2.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Στο ισοδύναμο του Σχ.2.2 που παρατέθηκε στην προηγούμενη ενότητα δεν περιλαμβάνεται η αντίσταση λόγω της κίνησης των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια, όπως ακόμα και η μη άπειρη αντίσταση διαμέσου της διόδου και τα αναπόφευκτα ρεύματα διαρροής. Μπορούμε να πούμε ότι, σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, η ισορροπία θα αποκατασταθεί όταν η τάση που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου προκαλέσει ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτορεύμα, το οποίο μπορούμε να εκφράσουμε επιπρόσθετα και από την σχέση:

$$I_{\phi} = I_0 \left(e^{\frac{eV}{\gamma k T}} - 1 \right)$$

όπου:

I_0 : το ανάστροφο ρεύμα κόρου

e : το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

k : η σταθερά Boltzmann

T : η απόλυτη θερμοκρασία,

γ : ένας συντελεστής που, ανάλογα με την κατασκευή και την ποιότητα της διόδου, παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2.

Από την παραπάνω σχέση, η τάση ανοικτοκυκλώματος V_{oc} θα είναι:

$$V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} - 1 \right), \quad I_0 < I_{\phi} \Rightarrow V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} \right)$$

Βλέπουμε λοιπόν τη λογαριθμική μεταβολή της V_{oc} σε συνάρτηση με το I_{ϕ} , δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και την εξάρτησή της από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού. Στην άλλη ακραία περίπτωση, εκεί δηλαδή όπου υπάρχουν συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα ισούται με το παραγόμενο φωτορεύμα, δηλαδή $I_{sc} = I_{\phi}$.

Όταν το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L , το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται με τη λύση της εξίσωσης:

$$I_L = I_\phi - I_0 \left(e^{\frac{eI_L R_s}{\gamma k T}} - 1 \right)$$

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης για την οποία θα έχουμε τη μέγιστη τιμή ισχύος P_{max} , η οποία επίσης προαναφέρθηκε και ισούται με $V_m \times I_m$. Άρα η V_m θα προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης:

$$\frac{I_\phi}{I_0} + 1 = \left(1 + \frac{eV_m}{\gamma k T} \right) e^{\frac{eV_m}{\gamma k T}}$$

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ο παράγοντας πλήρωσης FF (fill factor). Ο παράγοντας αυτός δίνεται από το λόγο των εμβαδών του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στην χαρακτηριστική καμπύλη I - V , προς το εμβαδό του ορθογωνίου που ορίζεται από τις τιμές V_{oc} και I_{sc} . Η αριθμητική του τιμή υπολογίζεται από το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύς PL προς το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και δίνεται από τη σχέση:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

Τέλος, η πιο βασική παράμετρος για την αξιολόγηση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η ενεργειακή τους απόδοση « η ». Η απόδοση η εξαρτάται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και το συντελεστή πλήρωσης FF και ισούται με το λόγο της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος του φωτοβολταϊκού στοιχείου, προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε όλη την επιφάνεια. Τότε ο συντελεστής απόδοσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{P_m}{HS} = \frac{I_m V_m}{HS} = FF * \frac{I_{sc} V_{oc}}{HS}$$

όπου H η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια S του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Δηλαδή, μια δέσμη ακτινοβολίας θα προκαλέσει σε ένα στοιχείο την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με μια άλλη ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο [2].

2.6 Πυρίτιο και φωτοβολταϊκά

Το πυρίτιο είναι ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1.17 eV και άμεσο μεγαλύτερο των 3 eV [3]. Μπορεί να μην είναι το ιδανικότερο υλικό για τις ανάγκες της φωτοβολταϊκής μετατροπής, έχει όμως ήδη γράψει το δικό του κεφάλαιο στην ιστορία της τεχνολογίας.



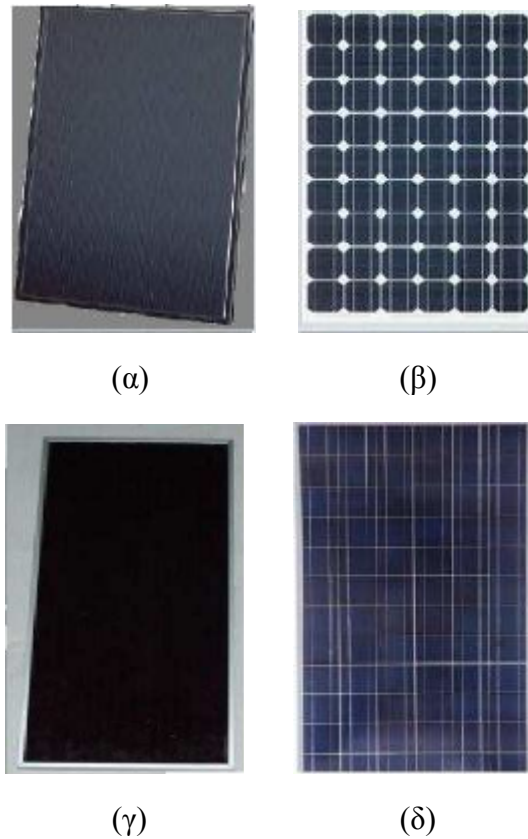
Σχ. 2.4 Πυρίτιο στην πρωτογενή του μορφή [8]

Το πυρίτιο (Si) είναι ένα από τα πλέον διαδεδομένα υλικά στην φύση καθώς αποτελεί το 25% του φλοιού της γης. Οι τελευταίες δεκαετίες ανάπτυξης του τομέα της ηλεκτρονικής αποτελούν το υπόβαθρο των σύγχρονων τεχνικών επεξεργασίας του πυριτίου. Η χημικός καθαρισμός της άμμου (SiO₂) οδηγεί μετά από διαδοχικά στάδια κρυσταλλοποίησης και χημικών διεργασιών στην παραγωγή πυριτίου ηλεκτρονικής ή ηλιακής ποιότητας κατάλληλο για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η αξιοπιστία του σε αντίξοες συνθήκες και το γεγονός ότι είναι δοκιμασμένο τόσο σε ακραίες γήινες όσο και διαστημικές εφαρμογές είναι στοιχείο του εντυπωσιακού ρυθμού ανάπτυξης της βιομηχανίας των φωτοβολταϊκών.

2.7 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων – σύντομη αναφορά

Οι δύο βασικές κατηγορίες τεχνολογιών είναι τα πλαίσια «Μεγάλου Πάχους» (Thick Films) και τα πλαίσια «Μικρού Πάχους» (Thin Films). Από εκεί και ύστερα, η κάθε κατηγορία αναλύεται σε ακόμα περισσότερες, ανάλογα με τεχνολογικά, ηλεκτρικά ή συστατικά-δομικά χαρακτηριστικά.

Τις περισσότερες φορές μπορούμε να καταλάβουμε σε ποιόν τύπο ανήκει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, απλά παρατηρώντας το στην όψη, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχ.2.4 Τύποι πυριτίου:

α) CIS – ινδοσεληνιούχου χαλκού, β) μονοκρυσταλλικού πυριτίου, γ) άμορφου πυριτίου, δ) πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Ανεξάρτητα από το υλικό, όλα τα πλαίσια έχουν δύο εξόδους, τον θετικό και τον αρνητικό, τον κόκκινο και τον μαύρο, οι οποίοι από τη μία ποικίλουν σε μορφή, από την άλλη όμως, με τους κατάλληλους αντάπτορες, παίρνουν τη μορφή εξόδου που εμείς επιθυμούμε, χωρίς καμία αλλοίωση του ρεύματος.

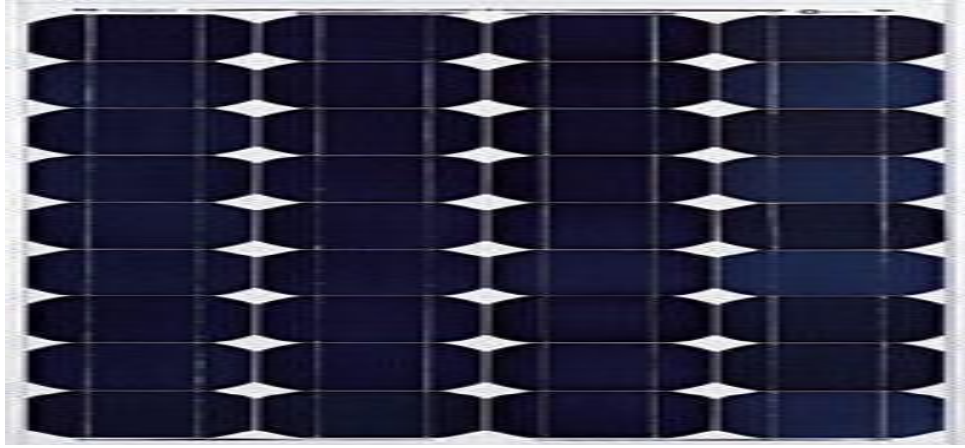
Το μπροστά εξωτερικό κομμάτι του πλαισίου καλύπτεται από ένα διαφανές τζάμι, χαμηλό σε οξείδια του σιδήρου, που επιτρέπει περίπου στο 92% της ηλιακής ακτινοβολίας να περνάει. Το 8% που μένει χάνεται λόγω φαινομένων ανάκλασης. Με τον τρόπο αυτό προστατεύονται τα ηλιακά κύτταρα από την υγρασία, τις ακαθαρσίες και τις μηχανικές παραμορφώσεις. Εμπειρικά έχουμε διαπιστώσει ότι η ύπαρξη του τζαμιού αυτού σημαίνει ότι χρειάζονται προσεκτικοί χειρισμοί κατά τη μετακίνησή τους. Υπάρχουν, μάλιστα, και περιπτώσεις που το τζάμι μπορεί να σπάσει από την υπερσυγκέντρωση ακτινοβολίας με συγκεντρωτικά κάτοπτρα. Αυτό το γεγονός είναι αρκετά εντυπωσιακό αν αναλογιστούμε ότι κατά την κατασκευή της γυάλινης επιφάνειας γίνεται ειδική επεξεργασία, ώστε να αντέχει σε υψηλά θερμικά φορτία. Το πάχος της συγκεκριμένης επιφάνειας είναι συνήθως 4mm αν και υπάρχουν εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη μηχανική και θερμική αντοχή κι έχουν πάχος κοντά στα 10mm συχνά, λόγω αυξημένης επιφάνειας του πλαισίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι, εξαιτίας της αυξανόμενης ζήτησης των φωτοβολταϊκών, οι ερευνητές έχουν προτείνει διάφορες τεχνολογίες ώστε να μειώσουν αυτό το 8% των απωλειών, κυρίως όταν οι ηλιακές ακτίνες χτυπούν την επιφάνεια υπό γωνία [9].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ **«ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ» (THICK FILMS)**

Το πλεονέκτημα της κάλυψης με παχύ μεταλλικό φιλμ, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία screen printing, η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη στη βιομηχανική Παρασκευή ηλιακών κυττάρων, οφείλεται αφ' ενός στο σχετικά χαμηλό κόστος επένδυσης και αφ' ετέρου στον σκοπό αυτοματοποίησης της διαδικασίας. Η μέθοδος screen printing είναι μία από τις μεθόδους κατασκευής του εμπρός πλέγματος των ηλιακών κυττάρων και αποτελεί εκείνη τη μέθοδο κατά την οποία μια μεταλλική πάστα χρησιμοποιείται και είναι συμφέρουσα, αλλά το μέγιστο πάχος των «δακτύλων επαφής» ή αλλιώς του εμπρός πλέγματος είναι περίπου 100 μικρόμετρα. Οι μεταλλικές πάστες που χρησιμοποιούνται περιέχουν επιπρόσθετα από το 70% Ag υπό μορφή πεταλίων πάχους λίγων μικρομέτρων και προσεγγιστικά 5 έως 15 μικρόμετρα εύρους για τις εμπρός επαφές, κατά προσέγγιση 2% μισολυωμένου γυαλιού με ίχνη Si. Το μισολυωμένο γυαλί αποτελείται από οξειδίο του μολύβδου, πυριτικό άλας του βοριούχου μολύβδου ή πυριτικό άλας βοριούχου ψευδαργύρου, ενώ το υπόλοιπο είναι συνδετικό υλικό. Μετά από την επίθεση, το στρώμα συντήκεται σε θερμοκρασίες περίπου 600 °C. Οι συνιστώσες του μισολυωμένου γυαλιού πολτοποιούν και διαλύουν ένα μικρό στρώμα πυριτίου. Την ίδια στιγμή, αυτός ο πολτός εμπλουτίζεται με άργυρο. Κατά την ψύξη δημιουργείται ένα στρώμα ανακρυσταλωμένου Si όπως με κανονικά κράματα, το οποίο περιέχει ένα μεγάλο μέρος Ag κι έτσι σχηματίζεται μια καλή θα λέγαμε ωμική αντίσταση. Αυτή η διαδικασία δίδει επαρκώς χαμηλές αντιστάσεις επαφής μόνο σε επιφανειακές συγκεντρώσεις επί του n^+ εκπομπού περίπου 10^{20} ανά κυβικά εκατοστά.

Για την κατασκευή των επαφών της πίσω επιφάνειας χρησιμοποιείται μόνο αλουμίνιο Al υπό μορφή πάστας. Το αλουμίνιο έχει δύο πλεονεκτήματα. Σχηματίζει κράματα σε 577 °C (σημείο τήξης) κι έχει μια σχετικά καλή διαλυτότητα σε συγκέντρωση περίπου 10^{19} ανά κυβικό εκατοστό σε πυρίτιο. Έτσι, στα ανακρυσταλωμένα στρώματα τα οποία σχηματίζονται δια ψύξεως, μια νόθευση p^+ πραγματοποιείται κι έτσι δημιουργείται ένα BSF, δηλαδή ένα πεδίο πίσω επιφάνειας (Back Surface Field), το οποίο είναι αναγκαίο για να κατασκευαστούν ηλιακά κύτταρα υψηλής απόδοσης, ενώ βασικότατο ρόλο σε αυτό παίζει το Βόριο μέσω της διάχυσής του. Το Βοριούχο Βρόμιο (BBr_3) μπορεί να λειτουργήσει σαν πηγή Βορίου για τον σκοπό αυτό.

3.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Single Crystalline Silicon, sc-Si)



Σχήμα 3.1: Πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Διακρίνεται η ομοιογένεια του υλικού και το χαρακτηριστικό σκούρο χρώμα.

Τα πλαίσια αυτά αποτελούνται από ηλιακά κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατάλληλα συνδεδεμένα. Το βασικό υλικό είναι το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο σε μορφή μεγάλων κρυστάλλων. Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (0,3mm). Τέτοια φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν φθάσει στο εργαστήριο σχεδόν σε απόδοση 2124%, με τις εμπορικές μονάδες των κυττάρων τους να κυμαίνονται από 13 έως 16%. Το χρώμα των κυττάρων είναι συνήθως σκούρο μαύρο ή μπλε με μία ενιαία επίπεδη δομή.

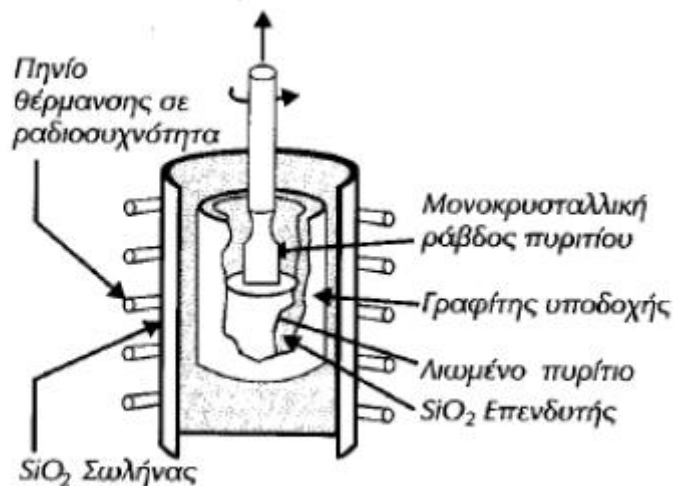
Το μονοκρυσταλλικό έχει ομοιόμορφη μοριακή δομή. Σε σύγκριση με υλικά που δεν είναι σε μορφή κρυστάλλου, η υψηλή του ομοιομορφία συνεπάγεται τον υψηλότερο u946 βαθμό απόδοσης (δηλαδή την αναλογία της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από το ηλιακό στοιχείο προς την διαθέσιμη από την ηλιακή ακτινοβολία ισχύ). Η απόδοση των μονοκρυσταλλικών στοιχείων για το εμπόριο κυμαίνεται από 14% έως 18%.

Το διοξείδιο του πυριτίου κατά τη διαδικασία αφαίρεσης των προσμίξεων θερμαίνεται στους 1800 °C παρουσία άνθρακα. Από εκεί προκύπτει το μεταλλουργικό πυρίτιο, το οποίο έχει μία καθαρότητα κοντά στο 98% και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μεταλλουργική βιομηχανία, ενώ είναι τελείως ακατάλληλο σαν ημιαγωγός. Απαιτείται συνεπώς επιπρόσθετη επεξεργασία.

Σε πρώτη φάση γίνεται ανάτηξη και μετά αντίδραση με υδροχλώριο (HCl), μετατρέποντας το μεταλλουργικό πυρίτιο σε τριχλωροσιλάνιο (SiHCl_3) που είναι ένα πτητικό υγρό. Έπειτα πραγματοποιείται η διαδικασία της κλασματικής απόσταξης (μέθοδος Siemens) ώστε να αποχωριστεί από τις διάφορες προσμίξεις. Τέλος, ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται.

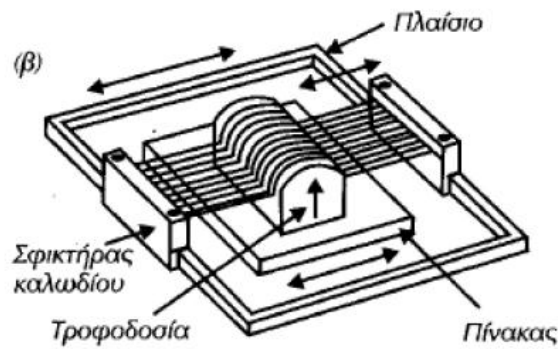
Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω διαδικασίες είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες και συμβάλλουν στο υψηλό κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το τελικό προϊόν αποτελεί υψηλής καθαρότητας πυρίτιο, δηλαδή με συγκέντρωση προσμίξεων μικρότερη του ενός ατόμου ανά 10^{12} άτομα Si, όμως δεν έχει την δομή που επιθυμούμε.

Ακολουθεί η κρυσταλλική ανάπτυξη του πυριτίου συνήθως με τη μέθοδο Czochranski, κατά την οποία αρχικά το πυρίτιο τήκεται μέσα σε ένα κυλινδρικό δοχείο και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1400 °C. Στη συνέχεια, ένα πολύ μικρό κομμάτι κρυσταλλικού πυριτίου τοποθετείται σε επαφή με την επιφάνεια του λιωμένου πυριτίου, ενώ το κυλινδρικό δοχείο βρίσκεται σε περιστροφική κίνηση. Το κομμάτι πυριτίου δρα σαν ένας πυρήνας κρυστάλλωσης κι έτσι το πυρίτιο επικάθεται κι επομένως μεγαλώνει κι έτσι σχηματίζεται σταδιακά ένας νέος μεγάλος κρύσταλλος πυριτίου με την συνεχή ανύψωση του λιωμένου πυριτίου. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι το πυρίτιο να αποκτά μια κυλινδρική μορφή με διάμετρο περίπου ίση με 10 εκατοστά και μήκος ίσο περίπου με 1 μέτρο.



Σχ. 3.2 Μέθοδος Czochranski [10]

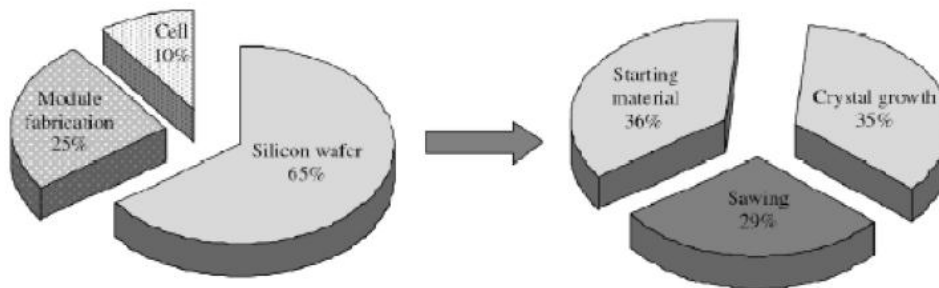
Στη συνέχεια, η κυλινδρική αυτή δομή τεμαχίζεται σε πολύ λεπτούς δίσκους (κυλινδρικές πλάκες), πάχους από 150 μικρόμετρα μέχρι 500 μικρόμετρα για τις 48 ηλιακές εφαρμογές. Η διαδικασία είναι πάρα πολύ δαπανηρή, καθώς το πυρίτιο είναι αρκετά σκληρό υλικό κι επιπρόσθετα χάνεται κι ένα ποσοστό από την κοπή με πολύ λεπτή αδαμάντινη ίνα. Μετά από εκεί, οι δίσκοι λειαινούνται για να απομακρυνθούν έτσι ελαττώματα από την κοπή και διαμορφώνονται σε δίοδους τύπου-p ή τύπου-n με επίταξη (ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την παραγωγή υποστρωμάτων πυριτίου με μονωτικό – Πυρίτιο – Μονωτής – Πυρίτιο ή Silicon On Insulator ή SOI), διάχυση ή εμφύτευση προσμίξεων.



Σχ.3.3 Κοπή με τη μέθοδο των πολλαπλών συρμάτων [11]

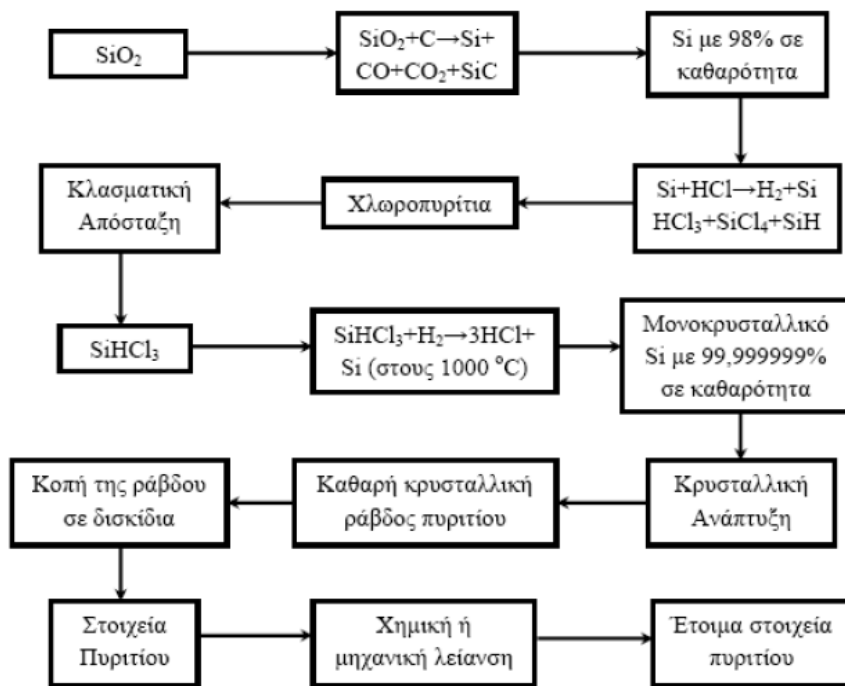
Το τελικό στάδιο είναι η συγκόλληση των ηλεκτροδίων στην εμπρός και την πίσω όψη του δίσκου, η σύνδεση μεταξύ των στοιχείων που μετά από όλα αυτά είναι πλέον έτοιμα, η κάλυψη της εμπρός επιφάνειάς τους με ένα αντανακλαστικό επίστρωμα που συμβάλλει στη μείωση της ανάκλασης του φωτός, ενώ τέλος ακολουθεί η στεγανή συσκευασία σε πλαίσια.

Το κόστος ανά παραγωγική διαδικασία παρουσιάζεται πιο κάτω, όπου φαίνεται ότι αποτελεί μεγάλο μέρος η παραγωγή καθαρού πυριτίου σε κρυσταλλική δομή και η κοπή του σε λεπτά δισκία.



Σχ.3.4 Καταμερισμός του κόστους παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ανά διαδικασία. Δεξιά αναλύεται το κόστος δημιουργίας δίσκων πυριτίου[12]

Συνολικά, θα μπορούσαμε να αναπαραστήσουμε όλη τη διαδικασία παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου με το εξής διάγραμμα:

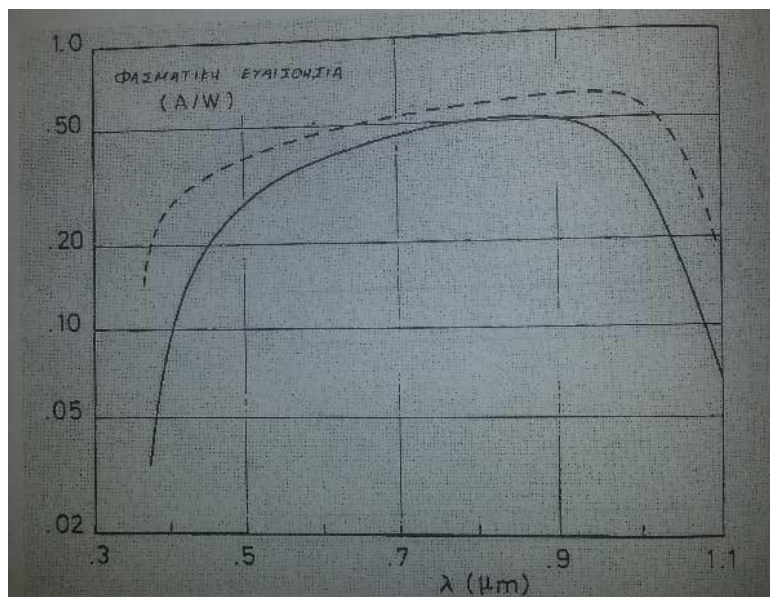


Σχ. 3.5 Διάγραμμα της διαδικασίας παρασκευής στοιχείου μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Για ένα standard κύτταρο αυτού του τύπου οι φωτοβολταϊκές του ιδιότητες υπό κανονικό φωτισμό και θερμοκρασία 28 °C, είναι οι παρακάτω:

- Ρεύμα βραχυκυκλώσεως $i_{sc} = 28 \text{ mA/cm}^2$
- Τάση Ανοικτοκυκλώματος $V_{oc} = 585 \text{ mV}$
- Ενεργειακή Απόδοση $\eta = 13\%$

Η ενεργειακή φασματική απόκριση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (συνεχής γραμμή):



Σχ. 3.6 Ενεργειακή φασματική ευαισθησία – SR (Spectral Response) κυττάρων μονοκρυσταλλικού πυριτίου

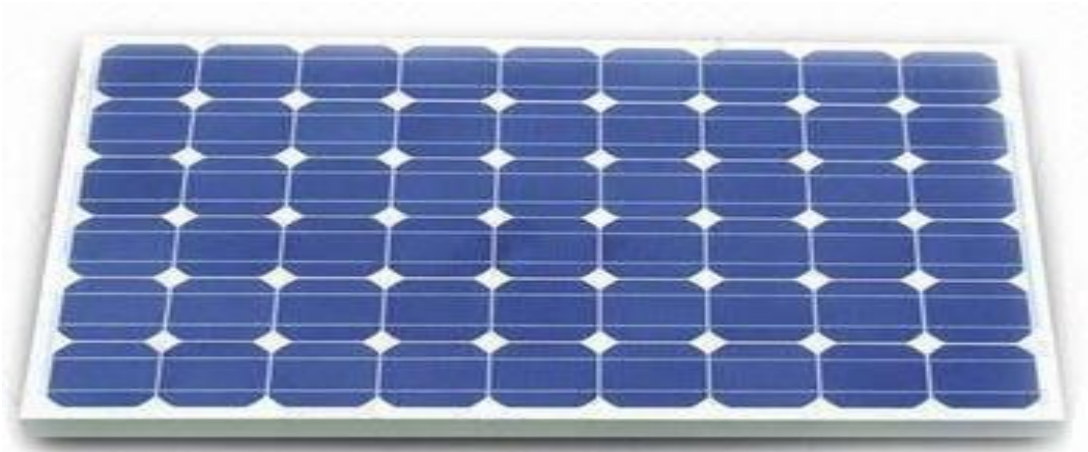
Βελτιώσεις είναι δυνατές κι έχουν επιτευχθεί σε πολλά σημεία και με διάφορα τεχνάσματα, όπως είναι:

- Πραγματοποίηση μιας επαφής ηλεκτρικού πεδίου στην πίσω επιφάνεια, (BSF). Η πίσω επιφάνεια του κυττάρου είναι πολύ νοθευμένη σε σύγκριση με τη βάση για ένα πάχος μερικών μικρομέτρων, σχηματίζοντας έτσι μια επαφή p/p⁺. Αυτή η επαφή ανακλά τους φορείς μειονότητας που προέρχονται από την βάση κι εξασφαλίζει μια ταχύτητα ανασύνδεσης $U_{\text{eff}} = 100 \text{ cm/s}$ (αντί για 1000000 cm/s).
- Ελάττωση του βάθους της επαφής στα 0.2 μικρόμετρα περίπου δια εξαλείψεως των επιφανειακών στρωμάτων που είναι κατεστραμμένα από τον πολύ δυνατό εμποτισμό. Έτσι αυξάνεται η ευαισθησία του κυττάρου στα φωτόνια μεγάλης ενέργειας (ονομαζόμενο ιώδες κύτταρο).
- Μείωση της τιμής του συντελεστή ανάκλασης, χρησιμοποιώντας επιφάνεια τύπου υφαντού. Αυτή η μορφή υφαντής επιφάνειας επιτυγχάνεται αν καθαρίσουμε με ανθρακική σόδα ένα δεδομένο κρυσταλλογραφικό επίπεδο και δίδει ένα ανάγλυφο πυραμίδων εύρους 1 έως 3 μικρόμετρα. Η μέση τιμή του συντελεστή ανάκλασης ελαττώνεται έτσι σε 4% περίπου (ονομαζόμενο μέλαν κύτταρο).
- Δημιουργία μιας μεταλλικής επαφής στην πίσω επιφάνεια η οποία να εξασφαλίζει την οπτική ανάκλαση κι επομένως αύξηση του μήκους του οπτικού δρόμου μέσα στο πυρίτιο. Έτσι, ένα λεπτό κύτταρο (50 μικρόμετρα) μπορεί να έχει το συντελεστή απόδοσης ενός κυττάρου μεγάλου πάχους και είναι πλεονεκτικότερο για τις εφαρμογές στο διάστημα.

Η μη συνεχής γραμμή του παραπάνω διαγράμματος δείχνει πως οι βελτιώσεις αυτές μεταφράζονται σε μια αύξηση της φασματικής ευαισθησίας στα δύο άκρα του φάσματος. Οι αντίστοιχες φωτοβολταϊκές παράμετροι παίρνουν, κατά ενδεικτικό μόνο τρόπο, τις ακόλουθες τιμές:

- Ρεύμα βραχυκυκλώσεως $i_{sc} = 33.6 \text{ mA/cm}^2$
- Τάση Ανοικτοκυκλώματος $V_{oc} = 600 \text{ mV}$
- Ενεργειακή Απόδοση $\eta = 15.5\%$

3.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)



Σχήμα 3.7: Πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Εμφανής ομοιότητα στην δομή των κυττάρων με το μονοκρυσταλλικό.

3.2.1 Κλασσικά Ηλιακά Κύτταρα Si

Το έντονο ενδιαφέρον για τη μελέτη και την χρήση του πολυκρυσταλλικού Si οφείλεται κυρίως σε οικονομικούς λόγους. Πράγματι, η τιμή των κυττάρων αναφοράς από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, περίπου 10 δολάρια/Watt κορυφής, W_p , δεν επιτρέπει την χρήση τους για εφαρμογές σε πολύ μεγάλη κλίμακα. Τα σημεία στα οποία θα ήταν πιθανές οι ελαττώσεις της τιμής φαίνονται στην παρακάτω ανάλυση του πίνακα που ακολουθεί. Πρέπει να σημειωθεί ότι με τον όρο «Ισχύς Αιχμής» ή «Ισχύς Κορυφής» W_p , ονομάζουμε την παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δέχεται ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος ίση με 1 ήλιο, δηλαδή 1kW/m^2 και είναι ενδεικτική τιμή.

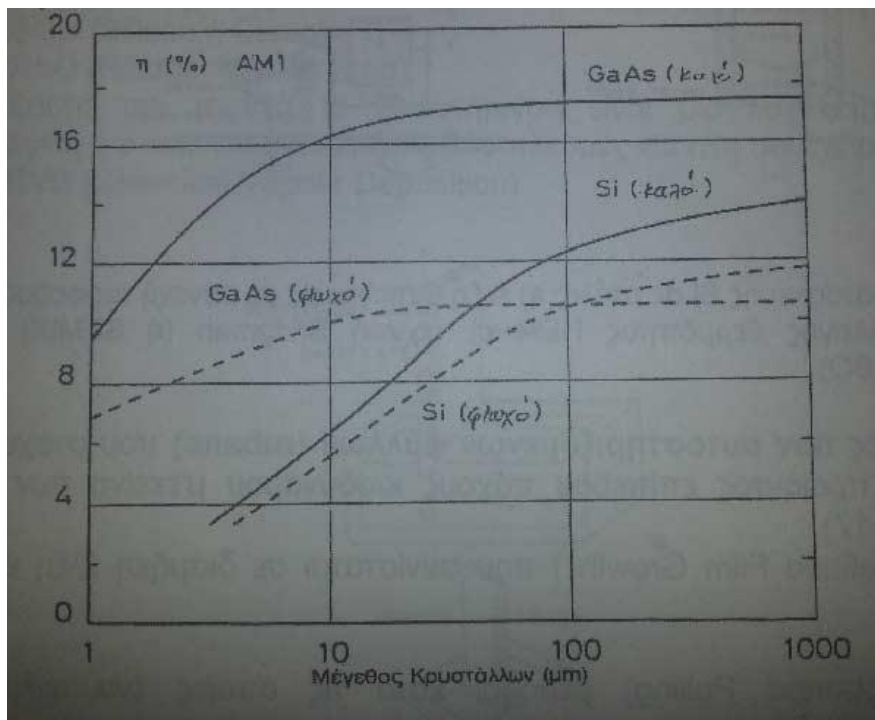
Διαδοχικά βήματα για τα Ηλιακά Κύτταρα	Κόστος
Πυρίτιο (Si) για πρώτη Ύλη	3 δολάρια / Watt
Κρυσταλλοποίηση και πρόσδοση μορφής	2 δολάρια / Watt
Τεχνολογία Κυττάρων	2.5 δολάρια / Watt
Τοποθέτηση σε Πλαίσια	1.5 δολάρια / Watt
Συνολικό Κόστος	9 δολάρια / Watt

Το πυρίτιο ηλιακής ποιότητας (Solar Grade Si, SG Si) παρασκευάζεται δια:

- Μιας απλοποίησης των βημάτων καθαρισμού και
- Κατοχύρωσης μιας διαδικασίας κρυσταλλοποίησης πιο γρήγορης, φθηνότερης σε ενέργεια η οποία να οδηγεί σε σχηματισμό πολυκρυσταλλικού υλικού. [13]

Όσο αφορά τον καθαρισμό, αρκετοί τρόποι είναι δυνατοί, χρησιμοποιώντας χημικές τεχνικές ή πυρομεταλλουργικές. Η ευαισθησία στην παρουσία προσμίξεων μεταβάλλεται από στοιχείο σε στοιχείο. Τα πλέον βλαβερά είναι τα στοιχεία μεταβάσεως, όπως είναι για παράδειγμα το Τιτάνιο, το Μολυβδένιο, το Βολφράμιο, ο Σίδηρος (Ti, Mo, V, Fe), των οποίων η συγκέντρωση πρέπει να ελαττωθεί στο επίπεδο του 10^{-3} έως 10^{-1} ppm² ανάλογα με την περίπτωση.

Η κατασκευή του ηλιακού Si υπό πολυκρυσταλλική μορφή εγείρει αρχικά τη θεωρητική ερώτηση της επίδρασης του μεγέθους των κρυσταλλικών κόκκων στο συντελεστή απόδοσης μετατροπής. Κατά γενικό κανόνα οι ενώσεις μεταξύ των κρυσταλλικών κόκκων δρουν σαν επιφάνειες ανασύνδεσης, πράγμα που ελαττώνει το ρεύμα βραχυκύκλωσης και αυξάνει το ρεύμα σκότους. Είναι ένα τρισδιάστατο πρόβλημα που έγινε και αντικείμενο αριθμητικής μοντελοποίησης. Τυπικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα για δύο υλικά, Si πάχους 25 μικρομέτρων και GaAs πάχους 2 μικρομέτρων και δύο ομάδες ηλεκτρονικών παραμέτρων. Η ελάχιστη διάμετρος των κρυσταλλικών κόκκων που επιτρέπει να φτάσουμε το 90% του δυναμικού συντελεστή απόδοσης του υλικού συνδέεται με το πάχος του κυττάρου, δηλαδή με το βάθος απορρόφησης που είναι περίπου 200 μικρόμετρα για το Si και 10 μικρόμετρα για το GaAs. [13]

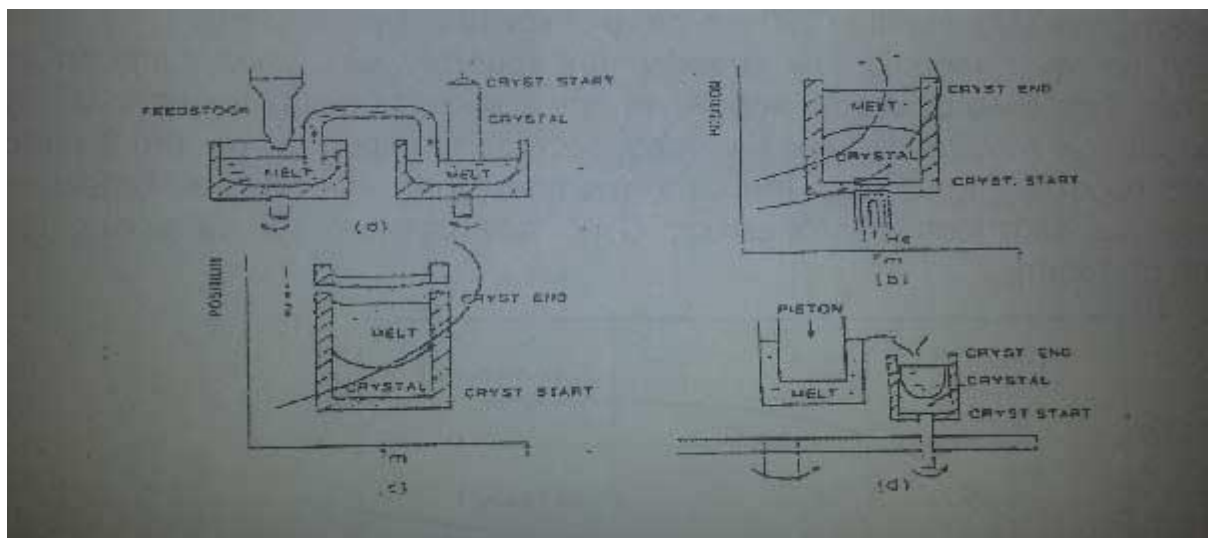


Σχήμα 3.8: Θεωρητική μεταβολή του συντελεστή απόδοσης μετατροπής (υπό ακτινοβολία AM 1) σε συνάρτηση με τη διάμετρο των κρυσταλλικών κόκκων, για πολυκρυσταλλικά κύτταρα Si και GaAs

Παράλληλα με την παρουσία των επαφών των κρυσταλλικών κόκκων πρέπει να θεωρήσουμε, έναν άλλο σπουδαίο παράγοντα, την πυκνότητα των ενδοκρυσταλλικών εξαρθρώσεων των συνδεομένων με την παραμόρφωση του κρυστάλλου από θερμικά αίτια ή από «οροσειρές» ιζημάτων. Πάνω από μία πυκνότητα 10^6 ανά τετραγωνικό εκατοστό, οι εξαρμώσεις επιβάλλουν μια ελάττωση της διάρκειας ζωής των φορέων κι επομένως του συντελεστή απόδοσης.

Σε πρακτικό επίπεδο, οι καινούριες διαδικασίες κρυσταλλοποίησης και σχηματισμού, διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

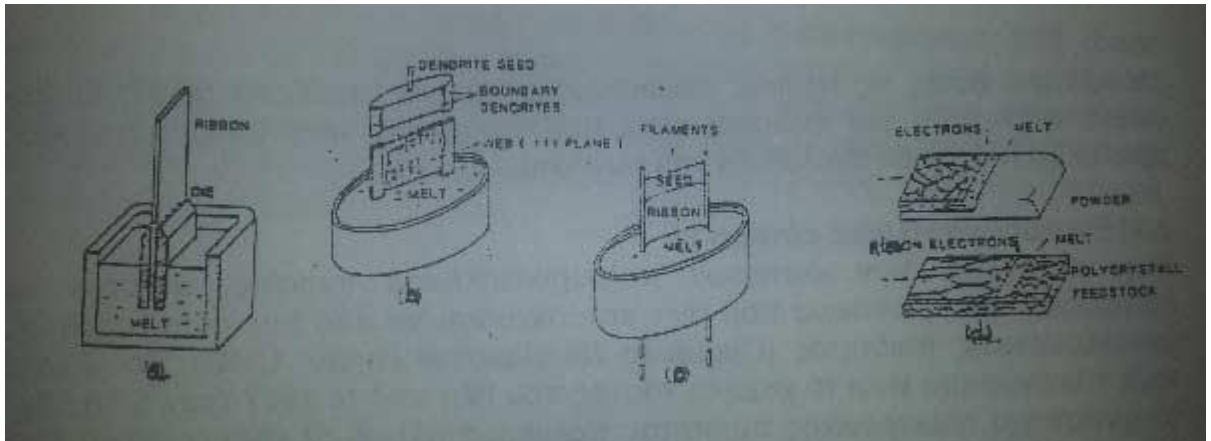
- Οι τεχνικές της στήλης, που επιβάλλουν μετέπειτα τη διαδικασία του κοψίματος σε πλακέτες:
 1. Η έλξη Czochralski
 2. Η μέθοδος HEM (Heat Exchange Method) κατά την οποία ένα υγρό κρυσταλλοποιείται δια σταδιακής ψύξεως
 3. Οι τεχνικές τύπου Bridgman ή Semix κατά τις οποίες επιτελείται μονοκατευθυνόμενη στερεοποίηση μέσα σε μια βάθμωση θερμοκρασίας, και τέλος
 4. Η μέθοδος πολτοποίησης σε καλούπι SiLSO κατά την οποία η κρυσταλλοποίηση γίνεται δια σταδιακής ψύξεως της στήλης ξεκινώντας από την περιφέρεια. [13]



Σχ. 3.9 (a) έλξη Czochralski (b) μέθοδος HEM (c) τεχνικές τύπου Bridgman ή Semix (d) μέθοδος πολτοποίησης σε καλούπι

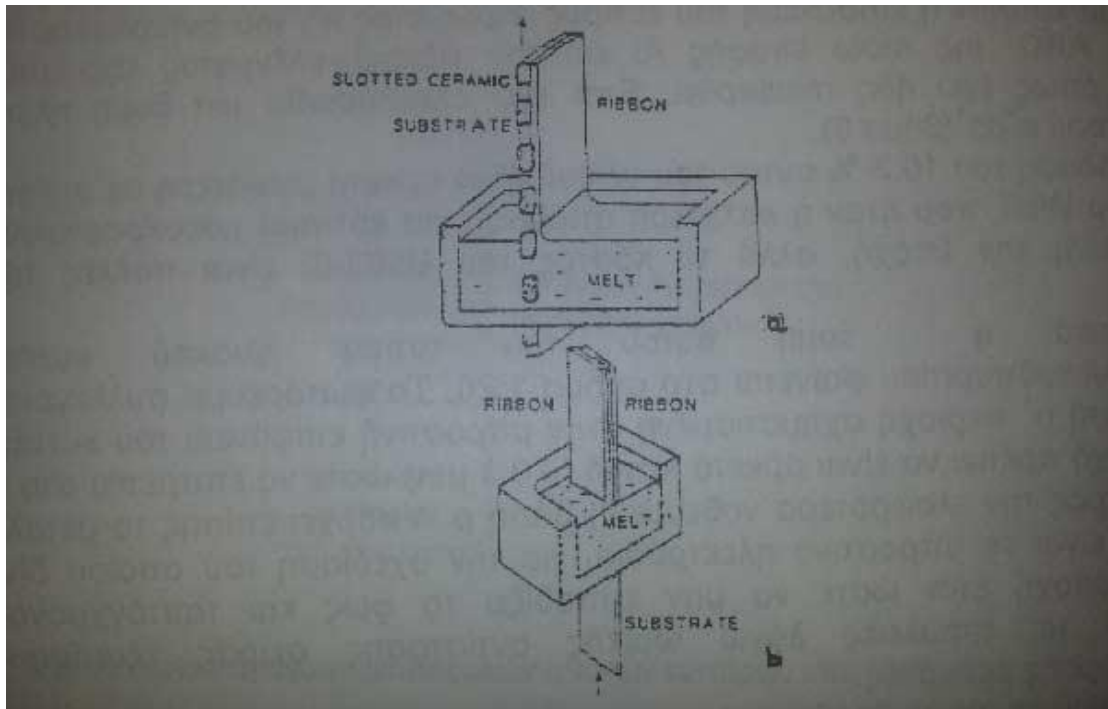
- Οι τεχνικές των αυτοστηριζόμενων φύλλων (ribbons) που έχουν ως στόχο την κατασκευή ενός προϊόντος επιπέδου με πάχος ισοδύναμου με εκείνο των κομμένων πλακετών:

1. EFG (Edge Defined Film Growth) που συνίσταται σε διαμήκη έλξη ενός υγρού μινίσκου
2. WEB
3. ESP (Edge Supported Pulling) μέθοδοι κατά τις οποίες ένα φιλμ πυριτίου αναπτύσσεται μεταξύ δύο υποστηρίγμάτων, για παράδειγμα γραφίτη
4. RFP (Ruban Forme de Poudre), όπου μία δέσμη ηλεκτρονίων συσσωρεύει τη σκόνη και προκαλεί ανακρυστάλλωση. [13]



Σχ. 3.10 (a) EFG (b) WEB (c) ESP (d) RFP

- Μέθοδοι αναγωγής ή επίθεσης επί υποστηρίγματος:
 1. SOC (Silicon ή Ceramic)
 2. RAD (Ribbon Against Drop). Εδώ το υποστήριγμα αποτελεί μια εύφλεκτη πλακέτα από γραφίτη, που μπαίνει από τις δύο πλευρές και στη συνέχεια καίγεται.
 3. CVD (Chemical Vapour Deposition) [13]



Σχ. 3.11 (a) SOC (b) RAD

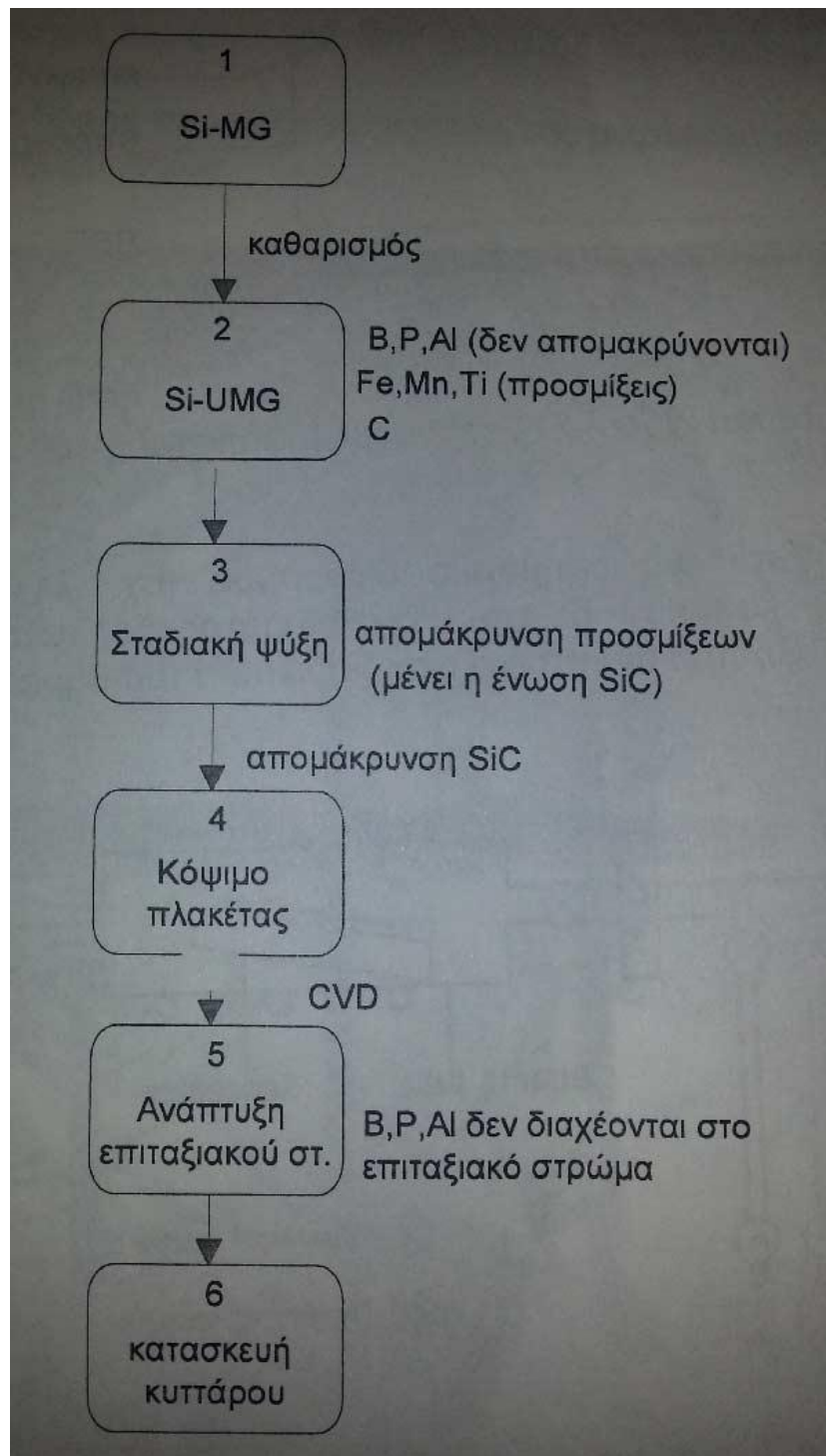
Με μία από αυτές τις τεχνικές παρασκευάζονται τα επιταξιακά ηλιακά κύτταρα, που συνίστανται σε μία ενδιαφέρουσα περίπτωση της τρέχουσας τεχνολογίας για αρκετά χρόνια και τα οποία αναλύονται παρακάτω.

3.2.2 Επιταξιακά Ηλιακά Κύτταρα Si

Στην κατηγορία του πολυκρυσταλλικού πυριτίου, ανήκουν και τα επιταξιακά ηλιακά κύτταρα τα οποία κατασκευάζονται από πυρίτιο αναβαθμισμένης μεταλλουργικής ποιότητας (UMG, Upgraded Metallurgical Grade). Το σημείο στο οποίο πλεονεκτούν περισσότερο είναι το κόστος συγκριτικά με τα κλασσικά πολυκρυσταλλικά, αφού ήδη από το 1987 ένα επιταξιακό ηλιακό κύτταρο κόστιζε 5 έως 10 δολάρια ανά κιλό, την ίδια ώρα που το αντίστοιχο ηλεκτρονικής ποιότητας πολυκρυσταλλικό είχε κόστος 30 έως 40 δολάρια ανά κιλό.

Η διαδικασία παραγωγής τους βασίζεται στην χημική εναπόθεση με ατμό, ενός ενεργού στρώματος πολύ καθαρού Si αλλά λεπτού, διαδικασία που συμφέρει όμως μέχρι το πάχος του στρώματος να είναι περίπου 50 μικρόμετρα, επί ενός υποστρώματος ακάθαρτου πολυκρυσταλλικού Si. Αυτό το υπόστρωμα παράγεται από ανακρυστάλλωση μέσα από την μέθοδο HEM που προαναφέρθηκε και μας δίνει Si-p+ από το οποίο όμως έχουν αφαιρεθεί αρκετές επιβλαβείς προσμίξεις. Η ανάπτυξη του επιταξιακού στρώματος γίνεται σε θερμοκρασία 1120 °C με ταχύτητα 1μm/min, αφού όμως έχει προηγηθεί ο χημικός καθαρισμός ή etching της κάθε πλακέτας με HCl στον αντιδραστήρα επίταξης και σε

θερμοκρασία 1150 °C. Στη συνέχεια έχουμε το ενδιάμεσο στάδιο του ελέγχου ποιότητας (πάχος, συγκέντρωση, νόθευση) και κατόπιν την κατασκευή του εμπρός στρώματος n+, του αντανακλαστικού στρώματος ARC, της πίσω επαφής Al και του ειδικού πλέγματος της εμπρός επιφάνειας, ολοκληρώνοντας έτσι τη δομή του κυττάρου, που έφτανε την απόδοση της τάξεως του 10.3%. Η απόδοση αυτή μπορεί να είναι σχετικά μικρή, αλλά το κόστος είναι πολλές τάξεις χαμηλότερο. [13]

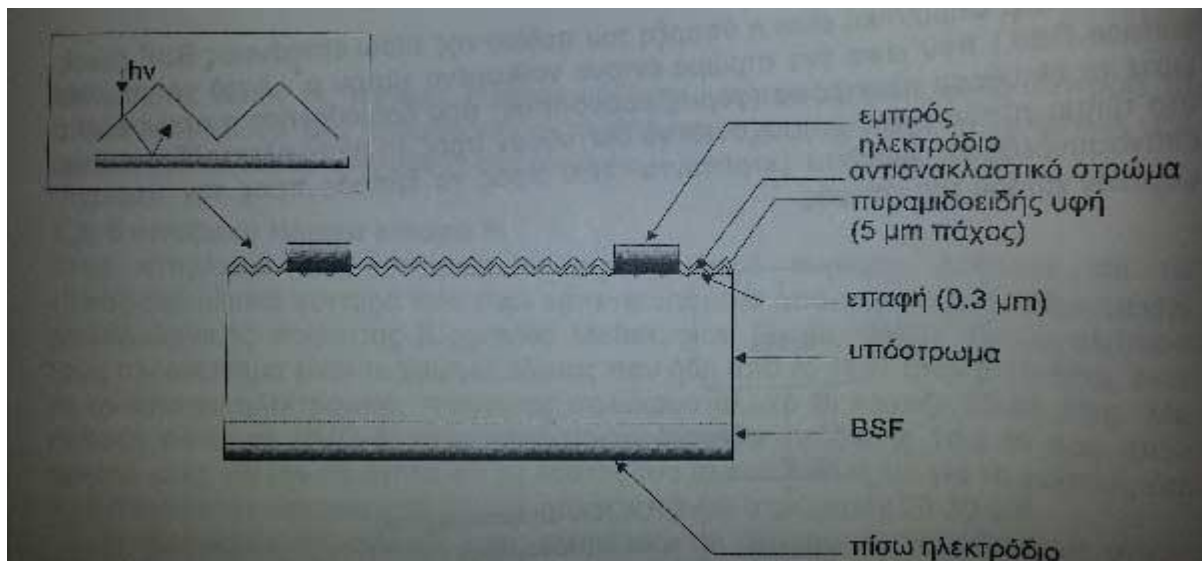


Σχ. 3.12 Διαδικασία παραγωγής επιταξιακών ηλιακών κυττάρων από UMG - Si

Από το βήμα 2 στο βήμα 3 πορευόμαστε με ανακρυστάλλωση και σταδιακή ψύξη με τη μέθοδο HEM. Η πλακέτα του βήματος 4 είναι Si – p+ και με το βήμα 5 έχει «δημιουργηθεί μια δομή pp+ η οποία συμπληρώνεται στην n+pp+ με σχηματισμό του πολύ λεπτού στρώματος n+ με τη μέθοδο screen printing, προκαλώντας διάχυση φωσφόρου στην παραπάνω δομή»[*].

[*] Νέες τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων, Π.Πατρών, Λέκτορας Περράκη Βασιλική.

Αν κάνουμε τομή στο συγκεκριμένο κύτταρο, θα διαπιστώσουμε ότι το φωτορεύμα συλλέγεται σε μια πολύ λεπτή n+ περιοχή σχηματισμένη στη μπροστινή επιφάνεια του κυττάρου. Αυτή θα πρέπει να είναι περίπου σε πάχος 0.3 μικρόμετρα, έτσι ώστε να επιτρέπει στο φως να περνάει προς την ελαφρότερα νοθευμένη βάση p. Επιπρόσθετα, υπάρχει και το μεταλλικό πλέγμα που είναι το μπροστινό ηλεκτρόδιο, το οποίο πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην εμποδίζει το φως και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιεί τις απώλειες λόγω ωμικής αντίστασης σειράς εξαιτίας της επιφανειακής ροής ρεύματος, γι' αυτό κι επιλέγουμε συνήθως ένα αρκετά πολύπλοκο σχήμα για το εμπρός ηλεκτρόδιο, με τη βοήθεια πάντα ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στην εμπρός επιφάνεια, ελαχιστοποιούμε την απώλεια φωτός με χημική διεργασία της επιφάνειας (etching) και με την εφαρμογή αντιανακλαστικού επιστρώματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολλές πυραμίδες που παγιδεύουν το φως με πολλαπλή ανάκλαση. [13]



Σχ. 3.13 Δομή ηλιακού κυττάρου, ενώ σε λεπτομέρεια φαίνεται η λειτουργικότητα της πυραμδοειδούς υφής

Τέλος, η ύπαρξη του πεδίου της πίσω επιφάνειας BSF είναι ιδιαίτερα σημαντική, και αυτό γιατί έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που είναι οι φορείς μειονότητας και που δημιουργήσε η ακτινοβολία στο τμήμα τύπου p, εμποδίζονται από το να διαχυθούν προς το πίσω ηλεκτρόδιο και να επανασυνδεθούν, αλλά εκτρέπονται μπροστά.

Η βιομηχανική ανάπτυξη των ηλιακών κυττάρων εξαρτάται όχι μόνο από τις διαδικασίες παρασκευής των ηλιακών κυττάρων, αλλά και από πλήθος άλλων παραγόντων. Για να μπορεί να υπάρχει όμως αντικειμενική κρίση για κάθε διαδικασία που πραγματοποιείται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυττάρων-πλαισίων κλπ, θα έπρεπε να διαρκέσει τουλάχιστον πέντε έτη συνεχόμενα για να μπορεί να επιτευχθεί

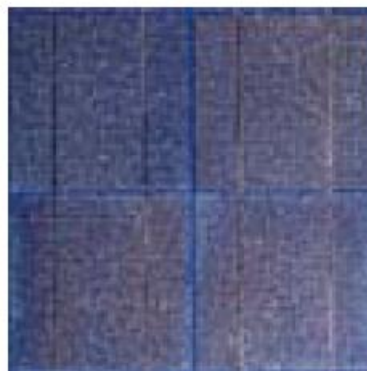
ελάττωση κατά έναν παράγοντα 3 έως 4 στο πραγματικό κόστος του υλικού βάσης Si και μόνο στην περίπτωση αυτή τα συμπεράσματα τα οποία θα εξαχθούν θα είναι απολύτως αξιόπιστα. [13]

3.3 Φ/Β ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)



Σχ. 3.14 Ταινία Πυριτίου

Η ταινία πυριτίου είναι μια λεπτή ταινία πολυκρυσταλλικού πυριτίου που δημιουργείται από τηγμένο υλικό με πάχος περίπου 0,3 χιλιοστά. Η απόδοσή της προσεγγίζει περίπου το 13%, ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%. Η μέθοδος κατασκευής είναι υψηλού κόστους και προς το παρόν η βιομηχανική παραγωγή είναι περιορισμένη [14].

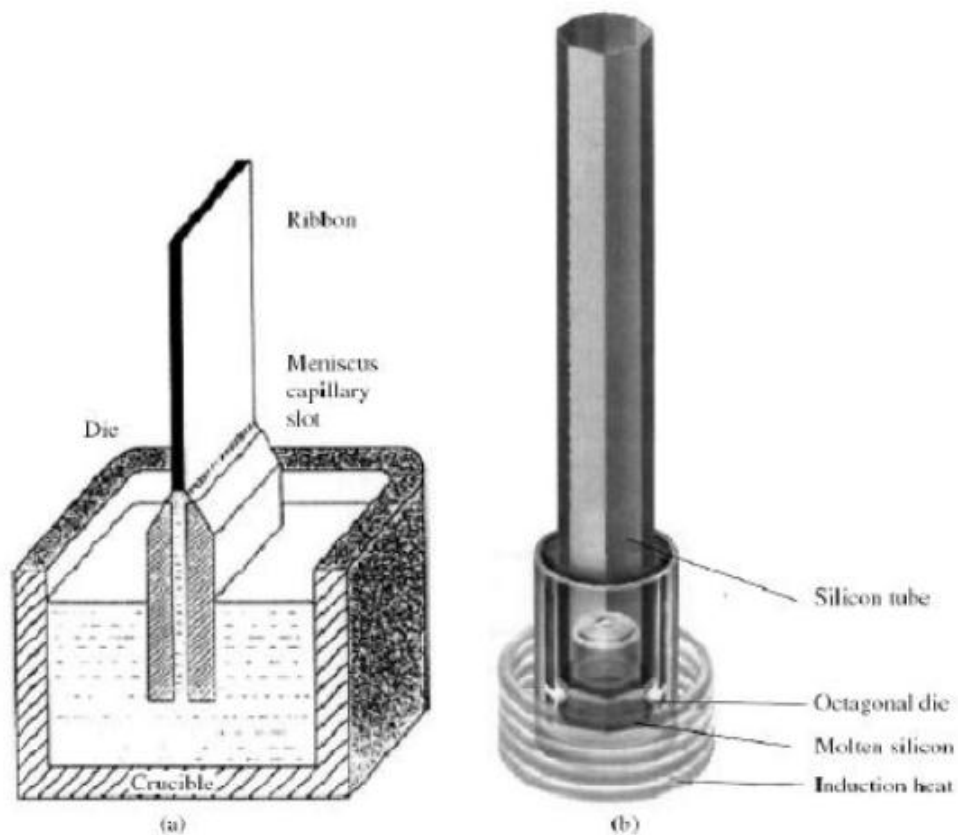


Σχ. 3.14 Ταινία Πυριτίου [15]

Για την αποφυγή λοιπόν του κόστους που είναι άμεσο αποτέλεσμα της διαδικασίας κοπής, επινοήθηκαν κι εφαρμόστηκαν πολλές τεχνικές, αλλά τελικά σήμερα εφαρμόζονται δύο μόνο τεχνολογίες κατασκευής για εμπορική χρήση:

1. Edge defined Film Fed Growth Process (EFG)

Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται το Ribbon πυρίτιο από το υλικό που έχει λιώσει μέσα σε ένα θα μπορούσαμε να πούμε καλούπι, που το σχήμα του είναι αυτό που θα καθορίσει και τη μορφή που θα έχει η ταινία. Τα στοιχεία που παράγονται είναι χαμηλότερης ποιότητας από τα μονοκρυσταλλικά και η επιφάνειά τους εμφανίζει ανομοιομορφίες. Όμως, η απόδοση σε αυτή την περίπτωση ακουμπά το 14.8%.



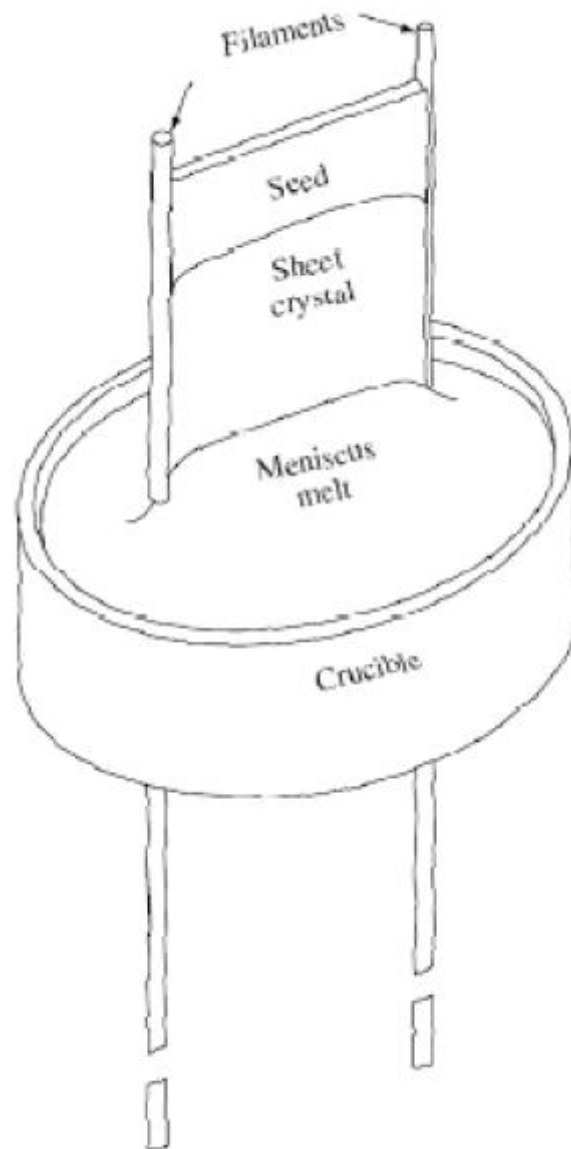
Σχ. 3.15 EFG (a)Απλή διαμόρφωση σε καλούπι (b) Οκταγωνική διαμόρφωση [16]

Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Antonio Luque and

Steven Hegedus

2. String Ribbon Process (STR)

Εδώ το πυρίτιο εξάγεται απευθείας από το δοχείο με το λιωμένο πυρίτιο, χωρίς την παρουσία του ονομαζόμενου καλουπιού που αναφέρθηκε στην προηγούμενη τεχνολογία. Απλά χρησιμοποιούνται δύο λωρίδες που διαπερνούν το δοχείο στην βάση του και κινούνται ανοδικά και με σταθερή ταχύτητα, από την οποία καθορίζεται το πάχος της ταινίας. Η απόδοσή τους μπορεί να προσεγγίσει και το 15%.



Σχ. 3.16 STR [16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ «ΜΙΚΡΟΥ ΠΑΧΟΥΣ» (THIN FILMS)

Βασικός σκοπός της τεχνολογίας «μικρού πάχους» ή «λεπτού πάχους» ή Thin Film δεν είναι άλλος από τη μείωση του κόστους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από τη μείωση του απαιτούμενου υλικού για την παραγωγή των στοιχείων. Η εναπόθεση μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας είτε σε γυαλί είτε σε κεραμικό είτε σε οποιοδήποτε άλλο κατάλληλο υπόστρωμα.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που αποτελεί και πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών λεπτού φιλμ, είναι και η ευκολία με την οποία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα να φτιάχνονται ολόκληρα πλαίσια κατά τη διαδικασία εναπόθεσης. Βέβαια, δε μπορούμε να παραβλέψουμε το πόσο απαιτητική καθίσταται η διαδικασία αυτή, αφού λόγω του παραπάνω χαρακτηριστικού θα πρέπει να παράγονται μεγάλες περιοχές χωρίς ελαττώματα.

Αν και η συγκεκριμένη κατηγορία έχει πάχος από 5 μέχρι 50 μικρόμετρα, στην πράξη και την εφαρμογή των πλαισίων της παρατηρούμε ότι είναι ιδιαίτερα αξιόλογος ο βαθμός απόδοσης. Αυτό που αποτελεί το βασικότερο χαρακτηριστικό για την τεχνολογία αυτή είναι ο «έξυπνος» οπτικός σχεδιασμός, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα το φως να διαγράφει μέσω ανακλάσεων διαδρομή 30 φορές ή και πιο πολύ, μεγαλύτερη από το πάχος του φιλμ. Το υλικό για το υπόστρωμα μπορεί να είναι χαμηλής ποιότητας πυρίτιο, γυαλί, κεραμικό ή γραφίτης.

Συνολικά, για τα Thin Films, θα μπορούσαμε να πούμε ότι, πέρα από το χαμηλότερο κόστος επένδυσης αλλά και απόσβεσης, που είναι επίσης πολύ σημαντικό, τα πλεονεκτήματά τους είναι:

- Παράγουν περισσότερη ενέργεια από τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια σε συννεφιασμένο ουρανό και με χαμηλό φως.
- Τα στοιχεία Thin Films αντέχουν περισσότερο στην ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν περισσότερη ισχύ στη διάρκεια των μεσημεριανών ωρών, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οπότε σε περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες όπως η χώρα μας, παράγονται περισσότερες κιλοβατώρες ενέργειας σε σχέση με τα κρυσταλλικά στοιχεία, ακόμα και σε συνθήκες διάχυτου φωτός.
- Τα στοιχεία Thin Film μεγάλου εμβαδού αποτελούν οικονομική λύση ειδικότερα για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις της τάξεως του MW όπου το κόστος εγκατάστασης είναι σαφώς μειωμένο.
- Η εύκαμπτη δομή των Thin Film προσφέρει την δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε καμπύλες επιφάνειες δίνοντας στους αρχιτέκτονες ελευθερία στον σχεδιασμό. Ενδείκνυται επίσης σε μεταγενέστερη ενσωμάτωσή τους στα κτήρια χωρίς να παρεμβαίνουν στο υπάρχον σχέδιο.
- Η ανακύκλωση, σε ποσοστό μεγαλύτερο της τάξης του 90%, των υλικών που αποτελούν το Thin Film όπως γυαλί και μέταλλο, καθιστά τη συγκεκριμένη τεχνολογία απολύτως φιλική προς το περιβάλλον.

- Η τεχνολογία Thin Film προσφέρει καινοτόμες λύσεις σε κτίρια, όπως για παράδειγμα την χρήση ημιδιάφανων φωτοβολταϊκών στοιχείων στα παράθυρα, αντικαθιστώντας έτσι τα τζάμια σε προσόψεις κτιρίων, προσφέροντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα να εισέλθει φυσικό φως.

Η παρασκευή των κυττάρων της τεχνολογίας αυτής γίνεται με εφαρμογή ειδικών τεχνικών, που συνδυάζουν τις χαμηλές θερμοκρασίες και την κάλυψη μεγάλων επιφανειών. Στο προσκήνιο της τρέχουσας τεχνολογίας υπάρχουν κατηγορίες που πληρούν όλα τα παραπάνω κριτήρια. Είναι οι εξής:

- Άμορφο Πυρίτιο
- Δισεληνιούχος Ινδιο-Χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη CIGS)
- Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)
- Αρσενιούχο Γάλλιο (GaAs)
- Οργανικά Φ/Β
- Νανοκρυσταλλικά Φ/Β

Οι κατηγορίες αυτές αναλύονται παρακάτω.

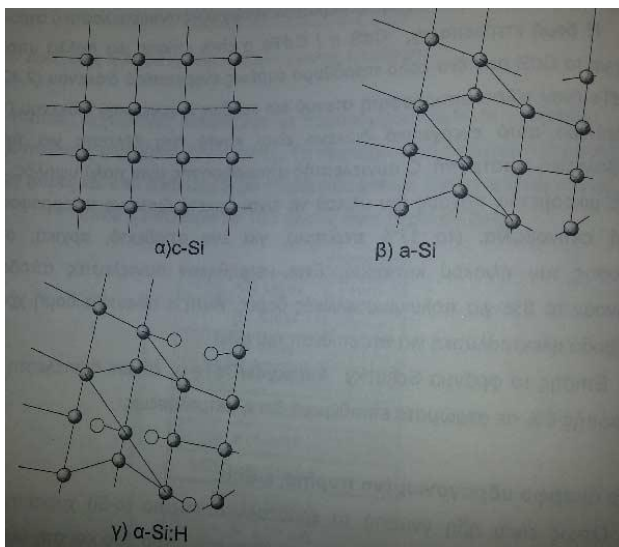
4.1 Λεπτά φιλμ άμορφου πυριτίου (Thin Film Silicon)



Σχ. 4.1 Πλαίσιο άμορφου πυριτίου

Το κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) χαρακτηρίζεται από κανονικότητα της κρυσταλλικής δομής του και από έμμεσο ενεργειακό διάκενο, οπότε προκύπτουν χαμηλές τιμές του συντελεστή απορρόφησης, γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί στο να χρειάζονται παχιά στρώματα για να απορροφούν περισσότερη ακτινοβολία.

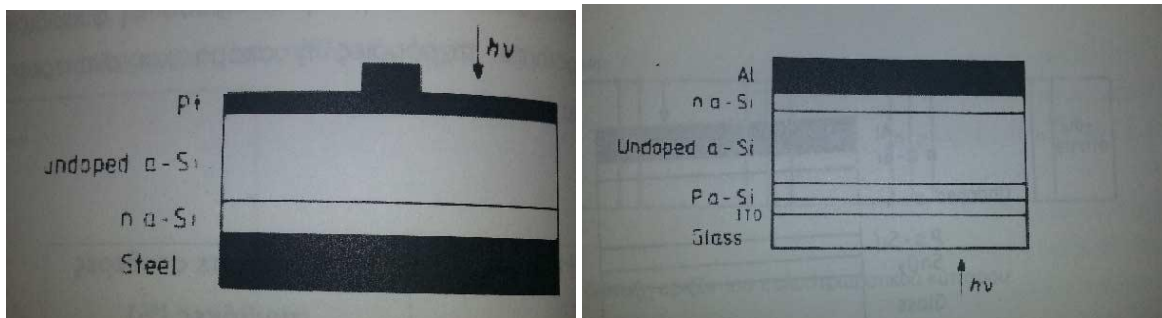
Εδώ έρχεται να δώσει τη λύση το άμορφο πυρίτιο. Ο χαρακτηρισμός «άμορφο» προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου και το γεγονός ότι δεν υπάρχει κρυσταλλική συμμετρία. Σε έναν άμορφο ημιαγωγό δεν υπάρχει τάξη σε μακροκλίμακα, όμως σε μικροκλίμακα μπορούμε να πούμε ότι υπάρχει, με την έννοια ότι οι αποστάσεις μεταξύ των ατόμων αλλά και οι αριθμοί διάταξης για τα αμέσως γειτονικά άτομα, είναι πολύ κοντά σε αυτούς που χαρακτηρίζουν έναν τέλειο κρύσταλλο. Μπορούμε δηλαδή να πούμε ότι το άμορφο πυρίτιο χαρακτηρίζεται από διάταξη σε μικροκλίμακα, αλλά και από την απουσία της σε μακροκλίμακα. [13]



Σχ. 4.2 α) Κρυσταλλική δομή του κρυσταλλικού πυριτίου, β) άμορφο πυρίτιο γ) άμορφο πυρίτιο με συμπληρωμένους τους ατελείς δεσμούς με υδρογόνο

Όταν το άμορφο πυρίτιο ενωθεί με το υδρογόνο (a-Si:H) σε ένα ατομικό ποσοστό περίπου από 5% έως 20%, τότε εμφανίζει ιδιότητες ημιαγωγού και αυτό που προκύπτει έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το μέλλον των κυττάρων λεπτού πάχους. Ο συντελεστής απορρόφησης είναι $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$, είναι υψηλότερος από εκείνον του κρυσταλλικού πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά με την τεχνολογία αυτή είναι από 6% έως 8%, ενώ τα εργαστήρια έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.

Έχουν μελετηθεί κι εφαρμοστεί πολλοί τύποι φωτοβολταϊκών δομών για το άμορφο πυρίτιο. Οι τρεις βασικότερες είναι η δίοδος Schottky (που αποτελείται από μια διαφανή επαφή Schottky που έχει φτιαχτεί από πλατίνα επί ενός ανόθευτου στρώματος a-Si, η οποία, ενώ είναι εύκολη στην κατασκευή εκφυλίζεται εύκολα λόγω υγρασίας), η δομή συλλογής με n-i-p επαφές (που ξεκινά με ένα γυαλί σαν βασική δομή στήριξης και μετά, μέσω CVD ή ψεκασμού το διαφανές αγωγό στρώμα οξειδίου επιτίθεται επί του γυάλινου υποστρώματος) και η ετεροεπαφή ITO-i-n. [13]



Σχ. 4.3 α) a-Si με φράγμα Schottky

β) a-Si τύπου n-i-p

Επίσης υπάρχουν και ακόμα πιο νέες δομές, όπως το οριζόντιο πολυστρωματικό ηλιακό κύτταρο, τα ηλιακά κύτταρα στρωματικού τύπου Tandem (Marfaing 1979) αλλά και τα κύτταρα επαφής βαθμωτού ενεργειακού διάκενου (Dahal 1980).

Μετά την επιλογή της δομής, έχουμε δύο τύπους τεχνολογιών κατασκευής, που είναι οι εξής:

Ο ένας χρησιμοποιεί μια ομάδα εργασιών κι εναποθέτει απλής συνένωσης ή πολλαπλών συνενώσεων κύτταρα επάνω σε μία πολύ λεία επιφάνεια από γυαλί με τη χρήση laser. Έτσι περιορίζεται το μέγεθος του πανέλου σε λίγα τετραγωνικά πόδια (1 πόδι = 30.48 cm).

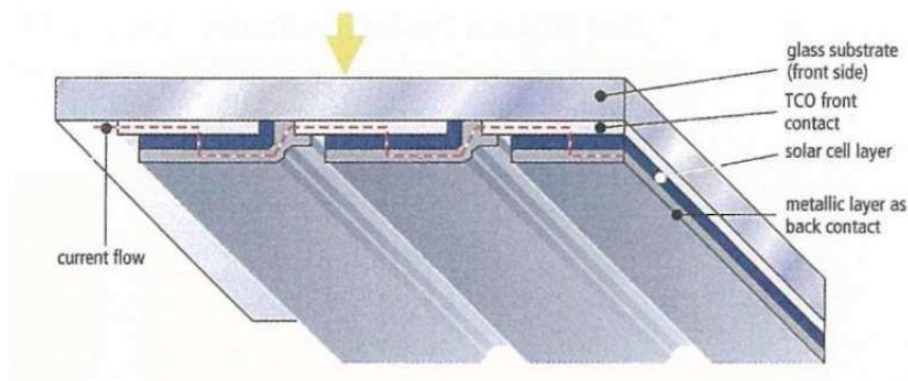
Ο δεύτερος, που είναι πιο πρακτικός και υψηλούς αξίας είναι η roll-to-roll διαδικασία. Σε αυτήν, ένας κύλινδρος αρκετών ποδιών σε μήκος και 35 εκατοστών πλάτους λεπτού ανοξειδωτού ατσαλιού, γεμίζεται με ποικίλες βαθμίδες εναποθέσεων και γίνεται προσπάθεια αποφυγής της διάχυσης του δότη. Αυτή η τεχνολογία έχει σαν πλεονέκτημα τη συνεχή λειτουργία, η οποία περιορίζεται μόνο από το μήκος του κυλίνδρου, ενώ το κόστος που προβλέπεται είναι σχεδόν 1 δολάριο ανά peak watt για ένα προϊόν ισχύος πάνω από 75 MW ανά έτος. Οι κατασκευαστές, όχι μόνο προσπαθούν να βελτιώσουν την απόδοση του module και να «ρίξουν» το κόστος κατασκευής, αλλά θέτουν και θέματα όπως η αξιοπιστία και η

μακροχρόνια σταθερότητα. Δίνονται εγγυήσεις για 10 χρόνια στα προϊόντα ισχύος, αν και σήμερα οι κατασκευαστές κάνουν λόγο για 20 χρόνια. [17]

Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των ηλιακών κυττάρων αμόρφου πυριτίου είναι τα εξής:

- Το άμορφο πυρίτιο νοθεύεται εύκολα από Βόριο και Φώσφορο για p-τύπου και n-τύπου υλικά, αντίστοιχα.
- Το οπτικό εύρος ζώνης του υλικού μπορεί να μεταβάλλεται στο διάστημα από 1.1 eV μέχρι και 2 eV με νόθευση γερμανίου ή άνθρακα.
- Η απόθεση ιζήματος γίνεται σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες, δηλαδή μικρότερες των 350 οC και μπορεί να αναπτυχθεί εύκολα σε μεγάλες επιφάνειες πολλών τετραγωνικών μέτρων.
- Μπορούμε να εξασφαλίσουμε υψηλούς ρυθμούς αποθέσεως ιζήματος, αφού έχουν επιτευχθεί ρυθμοί πάνω από $100 \text{ \AA}^0 \text{ s}^{-1}$ ($\text{\AA}^0 = \text{Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$) με την χρήση μικροκυματικής διέγερσης.
- Μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν πολλαπλές δομές και αλληλοσυνδέσεις κυττάρων.
- Τα δύο πιο σημαντικά στοιχεία, το πυρίτιο και το υδρογόνο, είναι σε αφθονία.
- Το άμορφο πυρίτιο κατέχει έναν υψηλό συντελεστή απορρόφησης που είναι μεγαλύτερος του 10^5 ανά εκατοστό και είναι πολύ πιο πάνω από το ορατό φάσμα, κάνοντας έτσι τις διατάξεις Thin Film a-Si κατάλληλες και οικονομικά συμφέρουσες.

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα, και αυτό γιατί, αν θέλουμε να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Άλλο ένα αποτελεί η υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους αμέσως μετά την έκθεση τους σε ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά στην διάρκεια ζωής των πλαισίων άμορφου πυριτίου μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια.



Σχ. 4.4 Σε σειρά συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία αμόρφου πυριτίου [18]

4.2 Δισεληνιούχος Ινδίο-Χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη CIGS)



Σχ. 4.5 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο CIS

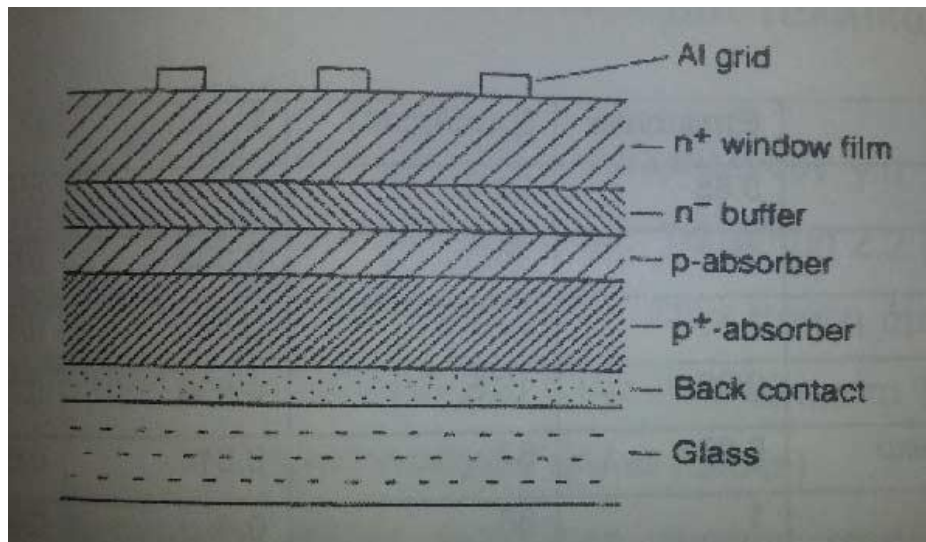
Είναι ημιαγώγιμο υλικό, τύπου-n ή τύπου-p, με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των CIS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο χαλκού/ινδίου και πλεονεκτούν συγκριτικά με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, αφού δεν υπάρχει μείωση στην απόδοσή τους λόγω της ακτινοβολίας (light degradation), ενώ παράλληλα προσφέρουν επίσης μεγάλη οικονομία στα ημιαγώγιμα υλικά [18]. Μειονέκτημα της τεχνολογίας είναι οι περιορισμένες ποσότητες ινδίου που είναι διαθέσιμες στη φύση, καθώς επίσης και τα αυξημένα μέτρα ασφαλείας που λαμβάνονται κατά την κατασκευή, εξαιτίας και της παραγωγής σεληνιούχου υδρογόνου, ενός εξαιρετικά τοξικού αερίου. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι:

- η απ' ευθείας στερεοποίηση DS (directional solidification),
- η χύτευση πυριτίου και τέλος
- η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC [15].

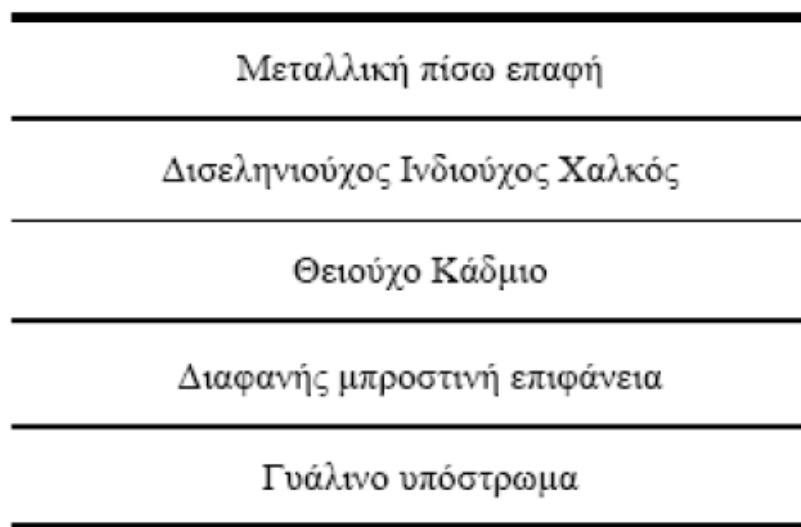
Επίσης, για τα CIS σε γενικές γραμμές ισχύουν:

- Μέγεθος: τυπικά πλαίσια, μέγιστες διαστάσεις 1,2m x 0,6 m.
- Πάχος: 2mm έως 4mm υλικό υποστρώματος (γυαλί) με 3nm έως 4nm πάχος στρώματος, εκ των οποίων περίπου 1 nm έως 2 nm CIS.
- Εμφάνιση: ομοιογενής.
- Χρώμα: σκούρο γκρι, μαύρο[17].

Ο CuInSe_2 εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1978 και το ότι οι υψηλές αποδόσεις επιτεύχθηκαν με αυτήν την τεχνολογία και μάλιστα χωρίς να παρατηρηθεί υποβάθμιση, είχε σαν συνέπεια να αυξηθεί το ερευνητικό ενδιαφέρον σε αυτό το πεδίο. Η δομή ενός ηλιακού κυττάρου αυτού του τύπου είναι οι εξής:



(α)



(β)

Σχ. 4.6 (α) και (β) Σχηματικό διάγραμμα ενός ηλιακού κυττάρου CuInSe_2

Ένα στρώμα μολυβδένιου (Mo) πάχους κατά προσέγγιση 1 μικρομέτρου εναποτίθεται σ' ένα υπόστρωμα από γυαλί. Στη συνέχεια, εναποτίθεται το ενεργό στρώμα του CuInSe_2 σ' ένα πάχος που κυμαίνεται από 1 έως 3 μικρόμετρα, υπό υψηλό κενό, μέσα από μια διαδικασία πολυεπίπεδης εξάτμισης. Ένα φιλμ παράθυρο από ZnO (ενεργειακό διάκενο κατά προσέγγιση

3.2 eV) εναποτίθεται επί ενός λεπτού διακομιστικού στρώματος CdS πάχους 0.3 μικρομέτρων.[13]

Το στρώμα CuInSe_2 είναι πολυκρυσταλλικό, άρα η επίδραση των ενδοεπιφανειών μεταξύ των κρυσταλλικών κόκκων, καθώς και οι ηλεκτρονικές καταστάσεις που τους διέπουν, έχουν άμεση επιρροή στις τιμές του φωτορεύματος και της ανοικτοκυκλωμένης τάσης. Επιπλέον, είναι αποφασιστικού βαθμού οι χαμηλές πυκνότητες ατελειών για αποδόσεις μεγαλύτερες από 15% και, αν χρησιμοποιήσουμε τεχνικές εξάτμισης υπό υψηλό κενό, μπορούν να ληφθούν. Επίσης, μία τεχνική ακόμα της οποίας έγινε χρήση ήταν και η εναπόθεση δια μέσου μάσκας ή, όπως προαναφέρθηκε, screen printing. Αυτό γίνεται για να ελαττωθεί το κόστος.

Το ενεργειακό διάκενο του 1eV αυτής της ενώσεως δεν είναι ευνοϊκό. Η καλύτερη χρήση όμως της ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται με την προσθήκη Γάλιου στο στρώμα In. Αυτό δημιουργεί έναν τεταρτογενή ημιαγωγό, το ενεργειακό διάκενο του οποίου αυξάνει συνεχώς με την συγκέντρωση σε Ga, ενώ αν το In αντικατασταθεί πλήρως, μπορούμε να φτάσουμε βέλτιστο ενεργειακό κενό των 1.4eV.

Επίσης, έχουν βελτιωθεί τα επιφανειακά στρώματα τον τελευταίο καιρό και σε ποιότητα του στρώματος CdS αλλά και του φιλμ παράθυρου, οπότε αρκετά εργαστήρια έχουν πετύχει αποδόσεις έως και 17%. Τελευταίες ερευνητικές εργασίες επιχειρούν την αντικατάσταση του Σεληνίου από Θείο με ενθαρρυντικά, τουλάχιστον προς το παρόν, αποτελέσματα.[13]

4.3 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

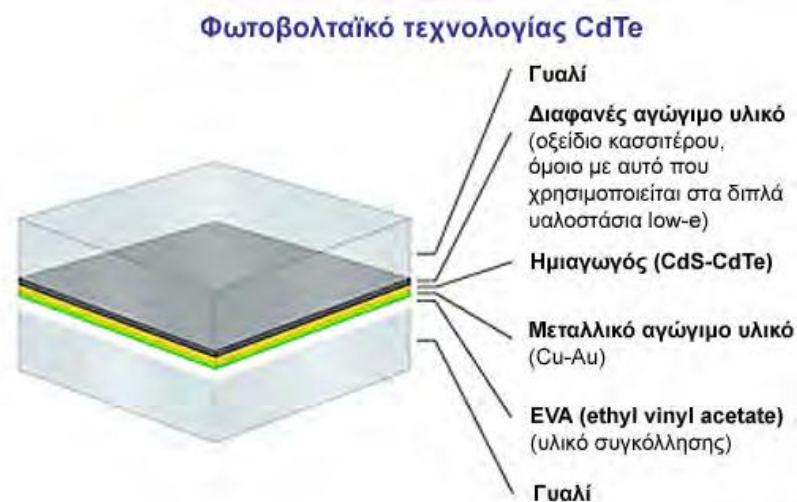


Σχ. 4.7 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο CdTe

Το CdTe χρησιμοποιείται σε αρκετές εφαρμογές για την πραγματοποίηση φωτοβολταϊκών. Η δομή της ομοεπαφής p-n έχει μελετηθεί σε μονοκρυσταλλικά υλικά και έχει μετρηθεί ένας αρκετά υψηλός εξωτερικός κβαντικός συντελεστής απόδοσης. Ο

συντελεστής απόδοσης μετατροπής ενέργειας είναι μεγαλύτερος από 10%, χωρίς αντανάκλαστικό στρώμα.

Η δομή της ετεροεπαφής CdS n / CdTe p είναι μια αρκετά υποχόμενη δομή με το CdS σαν ένα καλό παράθυρο ευρέως ενεργειακού διάκενου 2.42eV και το CdTe έναν τέλειο απορροφητή στενού και ενεργειακού διάκενου 1.44eV. Το δεύτερο ενεργειακό διάκενο είναι κοντά στο καλύτερο για την φωτοβολταϊκή μετατροπή. Ο συντελεστής απορρόφησης είναι πολύ υψηλός, ώστε μερικά μόνο μm πάχους του υλικού να είναι ικανά να απορροφήσουν 17% ηλιακής ακτινοβολίας, που είναι αρκετή ηλιακή ακτινοβολία, για έναν αποδεκτό αρχικά συντελεστή απόδοσης. Έτσι μετρήθηκαν συντελεστές απόδοσης που ξεπερνούν το 8% για πολυκρυσταλλικές δομές. Αυτή η τελευταία δομή χρησιμοποιεί μία ηλεκτρολυτική μέθοδο για την επίθεση του φιλμ.[13]



Σχ. 4.8 Από τι αποτελείται ένα φωτοβολταϊκό thin film τεχνολογίας CdTe

Οι σύγχρονες τεχνικές μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση σε τέτοια φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16%. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Εμπόδιο όμως για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το Κάδμιο, σύμφωνα με κάποιες έρευνες, είναι καρκινογόνο, οπότε και είναι απόλυτα λογικό το ότι προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του.

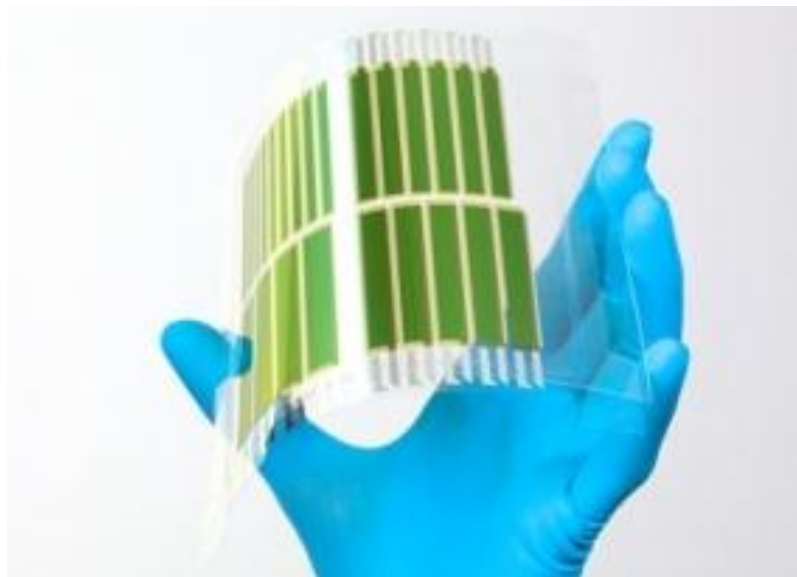
Τέλος, το φράγμα Schottky Au/oxide/CdTe η έδωσε συντελεστή απόδοσης μετατροπής 8% σε στρώματα που είναι επιτιθέμενα μέσω ηλεκτρολύσεως. [13]

4.4 Αρσενιούχο Γάλλιο (GaAs)

Στις αρχές του 1950, ο ημιαγωγός αυτός χρησιμοποιήθηκε σε κάποια εργαστήρια σαν υπόστρωμα για ημιαγωγικές διατάξεις, ενώ οι πιο πολλές εφαρμογές που το χρησιμοποιούν αυτή την περίοδο συναντώνται στον τομέα της οπτοηλεκτρονικής, με παραδείγματα διόδους και laser. Αποτελεί ιδιαίτερα ενδιαφέρον υλικό για τα φωτοβολταϊκά, αφού τα κύτταρα μονοκρυσταλλικού GaAs παρουσιάζουν συντελεστές απόδοσης που ξεπερνούν το 20%. Όμως, η χρήση πολυκρυσταλλικών στρωμάτων μειώνει τις τιμές αυτές, επειδή περιορίζονται η τιμή της τάσης ανοικτοκυκλώματος και του παράγοντα ποιότητας, λόγω της επίδρασης των κρυσταλλικών κόκκων. [13]

Το ενεργειακό διάκενο του GaAs είναι 1.42eV και αυτό το γεγονός μας δίνει τη σιγουριά για βέλτιστη προσαρμογή στην ηλιακή ακτινοβολία. Αρκεί πάχος 2μm ώστε να απορροφηθεί το 90 % του ηλιακού φάσματος. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι η εξάρτηση της απόδοσής του από την θερμοκρασία θα είναι μόνο το 1/3 αυτής του πυριτίου, οφειλόμενη στο ενεργειακό διάκενο. Επιπρόσθετα, τα ηλιακά κύτταρα GaAs έχουν πολύ μικρότερη ευαισθησία στην κοσμική ακτινοβολία από τα ηλιακά κύτταρα Si. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι για την τεχνολογία κατασκευής πλαισίων από GaAs ισχύουν: [13]

- Απόδοση: 8,5% απόδοση πλαισίου.
- Πάχος: 3mm υλικό υποστρώματος (γυαλί) με 0,005mm στρώμα CdTe.
- Μέγεθος: τυπικά πλαίσια 1,2 x 0,6 m.
- Εμφάνιση: ομοιογενής.
- Χρώμα: αντανακλαστικό σκούρο πράσινο σε μαύρο.



Σχ. 4.9 Εύκαμπτο κύτταρο GaAs [πηγή: <http://www.greentechmedia.com>]

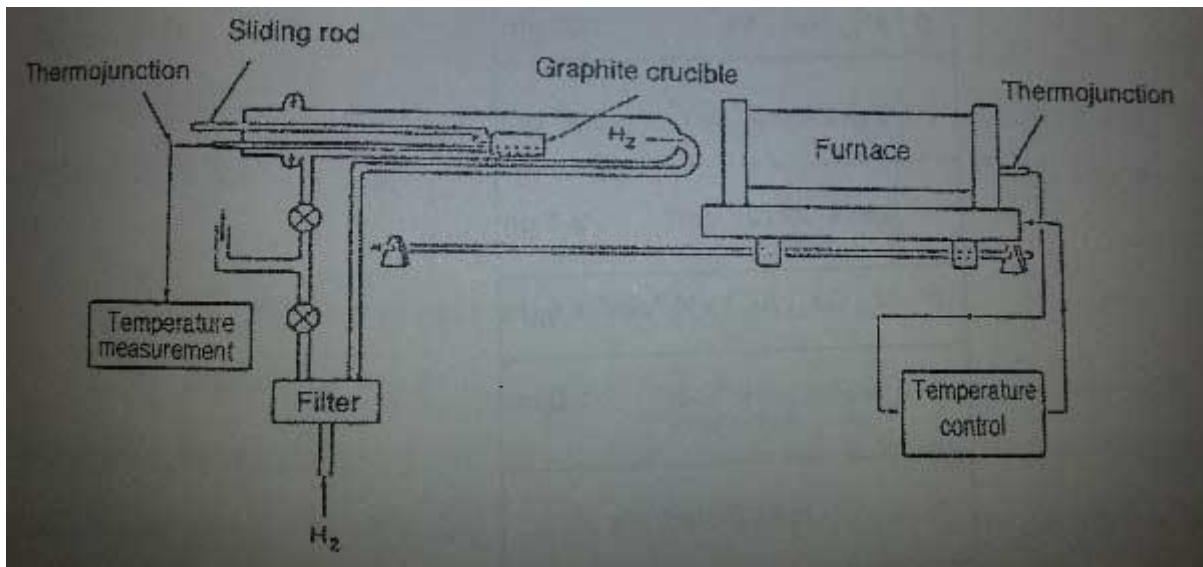
Οι φωτοβολταϊκές παράμετροι για ένα κύτταρο GaAs διαμέτρου 0.085m είναι ενδεικτικά:
 $V_{oc} = 1.14V$, $I_{sc} = 11.72A$, $ff = 0.792$

Επιπλέον, ο συγκεκριμένος ημιαγωγός μπορεί να μετατραπεί εύκολα σ' έναν τριαδικό ημιαγωγό μέσα από την προσθήκη στοιχείων από την III ή IV ομάδα στοιχείων του Περιοδικού Πίνακα. Αυτό σημαίνει ότι εύκολα μπορούμε να παράγουμε ημιαγωγούς με ευρύτερα ενεργειακά διάκενα, οι οποίοι μπορούν να δράσουν σαν στρώμα παράθυρο ή με πιο μικρά ενεργειακά διάκενα για τα Tandem ηλιακά κύτταρα που έχουν προαναφερθεί.

Σε χρήση υπάρχουν οι παρακάτω τρεις τεχνολογίες κατασκευής:

1. Επίταξη σε υγρή φάση (LPE)
2. Επίταξη οργανικού μετάλλου σε αέρια φάση (MOVPE)
3. Επίταξη με μοριακή δέσμη (MBE), η οποία διεξάγεται σε υπέρ-υψηλό κενό, σχεδόν αποκλειστικά με την χρήση σε εργαστήρια ανάπτυξης κι έρευνας.

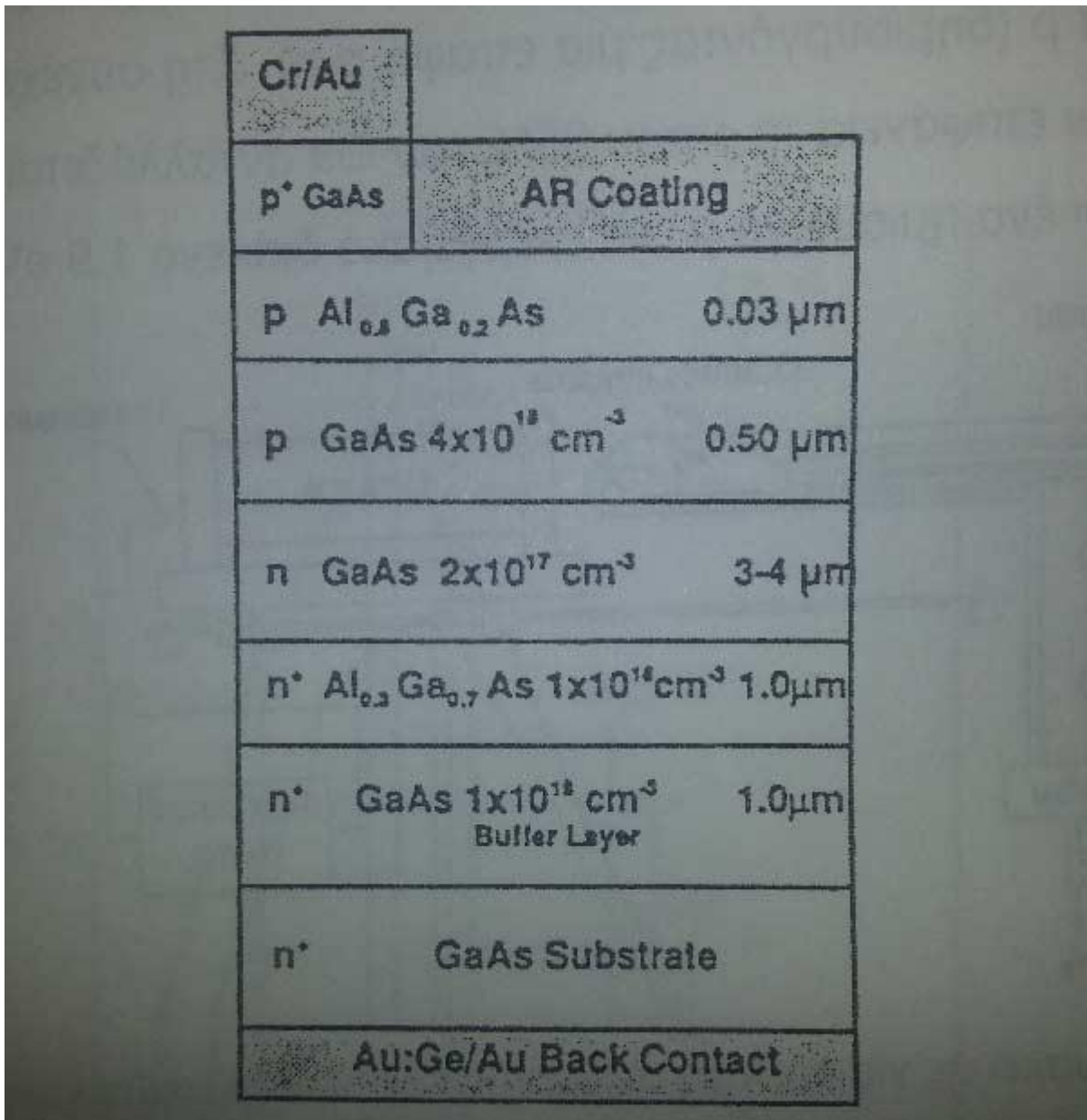
Στην πρώτη διαδικασία, μια λιωμένη μάζα Ga σχεδόν πλήρως κορεσμένη σε As βρίσκεται σε μια υψικάμινο γραφίτη σε θερμοκρασία που είναι περίπου ίση με 850 °C. Εκεί προστίθενται νοθευτές, όπως Zn και Al (ψευδάργυρος και αλουμίνιο αντίστοιχα). Για την διαδικασία, η υψικάμιнос τοποθετείται ανοικτή στην βάση, επάνω από ένα υπόστρωμα GaAs νοθευμένο τύπου N. Αρχικά, μια μικρή ποσότητα Ga-As διαλύεται από την επιφάνεια, ενώ μετά, κατά την επαφή με τη λιωμένη μάζα, διαχέεται ο Zn προς το υπόστρωμα του GaAs, νοθεύοντας έτσι ένα μικρό μέρος του εμβαδού του υποστρώματος σε ένα υλικό τύπου p (δημιουργώντας μια επαφή p-n). Έπειτα, μέσα στο λιωμένο στρώμα κοντά στην επιφάνεια, 85% περίπου του Γαλίου ανταλλάσσεται με Αλουμίνιο ($Al_{0.85}Ga_{0.15}As$), οπότε δημιουργείται ένας ημιαγωγός με διάκενο 1.9eV. [13]



Σχ. 4.10 Διάταξη συσκευής για επίταξη σε υγρή φάση των ηλιακών κυττάρων GaAs

Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο μπορούμε να επιτύχουμε απόδοση μεγαλύτερη του 22% (AM 1.5).

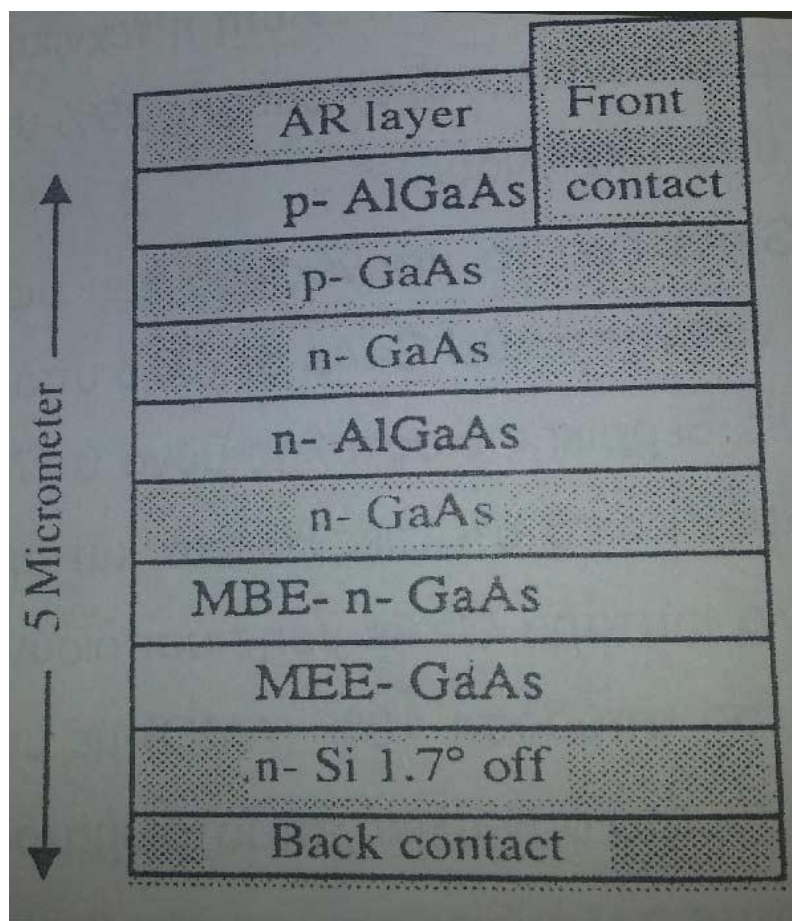
Αν θέλουμε να αυξήσουμε ακόμα περισσότερο την απόδοση, απαιτείται στην πίσω επιφάνεια n^+ GaAs. Και οι δύο διαδικασίες επίταξης που αναφέρθηκαν επιτρέπουν τη δημιουργία και επιπέδου νόθευσης, αλλά και κάθε επιλεγμένης ακολουθίας στρωμάτων. Η δομή μιας τέτοιας διαδικασίας MOVPE (δεύτερη περίπτωση) φαίνεται παρακάτω:



Σχ. 4.11 Δομή ενός ηλιακού κυττάρου GaAs υψηλής απόδοσης

Αυτή η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του υψηλότερου συντελεστή απόδοσης 25% υπό συνθήκες AM 1.5 ή με το ίδιο ηλιακό κύτταρο 29% υπό 100 ήλιους. [13]

Η χρήση του υποστρώματος GaAs παρουσιάζει το μειονέκτημα του υψηλού κόστους, γι' αυτό κι έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες να εναποθεθεί GaAs σε άλλο υπόστρωμα, με μια παραλλαγή να εμφανίζεται να είναι το Γερμάνιο (Ge) Που λόγω μικρής θερμικής διαστολής επιτρέπει την καθίζηση του GaAs απαλλαγμένη από ατέλειες. Τόσο ηλιακά κύτταρα αυτού του τύπου, όσο και απλά ηλιακά κύτταρα GaAs χρησιμοποιούνται ήδη στον τομέα των δορυφόρων και δίνουν μια μέση απόδοση 18% με μεγάλο μέλλον να υπόσχονται. Το πυρίτιο θα ήταν ιδιαίτερος επιθυμητό λόγω καλής θερμικής αγωγιμότητας αλλά και χαμηλού κόστους, όμως η ασυμφωνία θερμικής διαστολής που φτάνει περίπου στο 4% θα είχε ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση στο στρώμα επίταξης κι επομένως πλήθος εξαρθρώσεων. Κάποιες νεότερες τεχνολογίες κατασκευής, προσπαθούν να παρακάμψουν αυτό το πρόβλημα της θερμικής διαστολής χρησιμοποιώντας τα λεγόμενα στρώματα διακομιστές. Τα ιδιαίτερα αυτά στρώματα θερμαίνονται πολλές φορές κι επομένως είναι ελεύθερα παραμορφώσεων, με απόδοση σε 100 ήλιους περίπου στο 24% (τρίτη κατηγορία).



Σχ. 4.12 Δομή ενός ηλιακού κυττάρου GaAs παραγόμενο με MBE

Δύο είναι τα προβλήματα που αντιστέκονται στην χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας:

- Η υψηλή τιμή των ηλιακών κυττάρων GaAs εάν έχει πρέπει να δομηθεί επάνω σε υπόστρωμα GaAs. Μόνο με την χρήση κάποιου άλλου υλικού θα μπορούσε να προσφέρει κάτι καλύτερο για να προσπελαστεί αυτό το εμπόδιο.

- Τόσο το Ga όσο και το As είναι τοξικές ουσίες, οπότε το γεγονός της ευρύτερης αποδοχής τους γίνεται αμέσως θέμα σημαντικού προβληματισμού.

4.5 Οργανικά Φ/Β



Σχ. 4.13 Ηλιακό κύτταρο από πλαστικό

Οι οργανικές φωτοβολταϊκές διατάξεις (OPVs) είναι ημιαγωγικές διατάξεις οι οποίες αποτελούνται από ένα ή περισσότερα πολυμερικά στρώματα-ταινίες (polymeric films). [19]

Εντοπίστηκαν για πρώτη φορά ήδη από το 1906, όταν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε στην οργανική σύνθεση anthracine. Το ενδιαφέρον αναζωπυρώθηκε από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 όταν ανακαλύφθηκαν τα πολυμερή, ένα επίτευγμα που επέτρεψε στους επιστήμονες Dr Alan Heeger, Καθηγητή Φυσικής στο Πανεπιστήμιο της Σάντα Μπάρμπαρα, Καλιφόρνια, μαζί με τους συναδέλφους του, το Νεοζηλανδό Dr Alan MacDiarmid και τον Ιάπωνα Hideki Shirakawa ερευνητή, να κερδίσουν ένα βραβείο Νόμπελ το 2000. Ορισμένα πλαστικά, τυπικά πολυμερή μακράς αλυσίδας με διπλούς δεσμούς, όταν έρθουν σε επαφή με το υλικό «δότη», συμπεριφέρονται όπως τα μέταλλα σε ορισμένα σημεία και επιτρέπουν τη ροή ηλεκτρονίων. Ένας αριθμός από αυτά τα πλαστικά είναι μεταξύ αγωγών και μονωτών, δηλαδή είναι ημιαγωγοί. Τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρέχουν

ισότιμες κοστολογήσεις του δικτύου, κάτι που οι συμβατικές τεχνολογίες απέτυχαν μέχρι στιγμής να κάνουν. Ωστόσο έχουν ένα μειονέκτημα: χαμηλή μετατροπή της ενέργειας. Η τεχνολογία αγωνίζεται σήμερα για να προσφέρει απόδοση πάνω από 5%, σε σύγκριση με το 20% που επιτεύχθηκε από συμβατικά φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου, ή με το 10% από thin film. Το ερώτημα που προκύπτει λοιπόν είναι, αν το χαμηλό κόστος μπορεί επαρκώς να αντισταθμίσει τη μείωση αποδόσεων, ώστε να μπορέσουν τα OPV να γίνουν εμπορικά βιώσιμα.

Υπάρχουν αρκετά και σημαντικά, τουλάχιστον προς το παρόν, εμπόδια που καθιστούν τη «ζωή» των OPV πολύ δύσκολη εκτός εργαστηρίου, με πρώτο και πιο σημαντικό την ευαισθησία στο οξυγόνο. Πολλά από τα κύτταρα που παράγονται σε εργαστήρια σήμερα δοκιμάζονται χωρίς ποτέ να έχουν εκτεθεί στον αέρα. Μολονότι υπάρχουν τεχνικές ενθυλάκωσης, θα πρέπει να προστεθούν στο κόστος παραγωγής. Ακόμη και αν τα κύτταρα δεν καταστρέφονται από την έκθεση στον αέρα, πολλά από αυτά θα έχουν μικρή διάρκεια ζωής, επειδή υποβαθμίζονται γρήγορα με την έκθεση στο φως.

Ακόμα ένα εμπόδιο αποτελεί το μέγεθος των κυττάρων. Τα περισσότερα κύτταρα κατασκευάζονται για περιοχές της τάξεως του 1 mm^2 . Για να μπορούμε όμως να τα εφαρμόσουμε στις απαιτήσεις της καθημερινότητας, θα πρέπει να κατασκευάζονται για περιοχές της τάξης των 10 ή 100 cm^2 και αυτά τα κύτταρα με τη σειρά τους θα πρέπει να είναι σε θέση να συναρμολογηθούν σε ακόμα μεγαλύτερα πάνελ της τάξεως m^2 .

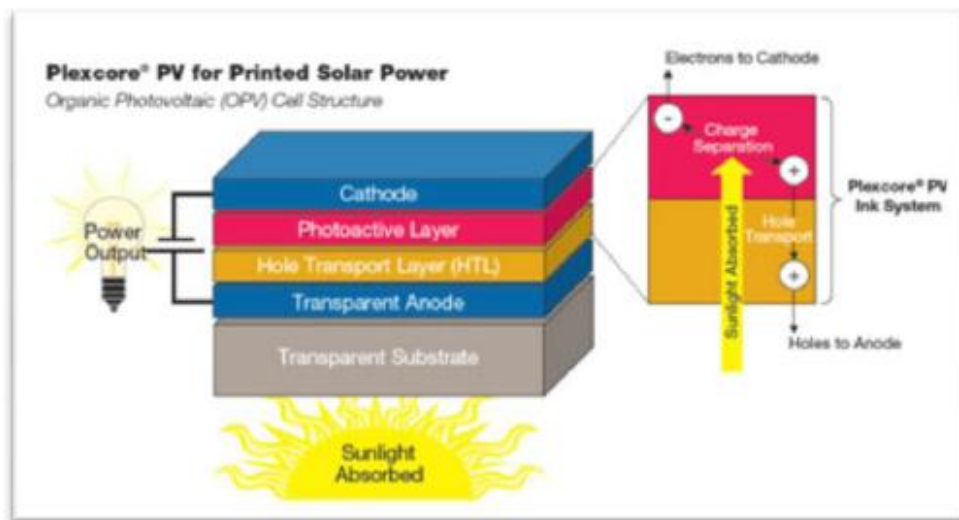
Ένα ακόμα γεγονός που είναι άξιο προβληματισμού αποτελεί το πώς μπορεί να αξιοποιηθεί πραγματικά η ενέργεια που παράγεται. Εάν για παράδειγμα περιοδικές πηγές όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια αποτελέσουν μεγάλο μέρος της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να υπάρχει τέτοια δυνατότητα αποθήκευσης που μέχρι σήμερα δεν έχει διερευνηθεί. Συμπερασματικά, η απομάκρυνση από τα συμβατικά καύσιμα θα απαιτήσει μεγάλες επενδύσεις σε υποδομές, ακόμα και αλλαγές στον τρόπο που η κοινωνία βλέπει την ενέργεια. [20]

Η τεχνολογία κατασκευής των οργανικών ηλιακών κελιών βασίζεται σε θεωρία που είναι παρόμοια με αυτή των ηλιακών κελιών που βασίζονται στο πυρίτιο, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από το φως του ήλιου σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η κύρια διαφορά των οργανικών από τις ανόργανες διατάξεις είναι ότι η απορρόφηση φωτός δεν δημιουργεί ελεύθερους φορείς φορτίου αλλά δεσμευμένους, με το δεσμευμένο ζευγάρι θετικού και αρνητικού φορτίου να είναι γνωστό ως εξιτόνιο. Ένα εξιτόνιο μπορεί να θεωρηθεί ως εξιτόνιο Freknel, εάν το ζευγάρι είναι περιορισμένο σε μια μοριακή μονάδα ή ως Wannier-Mott εάν επεκτείνεται πέρα από πολλές μοριακές μονάδες. Η ενδιάμεση περίπτωση όπου το εντοπίζεται σε μερικές μόνο παρακείμενες μοριακές μονάδες μπορεί να ονομαστεί φορέας φορτίου (change transfer). [21]

Είναι ηλεκτρικά ουδέτερο με μια μόνο διπολική στιγμή. Ένα εξιτόνιο σχηματίζεται όταν ένα φωτόνιο απορροφάται από κάποιο ημιαγώγιμο υλικό. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Αντίστοιχα αυτό αφήνει πίσω του μια θετικά φορτισμένη οπή (απουσία ηλεκτρονίου) συγκεκριμένης θέσης. Εν συνεχεία, το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στην ζώνη αγωγιμότητας δέχεται ελκτική δύναμη Coulomb από την αντίστοιχη οπή. Η έννοια των εξιτονίων προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Yakov Frenkel το 1931 όταν περιέγραψε τη διέγερση ατόμων σε μια κυψελωτή δομή μονωτών.

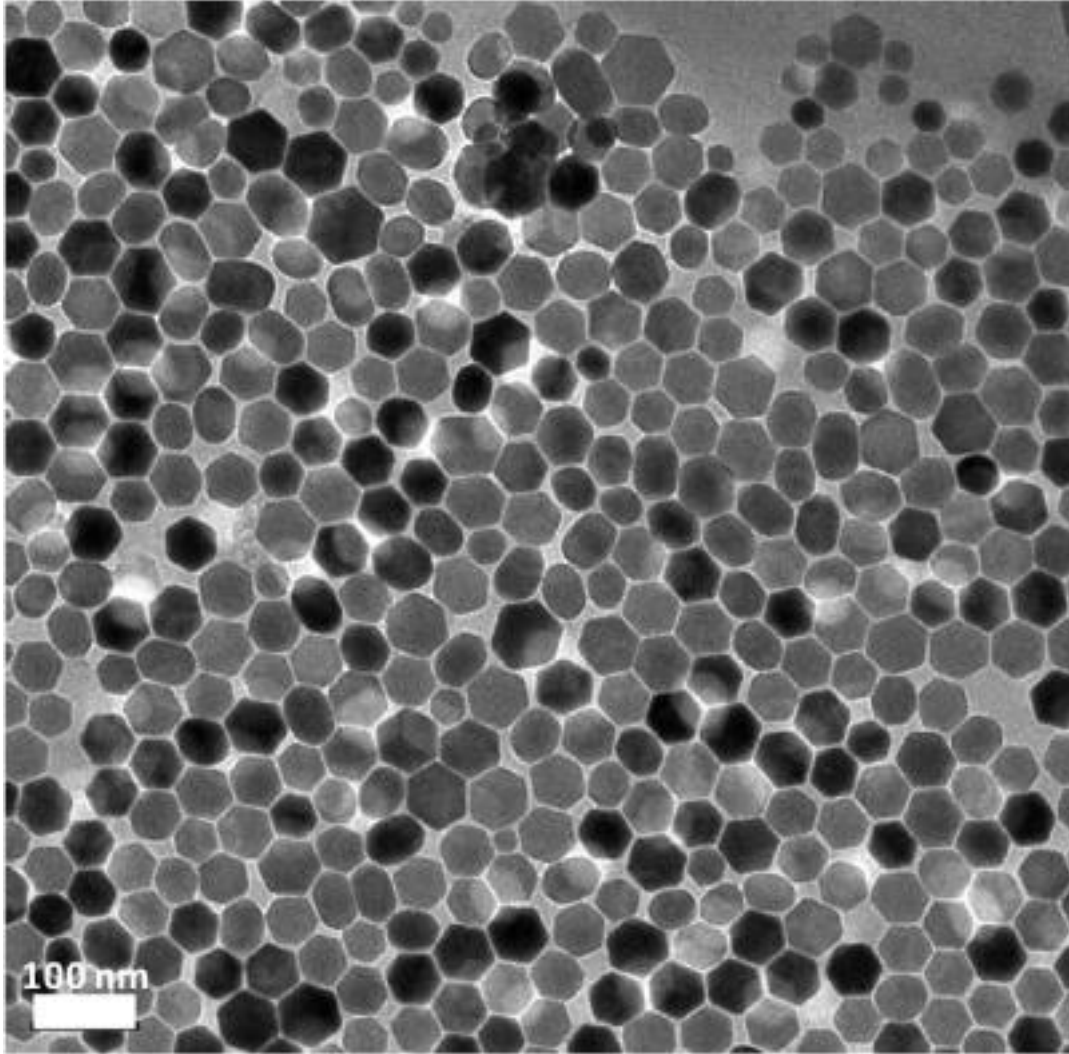
Σε πρώτη προσέγγιση, ο διαχωρισμός των εξιτονίων μπορεί να επιτευχθεί από το εσωτερικό πεδίο που δημιουργεί το διαφορετικό δυναμικό ιονισμού των δύο ηλεκτροδίων. Όμως, τα ελεύθερα φορτία που δημιουργούνται μπορούν να επανασυνδεθούν μετά από μετακίνηση τους κατά μερικές δεκάδες nm, απόσταση πολύ μικρότερη από τη διαδρομή που πρέπει να διανύσουν μέχρι τα ηλεκτρόδια. Για να ενισχυθεί ο διαχωρισμός των εξιτονίων αλλά και να ελαχιστοποιηθεί η επανασύνδεση των φορέων φορτίου, μπορεί να ενσωματωθεί μέσα στο πολυμερές ένα επιπλέον ανόργανο, αλλά και μερικές φορές οργανικό, υλικό το οποίο μπορεί να υποδέχεται και να μεταφέρει ηλεκτρόνια. Τα πολυμερή είναι χημικές ενώσεις, αποτελούμενες από ένα μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων ομοίων μορίων (μονομερή), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους διαμορφώνοντας μακρομοριακές αλυσίδες μεγάλου μοριακού βάρους (MB). [22]

Η ανάμειξη των δύο υλικών, του πολυμερούς που αποδίδει ηλεκτρόνια και του ανόργανου που τα υποδέχεται, προκαλεί την ανάπτυξη διεπιφανειών μεταξύ διαφορετικών υλικών (ετεροεπαφές), όπου αναπτύσσεται εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί διαχωρισμό των εξιτονίων. Στη συνέχεια, το πολυμερές δότης ηλεκτρονίων και ο δέκτης ηλεκτρονίων μεταφέρουν τα θετικά και τα αρνητικά φορτία αντίστοιχα στα ηλεκτρόδια. Μια πυκνή κατανομή των διεπιφανειών μέσα στο σύνθετο υλικό εγγυάται μία αποδοτική δημιουργία και μετακίνηση των φορέων φορτίου.



Σχ. 4.14 Παραγωγή ενέργειας στα οργανικά φωτοβολταϊκά

4.6 Νανοκρυσταλλικά Φ/Β (nc-Si)



Σχ. 4.15 Νανοκρύσταλλος

Τα νανοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα ή αλλιώς τα ηλιακά κύτταρα κβαντικών τελειών είναι κύτταρα βασισμένα σε νανοκρυστάλλους. Η τεχνολογία των νανοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες. Στο μέλλον τα φωτοβολταϊκά κβαντικών τελειών μπορούν να προσφέρουν διάφορα πλεονεκτήματα όπως ευκαμψία, χαμηλό κόστος, καθαρή πηγή ενέργειας και απόδοση έως και 65% [17].

Τα φωτοευαίσθητα ηλιακά κύτταρα (DSSC) είναι φωτοβολταϊκά βασισμένα σε νανοδιάστατο ημιαγωγό κύτταρα λεπτού φιλμ στα οποία ο ημιαγωγός βρίσκεται ανάμεσα

στον φωτοευαίσθητοποιητή και τον ηλεκτρολύτη και βασίζονται στο φωτοηλεκτροχημικό φαινόμενο. Αυτό το χαμηλό κόστους σύστημα αναπτύχθηκε το 1991 από τον Michael Gratzel και Brian O'Regan στην Πολυτεχνική Σχολή της Λωζάννης.[23]

4.7 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής - HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)



Σχ. 4.16 Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό κύτταρο

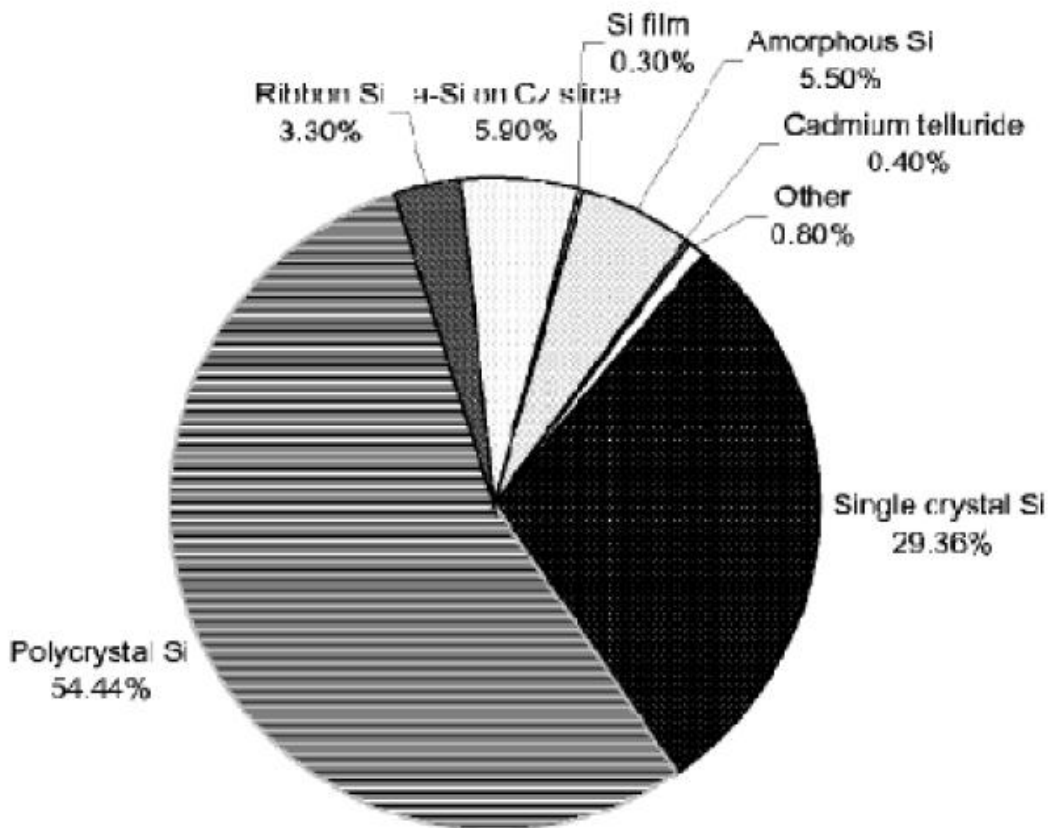
Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ετεροεπαφής αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2%. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα αποτελούν η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρουν τόσα πολλά, τα φωτοβολταϊκά αυτά είναι και κάπως ακριβότερα σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια και αυτό είναι και στον αντίποδα του μεγάλου πλεονεκτήματος της υψηλής απόδοσής τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Τα ηλιακά πλαίσια από μονοκρυσταλλικά υλικά έχουν τη δυναμική για υψηλή απόδοση και είναι ίσως πολύ σημαντικά για κατασκευή συστημάτων συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Τα ηλιακά κύτταρα πολυκρυσταλλικών φιλμ έχουν τη δυναμική από την πλευρά τους για χαμηλό κόστος, ενώ παράλληλα έχουν και μια απόδοση περίπου της τάξης του 10%. Όπως και να έχει, το κρυσταλλικό πυρίτιο που στο εμπόριο έχει τις μεγαλύτερες αποδόσεις δεν έχει μπορέσει να αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τις συμβατικές πηγές για την παραγωγή ενέργειας και μοιραία στρεφόμαστε σε έρευνες για νέα υλικά, ταυτόχρονα όμως αναζητούμε και τρόπους για να οδηγηθούμε και σε βελτίωση των υπαρχόντων, οπότε να εξελίξουμε και τις δύο μεγάλες κατηγορίες Thick Film και Thin Film όσο περισσότερο μπορούμε.

Η πρόοδος της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών Thin Film εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς. Η απόδοσή τους που είναι και το σημαντικότερο τους μειονέκτημα αυξάνεται συνεχώς και έχει φτάσει σε εργαστηριακό επίπεδο το 17,2% για το CIS, ενώ το άμορφο πυρίτιο έχει ξεπεράσει ήδη το 10%.

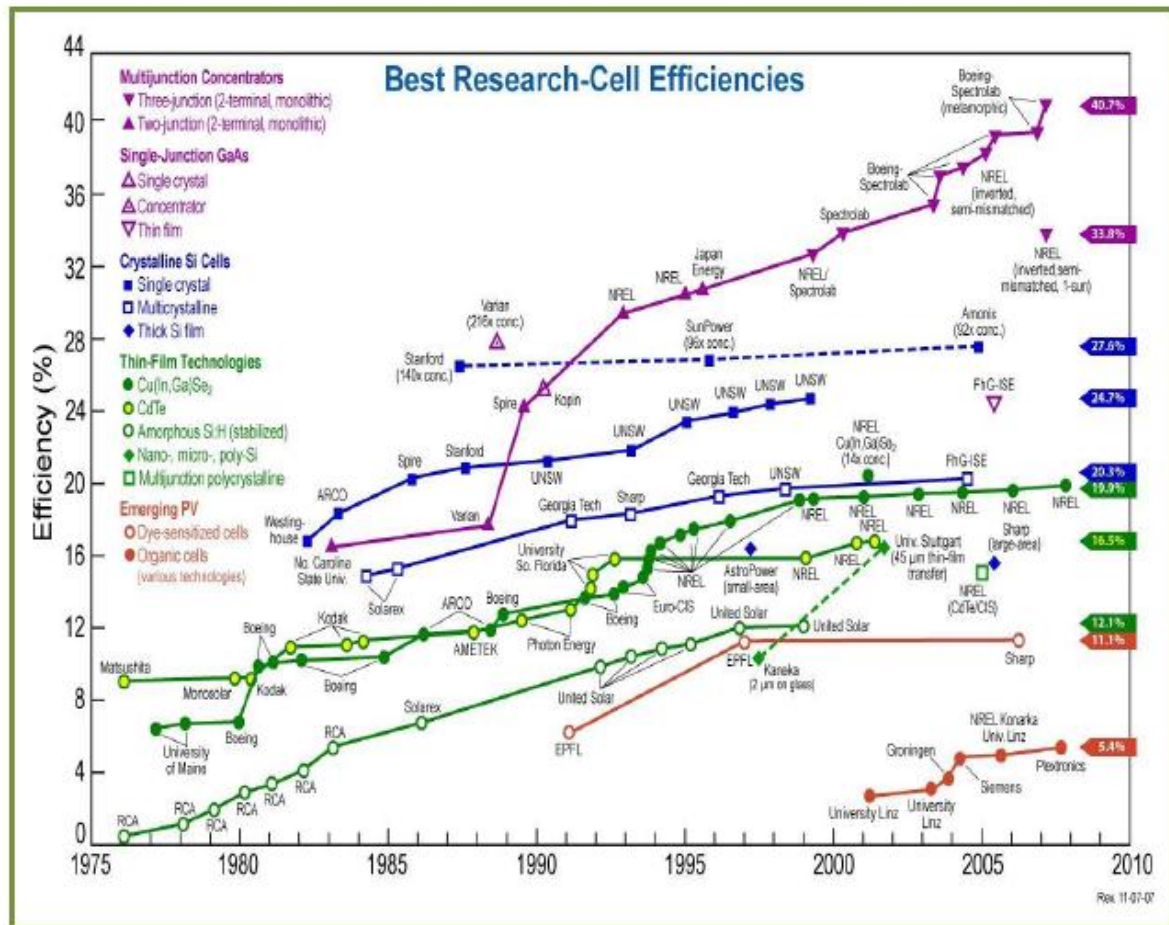
Το γεγονός αυτό καταγράφεται και παρατίθεται στο παρακάτω κυκλικό διάγραμμα, στον οποίο φαίνεται το μερίδιο αγοράς των διαφόρων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών κυψελών για το 2002,



Σχ. 5.1 Μερίδιο αγοράς των διαφόρων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών κυψελών για το 2002

[16]

, ενώ η εξέλιξη της απόδοσης των πλαισίων μέσω των νέων τεχνολογιών φαίνεται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα:



Σχήμα 5.2: Εξέλιξη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Πηγή : [<http://www.nrel.gov/>]

και το γεγονός αυτό μας δίνει μία εικόνα για την εξέλιξη ίσως της αγοράς στο μέλλον, καθώς και της στροφής των κατασκευαστών στις νέες τεχνολογίες, αν βέβαια συνεχίσει να εμφανίζει τη σημαντική αύξηση της απόδοσης στο πέρασμα του χρόνου. Βέβαια, η εδραιωμένη θέση που κατέχουν οι εγκαταστάσεις που είναι βασισμένες στις τεχνολογίες κατασκευής κρυσταλλικού πυριτίου θα είναι σημείο αναφοράς και γι 'αυτό, όπως και προαναφέρθηκε, σίγουρα θα υπάρξουν έρευνες, προσπάθειες κι εφαρμογές για τη βελτίωση και αυτών των τεχνολογιών κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στο σημείο αυτό, δεν πρέπει να ξεχνάμε το γεγονός πως, για να έχουμε μια ολοκληρωμένη μελέτη των ηλιακών κυττάρων με βάση την κάθε τεχνολογία κατασκευής, θα πρέπει να εξετάσουμε και στην πράξη τη συνολική λειτουργία τους, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως:


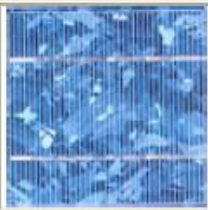


- Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.
- Η θερμοκρασία των ηλιακών κυττάρων.
- Η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων που μας οδηγεί σε απώλειες λόγω σκίασης.
- Η περίοδος που επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε τις μετρήσεις – συγκρίσεις μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών.
- Η γεωγραφική θέση στην οποία πραγματοποιούνται οι μελέτες, αφού ένας από τους πιο καθοριστικούς ρόλους είναι το γεωγραφικό πλάτος και οι συνολικές μέρες ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του έτους.

Μία συγκεντρωτική ματιά ως προς τα βασικά χαρακτηριστικά που κοιτάζουμε και απαιτούμε όταν καλούμαστε να επιλέξουμε την τεχνολογία που θα εμπιστευτούμε και θα εφαρμόσουμε – αγοράσουμε για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες ή τα σχέδια μας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δίνεται μέσω των εξής πινάκων:

Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών			
ΤΥΠΟΣ	'Λεπού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας	a-Si: 4,5-6,5% μ-Si: 8-9% CIS-CIGS: 6-12% CdTe: 6-11%	11-16%	11-19%
Επιφάνεια ανά kWp	9-25 m ²	7-9 m ²	5,5-9 m ²

Σχήμα 5.3: Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]

Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών				
ΤΥΠΟΣ	'Λεπού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά	'Υβριδικά'
Εμφάνιση				
Απόδοση	Άμορφα: 5-7% CIS: 7-10% CdTe: 8-10%	11-14%	13-16%	16-18%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	10-20 m ²	8-10 m ²	7-8 m ²	6-7 m ²
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	1.300-1.400	1.300	1.300	1.350
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m ²) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	65-140	130-160	160-185	190-225
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kg CO ₂ ανά kWp)	1.380-1.485	1.380	1.380	1.435

Σχήμα 5.4: Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]

Τέλος, είναι αξιοσημείωτα δύο στοιχεία:

1. Η χρήση και χρησιμότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων ως δομικά υλικά που παρέχουν τη δυνατότητα για νέους και καινοτόμους αρχιτεκτονικούς σχεδιασμούς, που παράλληλα όμως προσφέρουν, εκτός από μέγεθος, σχήμα, χρώμα, τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, οπότε και σχεδιάζεται ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, το σύστημα εκείνο το οποίο, την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει, την αποθηκεύει σε συσσωρευτές, χωρίς απαραίτητα να συνδέεται με το δίκτυο (ΔΕΗ), οπότε με τον τρόπο αυτό παρέχει ενεργειακή αυτονομία. Επίσης, σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, περιλαμβάνονται ο ελεγκτής φόρτισης, ο οποίος ελέγχει τους κύκλους φόρτισης κι εκφόρτισης των συσσωρευτών (μπαταριών) ανάλογα με τη ζήτηση από τον καταναλωτή και τις συνθήκες ηλιοφάνειας, καθώς κι έναν αντιστροφέα (inverter) ο οποίος μετατρέπει την τάση από συνεχή (DC) σε. Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να είναι και υβριδικά. Αυτό συμβαίνει όταν συνεργάζονται και με άλλες πηγές ενέργειας όπως μια ανεμογεννήτρια ή ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Στον αισθητικό τομέα πάντως, λόγω χρωμάτων, πλαστικότητας κι ευκαμψίας προτιμώνται τα πλαίσια τύπου Thin Films.



Σχήμα 5.5: (α) ηλιακό στέγαστρο σε κτίριο

(β) inverter

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]



Σχήμα 5.6: Αυτόνομο σύστημα

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]

2. Η δυνατότητα ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, και βέβαια εδώ πρέπει να τονίσουμε το γεγονός ότι υπερτερούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία της κατηγορίας Thin Films, λόγω του ότι, σε ποσοστό μεγαλύτερο της τάξης του 90%, των υλικών που αποτελούν το Thin Film, είναι γυαλί και μέταλλο, οπότε η συγκεκριμένη τεχνολογία καθίσταται απολύτως φιλική προς το περιβάλλον. Ειδικότερα στην

περίπτωση των φωτοβολταϊκών τύπου CdTe, η υποχρέωση ανακύκλωσης αποτελεί ήδη πάγια πρακτική. Με την προμήθεια των πλαισίων αυτών, ο τελικός χρήστης δεσμεύεται με συμβόλαιο να παραδώσει τα φωτοβολταϊκά στην κατασκευάστρια εταιρία μετά τον ωφέλιμο χρόνο ζωής τους, η δε κατασκευάστρια εταιρία δεσμεύεται να τα ανακυκλώσει και να ανακτήσει το CdTe. Στην αρχική τιμή των πλαισίων αυτών περιλαμβάνεται και το κόστος συλλογής και ανακύκλωσης, έστω κι αν κάτι τέτοιο θα συμβεί μετά από 20-30 χρόνια. Έχει δημιουργηθεί μάλιστα και ειδικό ασφαλιστικό ταμείο το οποίο διασφαλίζει τη συλλογή και ανακύκλωση των πλαισίων ακόμη κι αν εν τω μεταξύ εκλείψουν οι κατασκευάστριες εταιρίες. [17]

Τα φωτοβολταϊκά συνεπάγονται σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον και την κοινωνία. Οφέλη για τον καταναλωτή, για τις αγορές ενέργειας και για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Τα φωτοβολταϊκά είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες της νέας εποχής που ανατέλλει στο χώρο της ενέργειας. Μιας νέας εποχής που θα χαρακτηρίζεται ολοένα και περισσότερο από τις μικρές αποκεντρωμένες εφαρμογές σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς. Τα μικρά, ευέλικτα συστήματα που μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο κατοικίας, εμπορικού κτιρίου ή μικρού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (όπως π.χ. τα φωτοβολταϊκά, τα μικρά συστήματα συμπαραγωγής, οι μικροτουρμπίνες και οι κυψέλες καυσίμου) αναμένεται να κατακτήσουν ένα σημαντικό μερίδιο της ενεργειακής αγοράς στα χρόνια που έρχονται. Ένα επιπλέον κοινό αυτών των νέων τεχνολογιών είναι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον. Η ηλιακή ενέργεια είναι καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί ένα ανεξάντλητο εγγώριο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία.

Τα φωτοβολταϊκά, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα, θεωρούνται τα ιδανικά συστήματα ενεργειακής μετατροπής καθώς

[α] χρησιμοποιούν την πλέον διαθέσιμη πηγή ενέργειας στον πλανήτη,

[β] δεν έχουν κινούμενα μέρη, και

[γ] παράγουν ηλεκτρισμό, που αποτελεί την πιο χρήσιμη μορφή ενέργειας.

Τα φωτοβολταϊκά παρέχουν τον απόλυτο έλεγχο στον καταναλωτή και άμεση πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια. Τον καθιστούν έτσι πιο προσεκτικό στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργεια και συμβάλλουν μ' αυτό τον τρόπο στην ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση της ενέργειας. Δεδομένου ότι η παραγωγή και κατανάλωση του ηλιακού ηλεκτρισμού γίνονται τοπικά, αποφεύγονται οι σημαντικές απώλειες της μεταφοράς και διανομής του ηλεκτρισμού και κατ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 10% σε σχέση με τη συμβατική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του δικτύου. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν αθόρυβη λειτουργία, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής, δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες, δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας (στο δίκτυο ή σε συσσωρευτές) και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση. Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών είναι αδιαμφισβήτητα. Κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από φωτοβολταϊκά, και άρα όχι από συμβατικά καύσιμα, συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης 1,1 κιλών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (με βάση το σημερινό ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα και τις μέσες απώλειες του δικτύου). Ένα τυπικό

φωτοβολταϊκό σύστημα του ενός κιλοβάτ, αποτρέπει κάθε χρόνο την έκλυση 1,3-1,4 τόνων διοξειδίου του άνθρακα, όσο δηλαδή θα απορροφούσαν δύο στρέμματα δάσους. Επιπλέον, συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές άλλων επικίνδυνων ρύπων (όπως τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, οι ενώσεις του θείου, κλπ). Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα πυροδοτούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και αλλάζουν το κλίμα της Γης, ενώ η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει την ποσότητα των ρύπων (σε γραμμάρια) η έκλυση των οποίων αποφεύγεται για κάθε ηλιακή κιλοβατώρα που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.[8]

Υποκατάσταση	Αποφυγή εκλυόμενων ρύπων (σε gr) ανά ηλιακή κιλοβατώρα (λαμβάνοντας υπ' όψη και τις απώλειες του δικτύου)			
	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM ₁₀
Λιγνίτη	1.482	1-1,8	1,17-1,23	1,1
Πετρελαίου (χαμηλού θείου)	830	3,5	1,5	0,34
Φυσικού αερίου	475	0,017	0,6	-
Μέσου ενεργειακού μείγματος χώρας	1.062	CO ₂ : διοξείδιο του άνθρακα, SO ₂ : διοξείδιο του θείου NO _x : οξείδια του αζώτου, PM ₁₀ : μικροσωματίδια		

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΦΕΛΗ



1=10

Ένα μέσο φωτοβολταϊκό πλαίσιο ισοδυναμεί με 10 δέντρα

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΦΕΛΗ

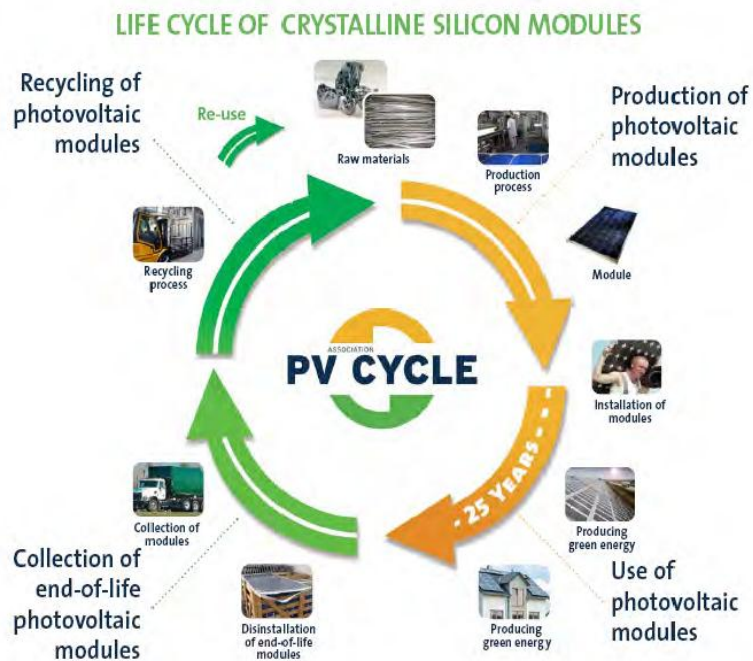


1=200

Ένα τετραγωνικό μέτρο φωτοβολταϊκού
ισοδυναμεί με 200 τετραγωνικά μέτρα δάσους

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]

Σημαντικός είναι επίσης και ο κύκλος ζωής των φωτοβολταϊκών. Από το παρακάτω σχήμα είναι προφανές το ότι, εκτός από τον καταναλωτή, «κερδίζει» και το περιβάλλον από την χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων

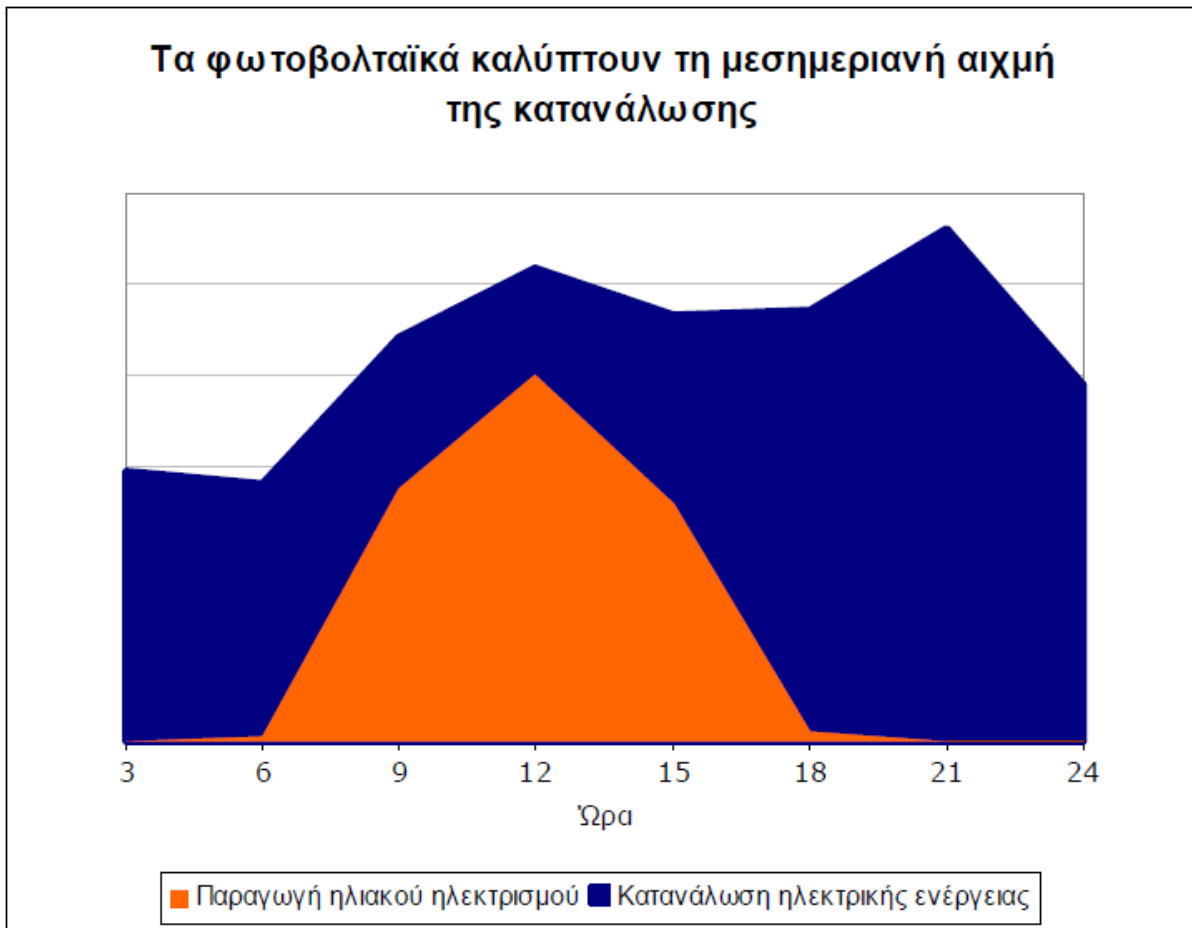


Σχήμα 5.9: Κύκλος ζωής πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]

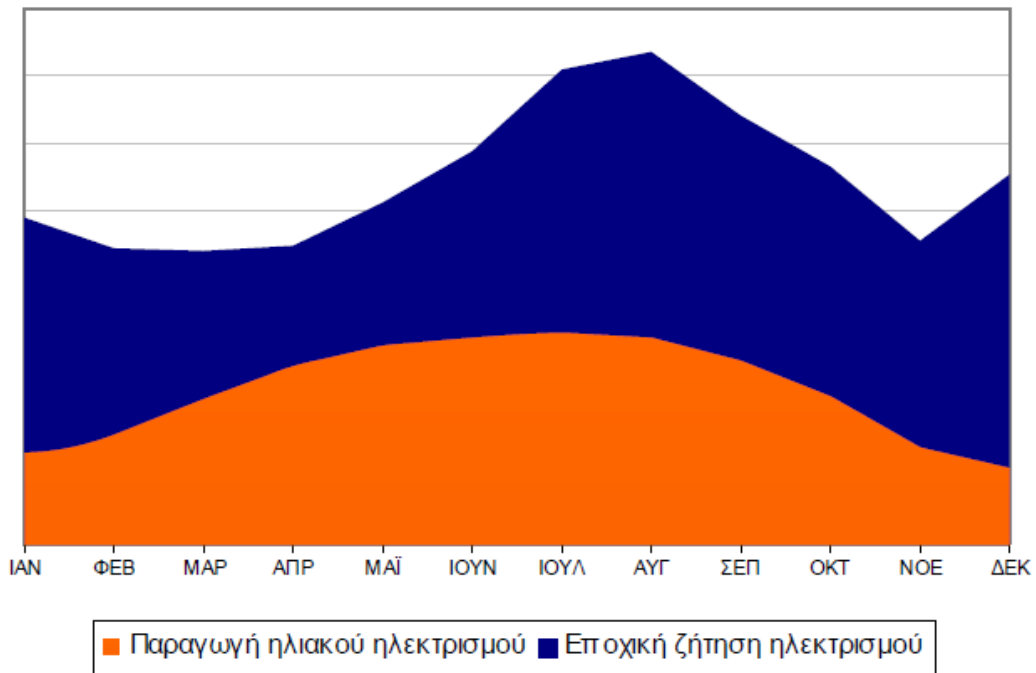
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τέλος, παρατίθενται ορισμένα διαγράμματα που μας βοηθούν σχηματικά να κατανοήσουμε την κάλυψη σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό των ενεργειακών αναγκών, γεγονός που αποτελεί ελπίδα για το μέλλον μιας «πράσινης» και ταυτόχρονα επαρκούς λύσης στις ενεργειακές απαιτήσεις που διαρκώς αυξάνονται κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επίσης, παρατίθενται ένα διάγραμμα που αφορά τον ελλαδικό χώρο και μας δείχνει την ετήσια παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα κρυσταλλικού πυριτίου στη βέλτιστη κλίση, απεικονίζοντας έτσι πόσο παράγουμε και παράλληλα πόσο μπορούμε να βασιστούμε στην παραγωγή αυτή και να βρούμε τρόπους να την εξελίξουμε προς όφελος των καταναλωτών. Τελευταία παρατίθενται παραδείγματα εφαρμογών των φωτοβολταϊκών σε διάφορες περιπτώσεις.



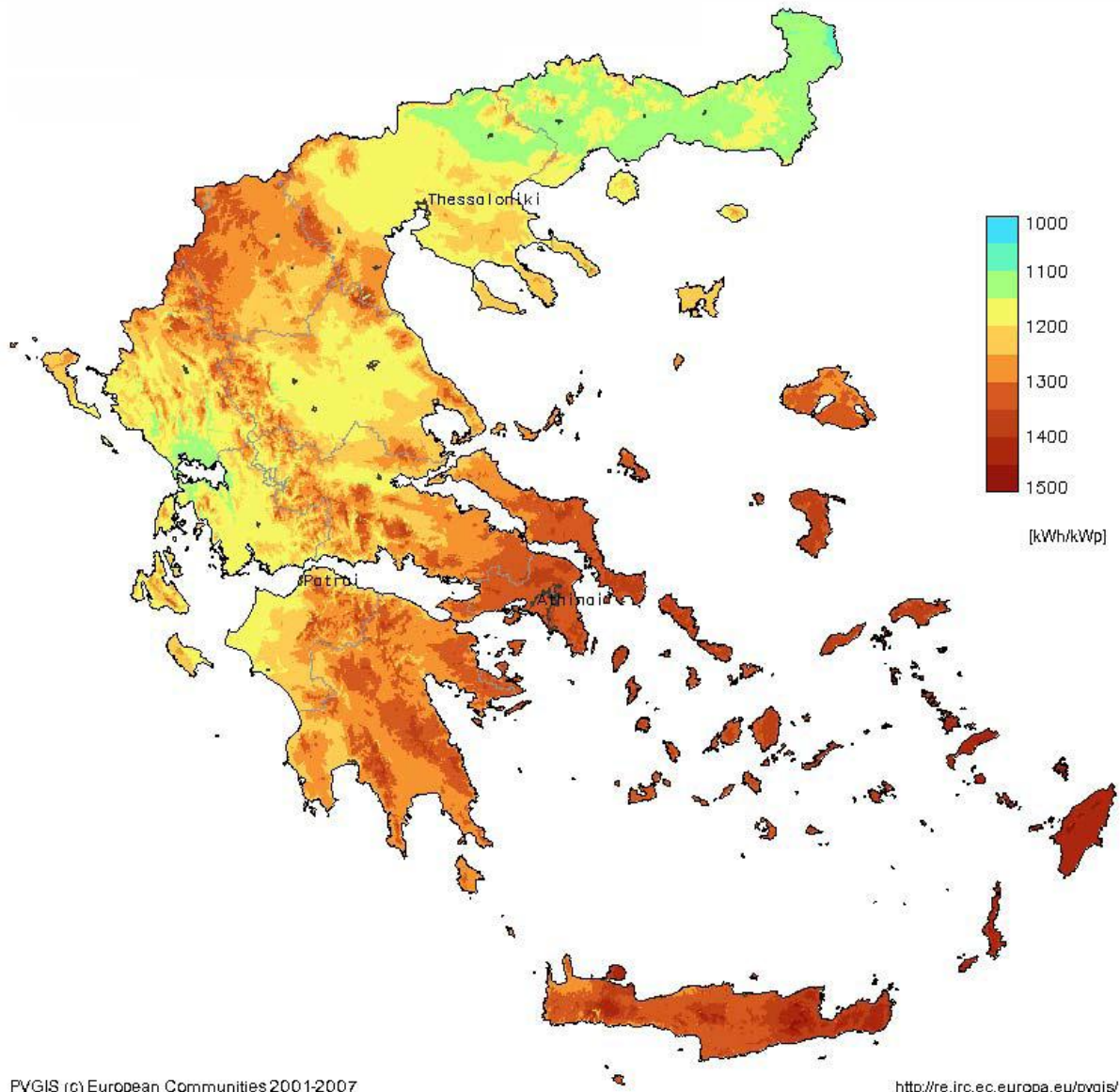
Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]

Η παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού ακολουθεί την εποχική ζήτηση



Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]

**Ετήσια παραγωγή ενέργειας (κιλοβατώρες ανά κιλοβάτ)
από φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου στη βέλτιστη κλίση**



Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]



Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε στέγες κτιρίων

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]



Εφαρμογές φωτοβολταϊκών σε ταράτσες κτιρίων

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]



Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε βιομηχανική στέγη

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]



Εφαρμογή φωτοβολταϊκών σε αγροτική αποθήκη

Πηγή : [[http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Φ/Β συστήματα, Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, Εκδόσεις Ζήτη, 2004
- [2] Θωμάς Ζαχαρίας, «ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙ», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007
- [3] Gevorkian P.[2008], Solar power in building design, United States: McGraw-Hill
- [4] Καγκαράκης Κ. [1992], Φωτοβολταϊκή τεχνολογία, Αθήνα: ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ
- [5] S.M. Sze, Semiconductor Devices Physics and Technology, John Wiley & Sons 1985.
- [6] <http://ecee.colorado.edu/~ecen2060/PV.html>
- [7] Model of Photovoltaic Module in Matlab™, 2DO CONGRESO BEROAMERICANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN (II CIBELEC 2005) , F.M.Gonzalez-Longatt
- [8] [http:// www.helapco.gr](http://www.helapco.gr)
- [9] T. Makvart, L. Castaner. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications
- [10] <http://www.ypan.gr>
- [11] Ι.Ε. Φραγκιαδάκη, Φωτοβολταϊκά συστήματα 2^η έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, 2006
- [12] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Antonio Luque and Steven Hegedus
- [13] Περράκη Βασιλική, «ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ», Πάτρα 2008
- [14] Συνδυασμένη χρήση ηλιακής και αιολικής ενέργειας για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών κτηρίων. Διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης Μακρής Θ. Πάτρα 2009
- [15] <http://www.energotechniki.gr/site/xpage.asp?sid=211&page=banner2>
- [16] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Antonio Luque and Steven Hegedus
- [17] http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php,
- [18] The German Energy Society, “Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers”, 2nd ed., Earthscan, London, 2008, pp. 23-51.
- [19] Μ. Γαργανουράκης, «Ανάπτυξη Προηγμένων Transparent Conductive Oxides (TCOs) και Μελέτη των Διεπιφανειών τους με Οργανικούς Ημιαγωγούς και Εύκαμπτα Υποστρώματα,» Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2008.
- [20] S. Berkley, The Fabrication and Characterization of Organic Solar Cells, 2009.

[21] Γ. Βισκαδούρος, «Ανάπτυξη Καινοτόμων Οπτοηλεκτρονικών Διατάξεων Πολυμερούς-Νανοδομών για Εφαρμογές σε Οργανικά Φωτοβολταϊκά και Εκπομπή Πεδίου,» Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2011.

[22] Ν. Παλιάτσας, «Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών,» Πάτρα, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.

[23] Σύνθεση και μελέτη υβριδικών φωτοβολταϊκών κυττάρων: Νέα πρόκληση για το περιβάλλον και τα κτήρια. Πάτρα, 2010, Μεταπτυχιακή εργασία ειδίκευσης. Μ. Τρυπαναγνωστοπούλου.