

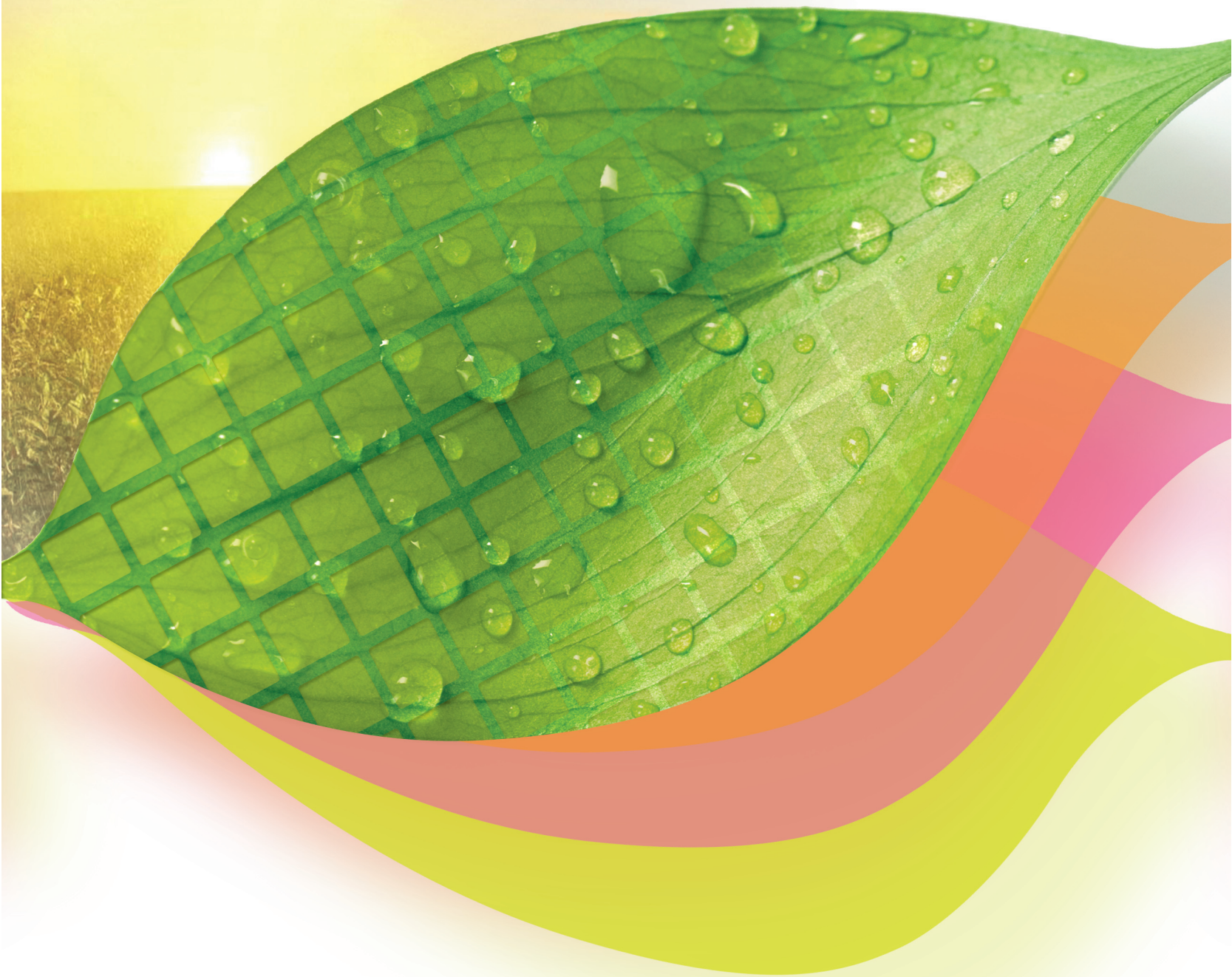


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ

ΠΕΛΕΚΗ ΜΑΡΙΑ-ΔΑΝΑΗ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κο Μανωλάκο Δημήτριο για την ανάθεση της εργασίας, την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση που μου έδωσε.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κο Άγγελο Μαρκόπουλο για τη συνεργασία, την υποστήριξη και την βοήθεια του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, της οποίας μέλος είναι και η Ελλάδα, έχει θέσει ως στόχο της για το 2020 το 20% της κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί ανεξάντλητη πηγή ενέργειας για τη Γη και μέσω διαφόρων μεθόδων μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας. Ένας τρόπος αξιοποίησης της ενέργειας αυτής είναι μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση μιας νέας κατηγορίας φωτοβολταϊκών συστημάτων που ονομάζονται οργανικά φωτοβολταϊκά. Στην κατηγορία αυτή, το πυρίτιο, που είναι ο δημοφιλέστερος και ευρύτερα χρησιμοποιούμενος ημιαγωγός, αντικαθίσταται από υλικά που περιέχουν άνθρακα και για το λόγο αυτό ονομάζονται οργανικά.

Αξίζει να διευκρινιστεί πως τα οργανικά φωτοβολταϊκά αποτελούν ένα τμήμα του ευρύτερου τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων και για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε σωστό να γίνει μια εκτενέστερη παρουσίαση των φωτοβολταϊκών.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι πρωτογενείς πηγές ενέργειας με αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ακολουθεί αναδρομή στην ιστορία των φωτοβολταϊκών και γίνεται αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία και τον Ήλιο, που αποτελεί την μοναδική πηγή ενέργειας για την λειτουργία τους. Στη συνέχεια, γίνεται εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά συστήματα και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης αυτών. Σε επόμενο κεφάλαιο αναλύεται η δομή των ηλιακών κυττάρων και γίνεται επεξήγηση των ημιαγωγών, της δίοδου p-n, του τρόπου κατασκευής τους, των μεθόδων προσμίξεων και του τρόπου λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αναφέρονται τα είδη των φωτοβολταϊκών: κρυσταλλικά στοιχεία, thin film, πολλαπλών στρωμάτων, οργανικά και νανοκρυσταλλικά. Το σημαντικότερο τμήμα της εργασίας είναι αυτό που περιγράφει τα οργανικά φωτοβολταϊκά, την αρχή λειτουργίας τους, τις κατηγορίες που υπάρχουν, την δομή, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθώς και ορισμένες δυνατότητες για βελτίωση. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές και παραδείγματα.

Λέξεις κλειδιά: οργανικά φωτοβολταϊκά, μέθοδοι προσμίξεων, δίοδος p-n

ABSTRACT

The European Union, whose member is Greece, has set as a target until 2020 the 20% of energy consumption to become from renewable sources. The sun is an inexhaustible source of energy on Earth and can be used through various methods, for energy production. One way of harnessing this energy is through photovoltaic systems.

The purpose of this project is to present a relatively new class of photovoltaic systems called organic photovoltaics (OPV). In this category the silicon which is the most popular and widely used semiconductor is replaced by carbon-containing material and for this reason is called organic.

It is worth clarifying that organic photovoltaics are a part of the larger field of photovoltaic systems and for this reason it is considered appropriate to make a more extensive presentation of photovoltaics.

Initially, there are presented the primary sources with reference to renewable energy sources. Then follows the history of photovoltaics and reference to the sun energy and the sun, which is the only source of power for their operation. Subsequently, there is an introduction to photovoltaic systems and the advantages and disadvantages of their use. The next chapter is analyzing the structure of solar cells and the following are being explained: the semiconductors, p-n diode, method of manufacture, methods of impurities and the operation of a photovoltaic cell. Indicating the types of PV: crystalline, thin film, multilayer, organic and nanocrystalline. The most important part of this project is the one that describes the organic photovoltaics, their operating principles, the categories that exist, their structure, advantages and disadvantages and also some opportunities for improvement. Finally some applications and examples are presented in conclusion of subject project.

Key words: organic photovoltaic, impurity, diode p-n

Πίνακας περιεχομένων

1.Εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια.....	11
1.1 Εισαγωγή στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας.....	11
1.2 Πρωτογενείς πηγές ενέργειας.....	12
1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	14
2.Ηλιακή Ακτινοβολία.....	18
2.1 Εισαγωγή.....	18
2.2 Ο Ήλιος.....	23
3.Ιστορική Αναδρομή.....	25
4.Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	27
4.1 Εισαγωγή.....	27
4.2 Πλεονεκτήματα.....	29
4.3 Μειονεκτήματα.....	30
4.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα.....	30
4.5 Φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	35
5.Δομή Ηλιακών Κυττάρων.....	37
5.1 Ημιαγωγοί.....	37
5.2 Ημιαγωγοί προσμίξεων.....	42
5.3 Δίοδος p-n.....	43
5.4 Κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	47
5.5 Μέθοδοι προσμίξεων.....	49
5.6 Τρόπος λειτουργίας ΦΒ.....	52
6.Είδη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.....	56
6.1 Κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	56
6.1.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	56
6.1.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	57
6.1.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας (ribbon silicon).....	59
6.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων (thin film).....	60

6.2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (amorphous or thin film silicon).....	60
6.2.2 Μέθοδοι ανάπτυξης οργανικών και ανόργανων λεπτών υμενίων.....	61
6.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων.....	67
6.3.1 Δισεληνοϊδούχος Χαλκός (CuInSe ₂ ή CIS).....	68
6.3.2 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe).....	68
6.3.3 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs).....	68
6.4 Οργανικά φωτοβολταϊκά.....	68
6.5 Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά.....	69
7.Οργανικά Φωτοβολταϊκά.....	70
7.1 Εισαγωγή.....	70
7.2 Αρχή λειτουργίας.....	72
7.2.1 Η έννοια των εξιτονίων.....	72
7.2.2 Συζυγή πολυμερή (Conjugated Polymers).....	73
7.2.3 Ηλεκτρονικές ιδιότητες των συζυγών πολυμερών.....	75
7.3 Κατηγορίες οργανικών φωτοβολταϊκών.....	76
7.3.1 Μονοστρωματικές διατάξεις (Single Layer).....	76
7.3.2 Διστρωματικές διατάξεις.....	77
7.3.3 Διατάξεις διεσπαρμένης ετεροεπαφής.....	79
7.4 Τυπική δομή.....	80
7.5 Πλεονεκτήματα.....	81
7.6 Μειονεκτήματα.....	82
7.7 Βελτιώσεις.....	82
8.Εφαρμογές Φωτοβολταϊκών.....	84
8.1 Αναφορικά.....	84
8.1.1 Καταναλωτικά προϊόντα (0,001Wp-100Wp).....	84
8.1.2 Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100Wp-200KWp).....	84
8.1.3 Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο (200KWp έως αρκετά MWp).....	85

8.2 Παραδείγματα.....	86
8.3 Εφαρμογές.....	88
8.4 Εφαρμογές οργανικών φωτοβολταϊκών.....	89
8.5 Οικονομικά συμπεράσματα.....	90
8.6 Υβριδικά συστήματα.....	90
9.Βιβλιογραφία.....	92

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1.3.1: Μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	14
Σχήμα 1.3.2: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει του χρόνου και του είδους του καυσίμου.....	15
Σχήμα 1.3.3: Κατανομή της παγκόσμιας κατανάλωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το έτος 2008.....	16
Σχήμα 2.1.1: Χάρτης κατανομής ηλιοφάνειας στην Ευρώπη.....	18
Σχήμα 2.1.2: Η σχέση ανάμεσα στην ενέργεια, το χρώμα και το μήκος κύματος.....	19
Σχήμα 2.1.3: Φασματική εκπομπή ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες.....	20
Σχήμα 2.1.4: Σύγκριση φάσματος ακτινοβολίας AM0, AM1,5 και μέλανος σώματος θερμοκρασίας T=6000K.....	21
Σχήμα 2.1.5: Εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα και οι παράγοντες που την επηρεάζουν.....	22
Σχήμα 2.2.1: Σχηματικό διάγραμμα της δομής του Ήλιου.....	24
Σχήμα 4.1: Φωτοβολταϊκό πάνελ.....	27
Σχήμα 4.4.1: Διαμόρφωση ηλιακών πάνελ.....	30
Σχήμα 4.4.2: Η δομή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	31
Σχήμα 4.4.3: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με φορτίο.....	34
Σχήμα 4.4.4: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με σκιασμένο κύτταρο.....	34
Σχήμα 4.4.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες.....	35
Σχήμα 5.1.1: Σχηματική παράσταση μονωτών, ημιαγωγών, μεταλλικών αγωγών.....	37
Σχήμα 5.1.2: Στοιχειώδεις ημιαγωγοί και ενώσεις ημιαγωγών.....	38
Σχήμα 5.1.3: Απλοποιημένη απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου σε δυο διαστάσεις....	38
Σχήμα 5.1.4: Μηχανισμός ανάπτυξης ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών σε ημιαγωγό.....	40
Σχήμα 5.1.5: Αναπαράσταση των ενεργειακών ζωνών και του ενεργειακού διακένου.....	40
Σχήμα 5.1.6: Ενεργειακό διάκενο διαφόρων ημιαγωγών σε θερμοκρασία T=300K.....	41
Σχήμα 5.1.7: α) Υλικό με άμεσο ενεργειακό διάκενο, β) υλικό με έμμεσο ενεργειακό διάκενο.....	41

Σχήμα 5.2.1: Κρυσταλλικό πλέγμα νοθευμένων ημιαγωγών με α) πεντασθενές As και β) τρισθενές B.....	43
Σχήμα 5.3.1: Δίοδος p-n.....	43
Σχήμα 5.3.2: Διατομή του ηλιακού κυττάρου ενός φωτοβολταϊκού.....	44
Σχήμα 5.3.3: Συγκεντρώσεις των φορέων και διάχυση.....	44
Σχήμα 5.3.4: Φορτίο στη ζώνη εξάντλησης. Χρωματισμένη είναι η θεωρητική πυκνότητα του φορτίου και με διακεκομμένη γραμμή η πραγματική.....	44
Σχήμα 5.3.5: Ορθή πόλωση διόδου p-n.....	45
Σχήμα 5.3.6: Ανάστροφη πόλωση διόδου p-n.....	45
Σχήμα 5.3.7: Χαρακτηριστική I-V διόδου.....	46
Σχήμα 5.4.1: Υλικά/ επιστρώσεις φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	47
Σχήμα 5.5.1: Μέθοδος Czochralski.....	49
Σχήμα 5.5.2: Μέθοδος Floating Zone.....	50
Σχήμα 5.6.1: Απορρόφηση φωτονίων στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	52
Σχήμα 5.6.2: Ανάκλαση και απορρόφηση ακτινοβολίας. Α,Ε: Ανάκλαση στους μεταλλικούς ακροδέκτες. Β:Ανάκλαση στον μεταλλικό ακροδέκτη και μετέπειτα απορρόφηση της ακτινοβολίας. Γ:Ανάκλαση στην επιφάνεια τύπου n. Δ:Απευθείας απορρόφηση της ακτινοβολίας. ΣΤ: Απορρόφηση ακτινοβολίας στον ακροδέκτη.....	53
Σχήμα 5.6.3: Ο συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει του μήκους κύματος, για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φωτοβολταϊκών διατάξεων.....	54
Σχήμα 6.1: Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	56
Σχήμα 6.1.1.1: Δομή μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	57
Σχήμα 6.1.1.2: Ράβδος καθαρού μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	57
Σχήμα 6.1.1.3: Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου.....	57
Σχήμα 6.1.2.1: Δομή πολυκρυσταλλικού πυριτίου και οι ατέλειες.....	58
Σχήμα 6.1.2.2: Μπάρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	58
Σχήμα 6.1.2.3: Πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου.....	59
Σχήμα 6.2.1: Φωτοβολταϊκό στοιχείο thin film.....	60
Σχήμα 6.2.1.1: Σύγκριση κρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου με στοιχείο thin film.....	61

Σχήμα 6.2.2.1: Sputtering.....	62
Σχήμα 6.2.2.2: Τα σχήματα απεικονίζουν: (α) την κυματομορφή εξόδου του παλμικού συνεχούς ρεύματος, (b) την περίοδο εναπόθεσης φιλμ κατά την είσοδο του πλάσματος και (c) την περίοδο καθαρισμού της επιφάνειας του στόχου κατά την έξοδο του πλάσματος....	63
Σχήμα 6.2.2.3: Συνάρτηση arc-χρόνου για διαφορετικούς χρόνους διάρκειας του κύκλου...	64
Σχήμα 6.2.2.4: RF Sputtering.....	64
Σχήμα 6.2.2.5: Magnetron Sputtering.....	65
Σχήμα 6.2.2.6: Διαδικασία εναπόθεσης με Spin Coating (α) εναπόθεση διαλύματος και περιστροφή (β) εναποτιθέμενο υμένιο.....	65
Σχήμα 6.2.2.7: Doctor Blending.....	66
Σχήμα 6.2.2.8: Thermal Evaporation.....	67
Σχήμα 6.4.1: Οργανικό φωτοβολταϊκό.....	68
Σχήμα 7.2.1: Παραγωγή ενέργειας στα οργανικά φωτοβολταϊκά.....	72
Σχήμα 7.2.2.1: Παραδείγματα αγώγιμων οργανικών πολυμερών.....	74
Σχήμα 7.2.2.2: Απλή μοριακή τροχιακή αντιπροσώπευση με δεσμούς τύπου σ και π.....	75
Σχήμα 7.3.1: Μονοστρωματικές, πολυστρωματικές διατάξεις.....	76
Σχήμα 7.3.1.1: Ενεργειακό διάγραμμα μονοστρωματικής διάταξης.....	77
Σχήμα 7.3.2.1: Bi-layer δομή οργανικού φωτοβολταϊκού.....	78
Σχήμα 7.3.2.2: Ενεργειακό διάγραμμα διστρωματικής διάταξης.....	79
Σχήμα 7.3.3.1: Δομή bulk heterojunction.....	80
Σχήμα 7.4.1: Τυπική δομή OPV.....	80
Σχήμα 8.1.1.1: Φακός που φορτίζεται με ηλιακή ενέργεια.....	84
Σχήμα 8.1.3.1: Φωτοβολταϊκό πάνελ τοποθετημένο σε στέγη.....	85
Σχήμα 8.4.1: Αποδοτικότητα όλων των ειδών των φωτοβολταϊκών στοιχείων κατά το πέρασμα του χρόνου (χρονική περίοδος 1975-2011).....	90

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Εισαγωγή στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας

Κάθε αλλαγή που λαμβάνει χώρα στο σύμπαν συνοδεύεται από μία αλλαγή σε μια ποσότητα που την αποκαλούμε ενέργεια. Δεν ξέρουμε τι είναι ακριβώς ενέργεια, χρησιμοποιούμε αυτόν τον όρο για να περιγράψουμε την ικανότητα ενός φυσικού ή βιολογικού συστήματος για μετακίνηση ή αλλαγή. Η ενέργεια παρουσιάζεται σε πολλές μορφές, όπως ηλεκτρική ενέργεια, χημική ενέργεια, ή μηχανική ενέργεια, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνειδητοποιήσουμε πολλές μορφές αλλαγής, όπως η κίνηση, η θέρμανση ή η χημική μεταβολή. Οποιαδήποτε δραστηριότητα, ακόμα και η ανθρώπινη απαιτεί ενέργεια. Τα ανθρώπινα όντα χρειάζονται την ενέργεια ώστε να κινηθούν, να μαγειρέψουν, να θερμάνουν και να φωτίσουν τα σπίτια τους, ή ακόμα και να οδηγήσουν οχήματα. Ο άνθρωπος είναι ένας άπληστος καταναλωτής ενέργειας. Ένας δραστήριος νεαρός άνδρας χρειάζεται περίπου 2500 kcal (2,9 kWh) ανά ημέρα για να εκπληρώσει τις καθημερινές του ενεργειακές απαιτήσεις. Αυτό σημαίνει ότι η ετήσια ενέργεια που χρειάζεται είναι περίπου 1060 kWh. Η παρούσα παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας είναι περίπου 19 000 kWh ανά κάτοικο και ανά έτος. Αυτό σημαίνει ότι κατά μέσο όρο ένας άνθρωπος καταναλώνει περίπου 19 φορές περισσότερη ενέργεια από ό, τι χρειάζεται για την επιβίωσή του και την ικανοποιητική υγεία του.

Η ανθρωπότητα έχει δει μια τεράστια αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια των τελευταίων 100 χρόνων. Ενώ το 1890 η κατανάλωση ενέργειας ανά κάτοικο και ανά έτος ήταν γύρω στις 5800 kWh, έφτασε 20200 kWh το 1970. Από το 1970 η κατανάλωση ενέργειας έχει μειωθεί στο σημερινό επίπεδο των 19000 kWh ανά κάτοικο και ανά έτος. Η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας τον 20ο αιώνα μπορεί να σχετίζεται με την εξελικτική διαδικασία που είχε ξεκινήσει περίπου πέντε αιώνες πριν.

Το ισχυρό κίνητρο αυτής της διαδικασίας σημειώθηκε κατά τη διάρκεια της περιόδου του Διαφωτισμού του 18ου αιώνα ως η φιλοσοφία της ανθρώπινης προόδου. Ο στόχος της διαδικασίας ήταν η εξέταση του περιβάλλοντα κόσμου και η προσαρμογή της στις ανάγκες των ατόμων, των οποίων η ζωή θα γινόταν πιο ασφαλής και άνετη. Η διαδικασία αυτή συνοδεύεται από την αυξανόμενη βιομηχανοποίηση και τη μαζική παραγωγή, οι οποίες απαιτούν όλο και περισσότερη ενέργεια. Στο τέλος του 19ου αιώνα ο άνθρακας ήταν η κύρια πηγή ενέργειας. Σε αυτήν την περίοδο ο ηλεκτρισμός εισήχθη στις βιομηχανοποιημένες χώρες ως μια νέα και κομψή μορφή ενέργειας. Αυτή η μορφή ενέργειας εφαρμόστηκε άμεσα σε μεγάλη κλίμακα. Η ευρεία ανάπτυξη της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στην κατασκευή υδροηλεκτρικών σταθμών και έγινε μια σημαντική πηγή ενέργειας κατά το πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα.

Μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, καταβλήθηκε μεγάλη προσπάθεια στην ανοικοδόμηση της κοινωνίας των πολιτών. Η έμφαση κατευθύνθηκε στην ανάπτυξη και την αποτελεσματικότητα της μαζικής παραγωγής. Νέες τεχνολογίες και νέα υλικά, όπως πλαστικό, εφαρμόστηκαν στην παραγωγή. Η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται δραματικά σε αυτή την περίοδο. Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο άρχισαν να παίζουν ένα σημαντικό ρόλο ως πηγές ενέργειας κατά το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα. Ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο μετατρέπονται σε κυρίαρχες πηγές ενέργειας. Αυτές οι τρεις πηγές

ενέργειας, επίσης γνωστές ως ορυκτά καύσιμα, ονομάζονται παραδοσιακές πηγές ενέργειας. Σε αυτήν την περίοδο η πυρηνική ενέργεια εισάγεται ως μια νέα πηγή ενέργειας. Η αυξανόμενη και πιο αποτελεσματική μαζική παραγωγή είχε ως αποτέλεσμα την χαμηλή τιμή πολλών προϊόντων οικιακής χρήσης. Η κατανάλωση των προϊόντων αυξήθηκε πάρα πολύ και ως εκ τούτου δεν είναι έκπληξη το γεγονός ότι χαρακτηρίζουμε τη σημερινή κοινωνία ως κοινωνία της κατανάλωσης.

Παρ' όλα αυτά, έχει γίνει εμφανές κατά το τέλος του 20ου αιώνα, ότι η φιλοσοφία της ανθρώπινης προόδου που έχει εκδηλωθεί σε μια τεράστια παραγωγή και κατανάλωση αγαθών έχει μια αρνητική πλευρά. Έχει αναγνωριστεί ότι η μαζική κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων προκειμένου να εκπληρώσει τις σημερινές ενεργειακές απαιτήσεις έχει αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον. Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος αποτελεί σαφή προειδοποίηση ότι η παρούσα υλοποίηση της ανθρώπινης προόδου έχει τα όριά της. Η αναδυόμενη διεθνής περιβαλλοντική συνείδηση διαμορφώθηκε σε μια έννοια της αειφόρου ανθρώπινης προόδου. Η βιώσιμη πρόοδος του ανθρώπου ορίζεται ως εξής:

"... Για να εξασφαλιστεί ότι (η βιώσιμη ανάπτυξη) ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες". Μια νέα πρόκληση έχει αναδειχθεί στο τέλος του 20ου αιώνα, που αντιπροσωπεύει μια αναζήτηση για αξιοποίηση των νέων και βιώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάγκη αυτής της πρόκλησης τονίζεται από τους περιορισμένους πόρους των ορυκτών καυσίμων στη Γη και την αυξανόμενη ζήτηση για την παραγωγή ενέργειας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η προσοχή στρέφεται προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η ενέργεια είναι η ουσία κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας. Όταν ενδιαφερόμαστε για το πώς ο ανθρώπινος πολιτισμός παράγει και χρησιμοποιεί ενέργεια, μπορούμε να το περιγράψουμε με τον όρο **ενεργειακό σύστημα**. Τα κύρια χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος είναι: ο πληθυσμός, η συνολική κατανάλωση ενέργειας, καθώς και οι πηγές και οι μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι. Το ενεργειακό σύστημα στις αρχές του 21ου αιώνα χαρακτηρίζεται από έξι δισεκατομμύρια ανθρώπους που ζουν στη Γη και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας περίπου $1,3 \times 10^{10}$ kW.

1.2 Πρωτογενείς πηγές ενέργειας

Οι πρωτογενείς πηγές ενέργειας μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τις πηγές ενέργειας που θα εξαντληθούν με την αξιοποίησή τους. Αυτές ονομάζονται καταστρεφόμενες πηγές ενέργειας και είναι τα ορυκτά καύσιμα και η πυρηνική ενέργεια. Τα ορυκτά καύσιμα και η πυρηνική ενέργεια είναι οι κύριες πηγές ενέργειας στο σημερινό ενεργειακό σύστημα και παρέχουν το 78% της ενεργειακής ζήτησης. Με την υπόθεση ότι ο πληθυσμός της ανθρωπότητας δεν αλλάζει δραστικά και καταναλώνει ενέργεια στο τρέχον επίπεδο, τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων θα έχουν εξαντληθεί μέσα σε 320 χρόνια και η πυρηνική ενέργεια μέσα σε 260 χρόνια. Αυτό μπορεί να φαίνεται πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα για μας. Ωστόσο, όταν συγκρίνουμε αυτό το χρονικό διάστημα με το χρονικό διάστημα ύπαρξης της Γης και του ανθρώπινου πολιτισμού, είναι ένα αμελητέο κλάσμα του χρόνου. Πρέπει να έχουμε επίγνωση ότι τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων της Γης είναι περιορισμένα και θα εξαντληθούν.

Αναμένεται ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός θα αυξηθεί και θα φτάσει τα 10 δισεκατομμύρια το 2050. Προκειμένου να παρέχεται στον αυξανόμενο πληθυσμό υψηλό βιοτικό επίπεδο, είναι απαραίτητη η περαιτέρω οικονομική ανάπτυξη. Η οικονομική ανάπτυξη απαιτεί περισσότερη ενέργεια από ό, τι χρησιμοποιείται σήμερα. Η επιπλέον ενέργεια πρέπει να προέρχεται από πρόσθετες πηγές και όχι μόνο από τις παραδοσιακές. Επιπλέον, όταν θέλουμε να λάβουμε υπ' όψη την έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης, πρέπει να αναζητήσουμε, φιλικές προς το περιβάλλον, πηγές ενέργειας. Αυτές οι πηγές είναι γνωστές ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν τη δεύτερη ομάδα των πρωτογενών πηγών ενέργειας και σήμερα συμβάλλουν με 22% στη συνολική ενεργειακή παραγωγή. Με τον όρο ανανεώσιμη ενέργεια αντιλαμβανόμαστε την ενέργεια που προέρχεται από την συνεχιζόμενη ροή της ενέργειας που υπάρχει στο φυσικό περιβάλλον, όπως η ηλιακή, η υδροηλεκτρική και η ενέργεια από βιομάζα.

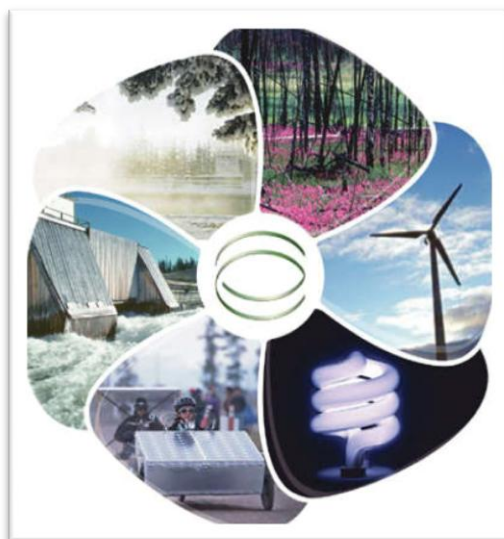
Περίπου το ένα τρίτο της πρωτογενούς ενέργειας χρησιμοποιείται για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η μορφή ενέργειας έχει γίνει πολύ δημοφιλής και χρησιμοποιείται ευρέως για βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές. Η ηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει περίπου το 12% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως.

Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής ενέργειας βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, αυτά έχουν γίνει παγκόσμια στρατηγικό υλικό. Τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ισομερώς κατανομημένα σε όλο τον κόσμο και οι χώρες που έχουν τεράστια αποθέματα ορυκτών καυσίμων μπορούν να επηρεάσουν την παγκόσμια οικονομία. Οι αποφάσεις των χωρών αυτών σχετικά με τα επίπεδα παραγωγής και τη τιμή των καυσίμων έχουν ισχυρές συνέπειες στην παραγωγή ενέργειας και μπορεί να οδηγήσουν σε κοινωνικές εντάσεις. Περαιτέρω, η ενεργειακή κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας δεν είναι ίση ανά κάτοικο στον κόσμο. Περίπου το ¼ του πληθυσμού παγκοσμίως χρησιμοποιεί τα ¾ της πρωτογενούς ενέργειας. Συγκριτικά: ένας κάτοικος των ΗΠΑ χρησιμοποιεί κατά μέσο όρο 10 kW ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, ενώ ένας κάτοικος της Κεντρικής Αφρικής χρησιμοποιεί 0,1 kW ενέργειας που παράγεται από το ξύλο. Η διαφορά αυτή είναι ακόμη πιο έντονη στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Δεν υπάρχει καθόλου ηλεκτρισμός διαθέσιμος στις περισσότερες αγροτικές περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών. Εκτιμάται ότι περίπου 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια.

Έχει αναγνωριστεί ότι η μαζική κατανάλωση ορυκτών καυσίμων έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Τα αέρια όπως το CO₂, SO_x και NO_x παράγονται ως παραπροϊόντα κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων. Τεράστιες ποσότητες αυτών των αερίων εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, όπου αλλάζουν τις φυσικές συγκεντρώσεις. Τα οικολογικά προβλήματα, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η όξινη βροχή, προκαλούνται από την αύξηση αυτών των αερίων στην ατμόσφαιρα. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου συνδέεται με την αύξηση του CO₂ στην ατμόσφαιρα. Τα μόρια CO₂ είναι διαφανή στην ηλιακή ακτινοβολία, αλλά είναι αδιαφανή στη θερμότητα, η οποία είναι η ακτινοβολία στην υπέρυθρη περιοχή μήκους κύματος. Η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί στον 20ο αιώνα, από 280 ppm σε 350 ppm. Οι επιστήμονες εκτιμούν ότι αν αυτή η τάση συνεχιστεί, η θερμοκρασία θα αυξηθεί από 3 °C έως 5 °C το 2030-2050. Για να αποφευχθεί η κατάσταση αυτή, η οποία θα επιφέρει κλιματική αλλαγή

και μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες οικολογικές αλλαγές, η μείωση των εκπομπών CO₂ είναι απαραίτητη.

1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας



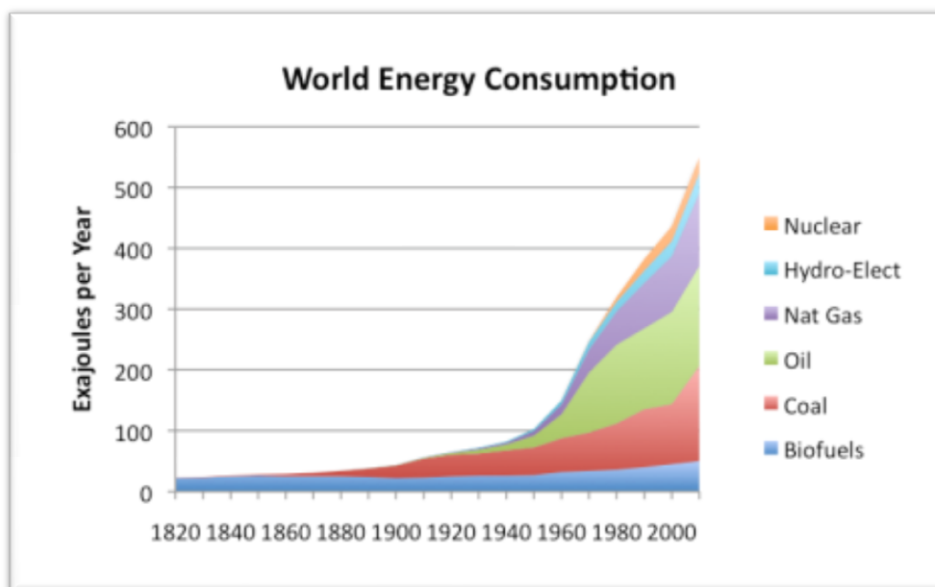
Σχήμα 1.3.1: Μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι αρνητικές πτυχές του σημερινού ενεργειακού συστήματος έχουν οδηγήσει στη διαμόρφωση της αειφόρου ανθρώπινης ανάπτυξης. Η υλοποίηση της βιώσιμης ανάπτυξης απαιτεί ένα εναλλακτικό ενεργειακό σύστημα που βασίζεται σε:

- i) πολιτικές για την αποτελεσματική χρήση ενέργειας και
- ii) τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η εκμετάλλευση των πρωτογενών πηγών ενέργειας αλλάζουν κατά τη διάρκεια του χρόνου και αυτή την αλλαγή ή εξέλιξη την αποκαλούμε: **μετάβαση ενέργειας**. Η ενεργειακή μετάβαση είναι μια αργή διαδικασία και η εμπειρία έχει δείξει ότι χρειάζονται περίπου 50 χρόνια μέχρις ότου η μίξη ενεργειακών πηγών αλλάξει ουσιαστικά. Η μεταβολή αυτή οφείλεται κυρίως στη μείωση του κόστους στην παροχή υπηρεσιών ενέργειας. Η μείωση του κόστους είναι αποτέλεσμα των καινοτομιών στον τομέα της τεχνολογίας, στο επιχειρηματικό μοντέλο και την πολιτική. Υπάρχει ανάγκη για νέες πηγές ενέργειας που στο μέλλον θα αντικαταστήσουν τα εξαντλούμενα ορυκτά καύσιμα. Η τάση είναι η προσοχή να επικεντρωθεί στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που μπορούν να επεξεργαστούν χωρίς να βλάπτουν το περιβάλλον και να θέτουν τους ανθρώπους σε κίνδυνο. Σε έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί, θεωρείται ότι τα ορυκτά καύσιμα θα είναι σημαντικά στο προσεχές μέλλον, αλλά θα φτάσουν σε κορεσμό το 2030. Αυτή τη στιγμή, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξελίσσονται σε μια σημαντική πηγή ενέργειας. Αρχικά, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα αυξηθούν σε εξειδικευμένες αγορές και δεν θα ανταγωνιστούν τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας. Η αγορά θα αποφασίσει την κατανομή των διαφορετικών

μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο μέλλον, η παροχή ενέργειας θα διαφοροποιηθεί περισσότερο και ως εκ τούτου, θα γίνει πιο ισχυρή. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι το σενάριο αναμένει ότι η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά (PV) θα αποτελέσει μια σημαντική πηγή ενέργειας εντός των επόμενων πενήντα χρόνων και στο τέλος του 21^{ου} αιώνα θα είναι η κύρια πηγή ενέργειας.



Σχήμα 1.3.2: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει του χρόνου και το είδος του καυσίμου

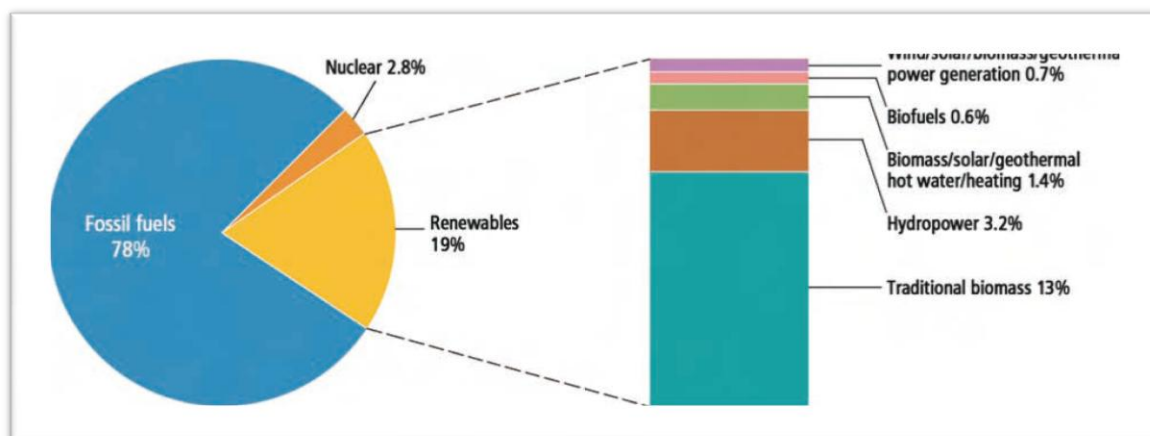
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βασίζονται στη συνεχή ροή ενέργειας η οποία θεωρείται ανεξάντλητη από την άποψη του ανθρώπινου πολιτισμού. Η ηλιακή ακτινοβολία αντιπροσωπεύει μια τέτοια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας για τη Γη. Ο ήλιος αποδίδει $1,7 \times 10^{14}$ kW ενέργειας στη Γη, η οποία είναι περίπου 10.000 φορές περισσότερη από ό, τι η σημερινή κατανάλωση ενέργειας. Η ενέργεια που δέχεται η Γη από τον ήλιο σε μόλις μία ώρα είναι ίση με το συνολικό ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται από τους ανθρώπους σε ένα έτος.

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μορφές. Η άμεση αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιεί την ενέργεια ως φωτισμό (ως επί το πλείστον στην περιοχή του ορατού μήκους κύματος) ή θερμότητα (υπέρυθρη περιοχή μήκους κύματος). Το φως χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών, πράγμα που σημαίνει την άμεση μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια με συσκευές που ονομάζονται ηλιακά κύτταρα (solar cells), ή την παραγωγή φωτοχημικού υδρογόνου. Η θερμότητα χρησιμοποιείται κυρίως ως θερμαντήρας νερού σε ηλιακούς συλλέκτες. Η αιολική, η υδροηλεκτρική και η παραγωγή ενέργειας μέσω κυμάτων μπορούν να θεωρηθούν παραδείγματα της έμμεσης χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, οι μύλοι για το άλεσμα σιτηρών, η άντληση νερού ή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν την ενέργεια του ανέμου. Η ενέργεια που μεταφέρεται από την ροή των ποταμών, με νερό από τις δεξαμενές, ή από παλιρροϊκό κύμα μετατρέπεται σε υδροηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση των γεννητριών. Η διαδικασία της φωτοσύνθεσης δημιουργεί βιομάζα, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή αιθανόλης στην περίπτωση

του ζαχαροκάλαμου ή του αραβοσίτου, ή για την παραγωγή βιοαερίου στην περίπτωση των οργανικών οικιακών αποβλήτων. Παραδείγματα των γεωθερμικών πηγών ενέργειας είναι οι θερμοπίδακες ή οι επίγειες επιφάνειες θερμότητας, όπως ατμού και ζεστού νερού, για εφαρμογές θέρμανσης.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε σχέση με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας αντικατοπτρίζονται σε ένα καθαρότερο περιβάλλον, τη δημιουργία ευκαιριών απασχόλησης, και στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να μειώσει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ρύπων. Η εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να έχει θετικές επιπτώσεις στη δημιουργία θέσεων εργασίας στις μεταποιητικές βιομηχανίες της τεχνολογίας, αλλά και στο γεωργικό τομέα, ο οποίος μπορεί να προμηθεύει καύσιμο βιομάζας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην αύξηση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού με την παροχή εγχώριων πόρων ενέργειας αποφεύγοντας την εξάρτηση από την εισαγόμενη ενέργεια και τα ορυκτά καύσιμα.

Σήμερα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνεισφέρουν περίπου στο 19% της συνολικής ενεργειακής παραγωγής, με την παραδοσιακή βιομάζα και την υδροηλεκτρική ενέργεια ως τους βασικούς συντελεστές, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.3. Η υπάρχουσα δυνατότητα ανανεώσιμης ενέργειας παγκοσμίως εκτιμάται ότι έφτασε τα 1.230 (GW) για το 2009. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν πλέον περίπου το ένα τέταρτο της παγκόσμιας ικανότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (υπολογίζεται σε 4.800 GW το 2009) και προμηθεύουν περίπου το 18 τοις εκατό της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρική ενέργεια δεν συμπεριλαμβάνεται, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φτάνουν σε ένα σύνολο 305 GW. Μεταξύ όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περισσότερο αυξήθηκε κατά το 2009 η παγκόσμια δυναμικότητα αιολικής ενέργειας, κατά 38 GW. Η υδροηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται ετησίως περίπου κατά 30 GW, και η ηλιακή PV ικανότητα αυξήθηκε κατά περισσότερο από 7 GW το 2009.



Σχήμα 1.3.3: Κατανομή της παγκόσμιας κατανάλωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το έτος 2008 [1]

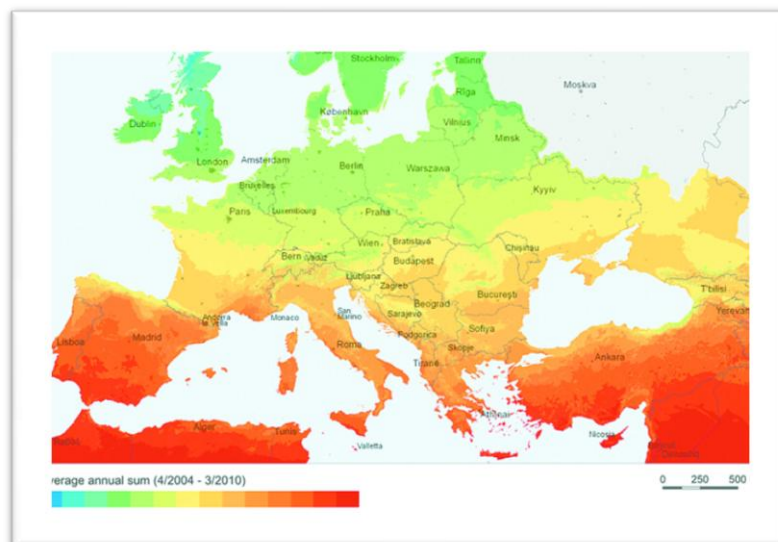
Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές είναι ακριβότερη από αυτή που παράγεται από παραδοσιακές πηγές. Ως εκ τούτου, μια μεγάλης κλίμακας εφαρμογή των ανανεώσιμων πηγών δεν είναι ακόμη οικονομικά ελκυστική στις βιομηχανικές χώρες. Η σύγκριση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες ενεργειακές τεχνολογίες, παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Τα περιβαλλοντικά οφέλη των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών είναι ίσως ο ισχυρότερος παράγοντας για την ανάπτυξη της αγοράς και των εθνικών πολιτικών για την ενθάρρυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ήδη σήμερα η πιο αποτελεσματική λύση για το κόστος, καθώς δύο δισεκατομμύρια άνθρωποι σε πολλά μέρη του κόσμου, δεν έχουν πρόσβαση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Με σκοπό η ηλιακή ενέργεια να γίνει το ίδιο ανταγωνιστική με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές, χρειάζεται η ισχύς των φωτοβολταϊκών να γίνει φθηνότερη. Αυτή τη στιγμή μόνο η ισχύς από τις μπαταρίες είναι πιο ακριβή από ότι η ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια με 50 € cents / kWh. [2]

Πίνακας 1: Σύγκριση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες τεχνολογίες. [3]

Technology	Levelized cost of energy (€ cents/kWh)	
	Mean	Range
Natural gas combined cycle	11.2	10.6-11.8
Brown coal	9.3	8.8-9.7
Hard coal	10.6	10.4-10.7
Nuclear	11.5	10.7-12.4
Wind on-shore	6.5	4.5-8.5
Wind off-shore	9.0	3.0-15.0
Biomass	9.7	7.7-11.6
Small hydro-electric	8.1	3.5-12.7
Solar PV	33.8	28.4-39.1

2.ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1 Εισαγωγή



Σχήμα 2.1.1: Χάρτης κατανομής ηλιοφάνειας στην Ευρώπη

Μία από τις βασικές διεργασίες που κρύβονται πίσω από τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου, πάνω στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, είναι η παραγωγή των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών λόγω της απορρόφησης της ορατής ή άλλης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα υλικό ημιαγωγού. Σήμερα δεχόμαστε ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να περιγραφεί με τους όρους των κυμάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος (λ) και τη συχνότητα (f), ή με όρους διακριτών σωματιδίων, τα οποία χαρακτηρίζονται από την ενέργεια ($h\nu$) η οποία εκφράζεται συνήθως σε ηλεκτρονιοβόλτ (eV). Αυτός ο κυματικός ή σωματιδιακός χαρακτήρας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που ονομάζεται «δυναμική κύματος-σωματιδίου», εξηγείται από την κβαντομηχανική. Η κβαντομηχανική περιγράφει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ως σωματίδια της ενέργειας, τα οποία ονομάζονται φωτόνια. Ένα φωτόνιο απεικονίζεται ως ένα "πακέτο κύματος", το οποίο ορίζεται ως μια συλλογή κυμάτων. Το φωτόνιο μπορεί είτε να εμφανίζεται στο χώρο ή μπορεί εναλλακτικά να εμφανίζεται απλά ως κύμα. Στις περιπτώσεις όπου το πακέτο κύματος είναι χωροταξικά εντοπισμένο, δρα ως ένα σωματίδιο.

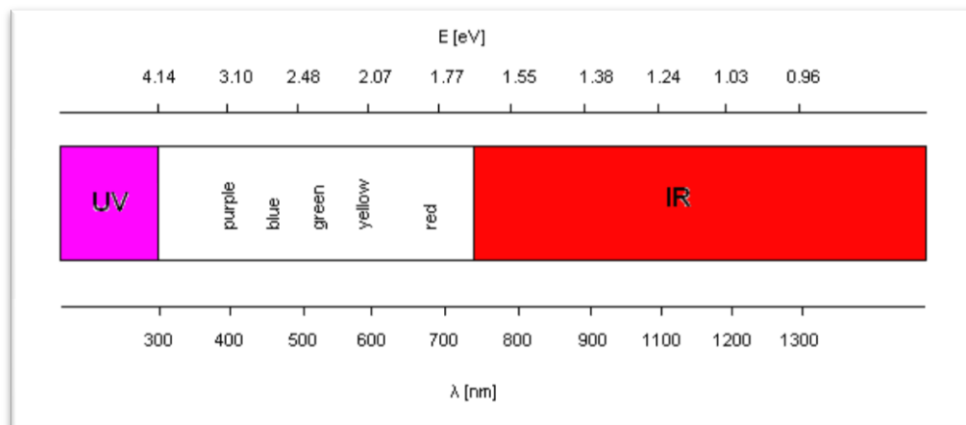
Οι ακόλουθοι τύποι δείχνουν τις σχέσεις μεταξύ των ποσοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία:

$$v = \frac{c}{\lambda}$$

$$hv = \frac{1}{q} \cdot \frac{hc}{\lambda}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$), h είναι η σταθερά του Planck ($6,625 \times 10^{-34} \text{ Js}$), και q είναι το στοιχειώδες φορτίο ($1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$). Για παράδειγμα, ένα πράσινο φως μπορεί να χαρακτηρίζεται από ένα μήκος κύματος των $0,55 \times 10^{-6} \text{ m}$, συχνότητα των $5,45 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ και ενέργεια $2,25 \text{ eV}$.

Το φως καλύπτει ένα ευρύ φάσμα ενεργειών. Ένα σύνολο φωτονίων με διαφορετικές ενέργειες ονομάζεται φάσμα. Η ακτινοβολία σε αυτή την περίπτωση είναι το σύνολο όλων των φασματικών συνεισφορών. Η ενέργεια ενός φωτονίου, μπορεί να εκτιμηθεί από το χρώμα του. Το λευκό φως που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος είναι ένα μείγμα όλων των ενεργειακών καταστάσεων.



Σχήμα 2.1.2: Η σχέση ανάμεσα στην ενέργεια, το χρώμα και το μήκος κύματος.

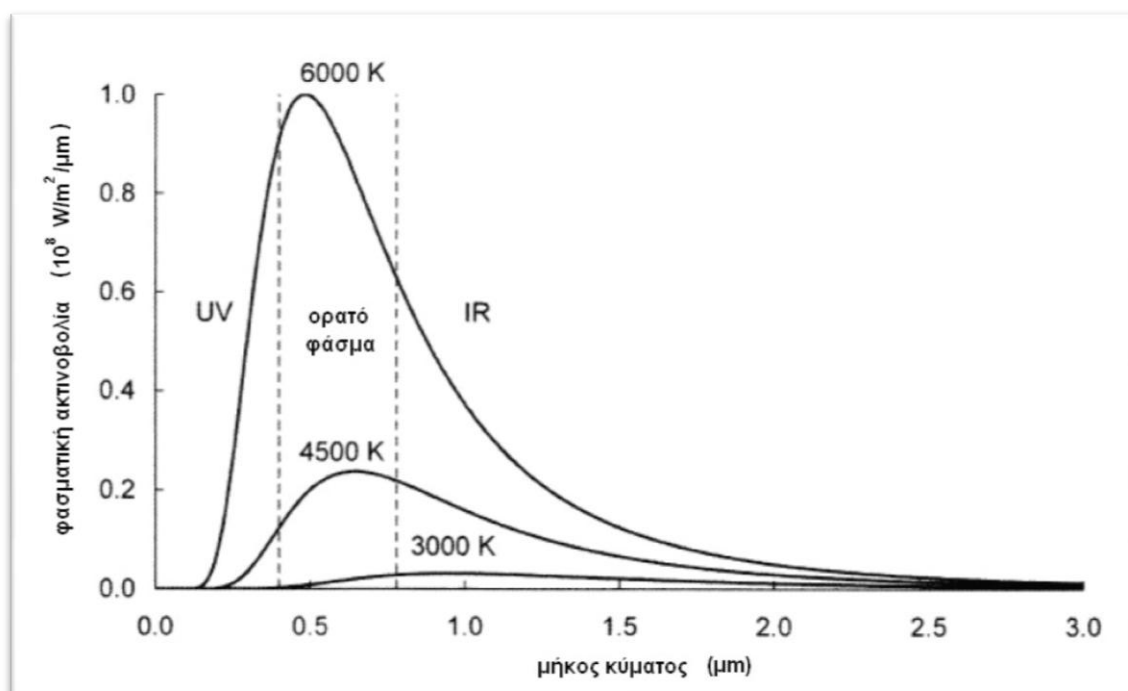
Όπως θα δούμε στη συνέχεια, μόνο τα φωτόνια με κατάλληλη ενέργεια μπορούν να απορροφηθούν και να δημιουργήσουν το ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής στο υλικό του ημιαγωγού. Συνεπώς, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή τον αριθμό των φωτονίων μιας συγκεκριμένης ενέργειας ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Δύο είναι οι ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, η φασματική πυκνότητα ισχύος, $P(\lambda)$, και η πυκνότητα ροής των φωτονίων, $\Phi(\lambda)$. Η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι η ισχύς πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα μήκους κύματος [$\text{W m}^{-2} \text{ m}^{-1}$].

Η συνολική ισχύς από μια πηγή ακτινοβολίας που πέφτει σε μια μονάδα επιφάνειας ονομάζεται ακτινοβολία. Πυκνότητα ροής των φωτονίων ορίζεται ο αριθμός των φωτονίων ανά μονάδα περιοχής, ανά μονάδα χρόνου, και ανά μονάδα μήκους κύματος [$\text{ph m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$]. Η πυκνότητα ροής φωτονίων σχετίζεται με την φασματική πυκνότητα ενέργειας ως εξής:

$$\Phi(\lambda) = P(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c}$$

Κάθε σώμα ακτινοβολεί φως ανάλογα με τη θερμοκρασία του. Η ποσότητα και η φασματική κατανομή εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος. Ο όρος μέλαν σώμα σχετίζεται με έναν τέλει απορροφητή (εκπομπό) ο οποίος βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον του. Αν ένα σώμα έχει μεγαλύτερη ενέργεια από το περιβάλλον του, τότε

προσπαθεί να απαλλαγεί από αυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί εκπέμποντας φωτόνια διαφόρων ενεργειακών καταστάσεων, πράγμα που οδηγεί σε μία χαρακτηριστική φασματική ακτινοβολία, την “ακτινοβολία μέλανος σώματος”. Η εξάρτηση της ακτινοβολίας αυτής από τη θερμοκρασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.1.3: Φασματική εκπομπή ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες.

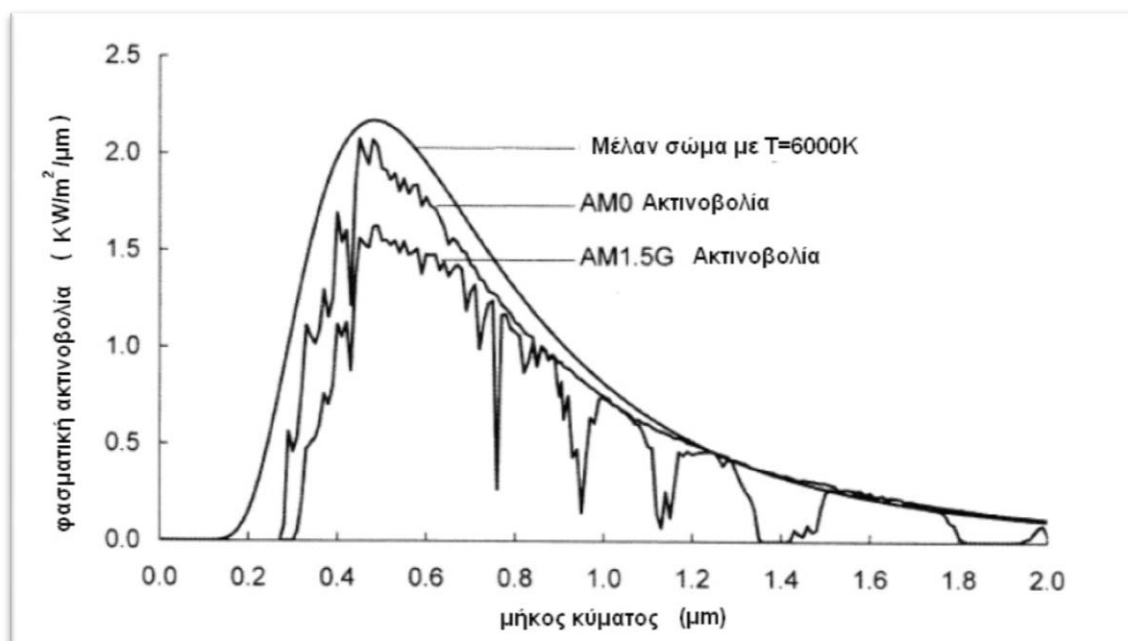
Κάθε δευτερόλεπτο, ο ήλιος απελευθερώνει ένα τεράστιο ποσό ενεργειακής ακτινοβολίας στο ηλιακό σύστημα. Η θερμοκρασία στο κέντρο του ήλιου είναι αρκετά υψηλή για να διευκολύνει πυρηνικές αντιδράσεις, οι οποίες αποτελούν την πηγή ενέργειας του ήλιου. Η θερμοκρασία στο κέντρο του είναι πάνω από 10^6 °C, αλλά η θερμοκρασία του επιφανειακού στρώματος του ήλιου, το οποίο ονομάζεται **φωτόσφαιρα**, είναι περίπου 6000K. Το εξωγήινο φάσμα της ακτινοβολίας του ήλιου μπορεί να προσεγγισθεί από εκείνο ενός μαύρου σώματος σε αυτή τη θερμοκρασία. Η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφάνειας κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, όταν η απόσταση γης-ήλιου λαμβάνει τη μέση τιμή της, ονομάζεται **ηλιακή σταθερά**. Η τιμή της είναι ίση με $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$. [4]

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι εξασθενημένη, όταν περνάει μέσα από την ατμόσφαιρα της γης. Εφόσον η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται και από την εξασθένηση, τα διάφορα ηλιακά φάσματα μπορούν να μετρηθούν στην επιφάνεια της γης. Ο βαθμός εξασθένησης είναι μεταβλητός. Η πιο σημαντική παράμετρος που καθορίζει την ηλιακή ακτινοβολία κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού είναι η απόσταση που πρέπει να διανύσει το φως του ήλιου μέσα στην ατμόσφαιρα. Η απόσταση αυτή είναι η ελάχιστη όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ, δηλαδή ακριβώς κάθετα πάνω από τη γη. Η αναλογία του πραγματικού μήκους διαδρομής του ηλιακού φωτός σε αυτή την ελάχιστη απόσταση είναι

γνωστή ως οπτική αέρια μάζα. Όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ, η οπτική αέρια μάζα ονομάζεται AM1 (air mass one) και αναφέρεται στον ήλιο που βρίσκεται ακριβώς κατακόρυφα στο επίπεδο του γήινου παρατηρητή. Όταν ο ήλιος βρίσκεται σε μια γωνία θ ως προς το ζενίθ, η μάζα του αέρα δίνεται από τη σχέση:

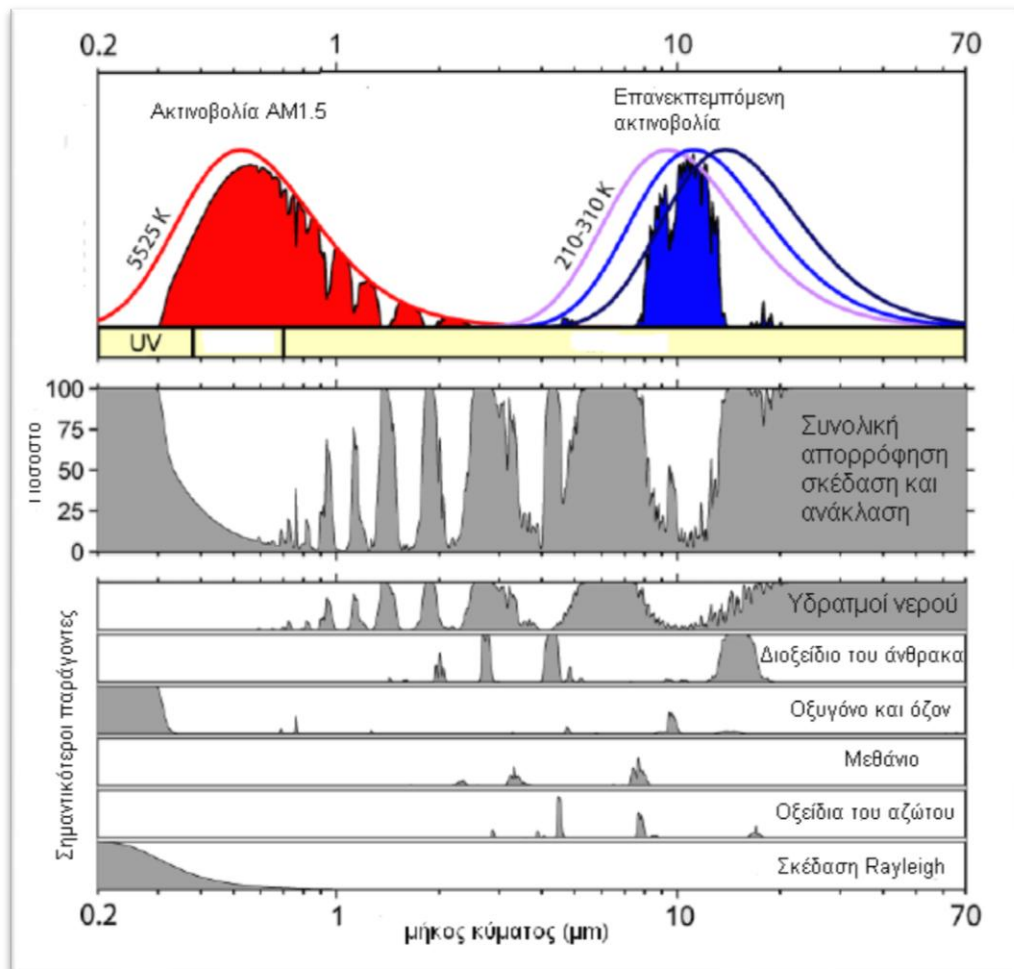
$$\text{Air mass} = (\cos \theta)^{-1}$$

Για παράδειγμα, όταν ο ήλιος είναι 60 μοίρες από το ζενίθ, η ακτινοβολία περιγράφεται ως AM2. Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι επίσης μια συνάρτηση της αέριας μάζας. Η φασματική πυκνότητα ισχύος μερικών συνήθως χρησιμοποιούμενων αέριων μαζών παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1.4. Ως AM0 ορίζεται η ακτινοβολία στο διάστημα ή σε μηδενική ατμόσφαιρα. Σε αντίθεση με την κατάσταση έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα, η επίγεια ηλιακή ακτινοβολία ποικίλει τόσο σε ένταση και φασματική κατανομή ανάλογα με την σχετική θέση της γης και τη θέση του ήλιου στον ουρανό. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η σύγκριση πρέπει να καθοριστεί η πρότυπη ακτινοβολία καθώς και οι μετρήσεις που αναφέρονται σε αυτό το πρότυπο. Η ακτινοβολία AM1.5 αποτελεί ένα τυπικό ηλιακό φάσμα στην επιφάνεια της Γης, σε μια ηλιόλουστη μέρα και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τους ηλιακούς συλλέκτες. Αντιστοιχεί σε μια γωνία 48,2 μοίρες μεταξύ της θέσης του ήλιου και το ζενίθ. Η τιμή της ακτινοβολίας AM1.5 είναι 827 W/m^2 . Η ισχύς των 1000 W/m^2 ενσωματώθηκε για να γίνει πρότυπο. Αυτή η τιμή της ακτινοβολίας είναι κοντά στη μέγιστη τιμή που λαμβάνεται στην επιφάνεια της γης. Συγκρίνοντας τα φάσματα ακτινοβολίας AM0, AM1.5 με το φάσμα ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος σε θερμοκρασία $T=6000\text{K}$ παρατηρείται ότι οι ακτινοβολίες είναι σε αρκετό βαθμό όμοιες. Η μέγιστη ισχύς ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η ενέργεια που παράγεται στο πλαίσιο του παρόντος προτύπου AM1.5 (1000 W/m^2) και εκφράζεται σε βατ αιχμής.



Σχήμα 2.1.4: Σύγκριση φάσματος ακτινοβολίας AM0, AM1.5 και μέλανος σώματος θερμοκρασίας $T=6000\text{K}$

Η εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται στην σκέδαση και την απορρόφηση από τα μόρια του αέρα, τα σωματίδια σκόνης ή / και των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα. Ειδικά ο ατμός, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) προκαλούν απορρόφηση, η οποία είναι επιλεκτικού μήκους κύματος και επομένως οδηγεί σε κενά της φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως προκύπτει στο σχήμα 2.1.5. Το όζον απορροφά την ακτινοβολία με μήκη κύματος κάτω των 0,3 μm . Η εξάλειψη του όζοντος από την ατμόσφαιρα επιτρέπει στην υπεριώδη ακτινοβολία να φθάσει τη γη, με βλαβερές συνέπειες επί των βιολογικών συστημάτων. Τα μόρια CO_2 συμβάλλουν στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας με μήκη κύματος πάνω από 1 μm . Αλλάζοντας την περιεκτικότητα του CO_2 στην ατμόσφαιρα, η απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας του ηλιακού φάσματος επηρεάζεται, κάτι το οποίο έχει συνέπειες για το κλίμα της γης.



Σχήμα 2.1.5: Εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα και οι παράγοντες που την επηρεάζουν.

Το ακριβές ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει σε ένα συγκεκριμένο τόπο στη γη είναι εξαιρετικά μεταβλητό. Εκτός από την ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της εμφανούς κίνησης του ήλιου, οι ακανόνιστες μεταβολές προκαλούνται από τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως σύννεφα. Οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν ιδιαίτερα την

άμεση και διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η **άμεση** συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αυτό το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη κατ' ευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Η **διάχυτη** ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα. [4] Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια της γης, η οποία ονομάζεται **albedo**, μπορεί να παρίσταται στο σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας. Χρησιμοποιούμε τον όρο παγκόσμια ακτινοβολία για να αναφερθούμε στην συνολική ηλιακή ακτινοβολία, η οποία αποτελείται από αυτές τις τρεις συνιστώσες.

Ο σχεδιασμός ενός βέλτιστου φωτοβολταϊκού συστήματος για μια συγκεκριμένη τοποθεσία εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων ύπαρξης ηλιακής ακτινοβολίας στην τοποθεσία. Για παράδειγμα, η μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στην Ολλανδία είναι $1000 \text{ kWh} / \text{m}^2$, ενώ στη Σαχάρα, η μέση τιμή είναι $2200 \text{ kWh} / \text{m}^2$.

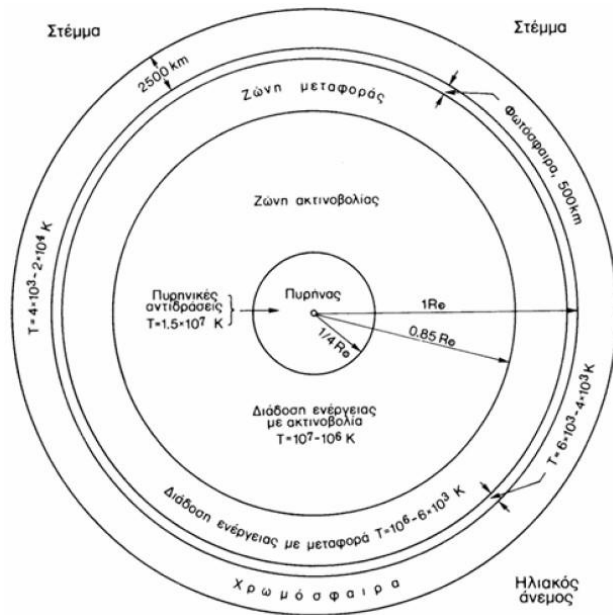
2.2 Ο Ήλιος

Πολλοί άνθρωποι στη Γη γοητεύονται από την ύπαρξη του ήλιου. Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα στην ιστορία της ανθρωπότητας που ο ήλιος έγινε αντικείμενο λατρείας και οι άνθρωποι πίστευαν ότι κατείχε θεϊκές δυνάμεις. Αδιαμφισβήτητα, ο ήλιος είναι η πηγή όλης της ζωής στη Γη. Είναι ένα εξαιρετικά ζεστό, αυτόφωτο σώμα αποτελούμενο από αέρια (κυρίως υδρογόνο και ήλιο) στο κέντρο του ηλιακού συστήματος. Το σχήμα 2.2.1 δείχνει μια σχηματική παράσταση της δομής του ήλιου. Είναι ένα άστρο μεσαίου μεγέθους και παρακάτω εμφανίζονται ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του:

Στο εσωτερικό της σφαίρας με ακτίνα $0,23R$ (όπου R είναι η ακτίνα του ήλιου) βρίσκεται ο πυρήνας του Ήλιου, ο οποίος περιέχει το 40% της μάζας του και στον οποίο δημιουργείται το 90% της ενέργειάς του. Η θερμοκρασία στον πυρήνα του ισούται με $8-40 \times 10^6 \text{ K}$ και η πυκνότητα του πυρήνα του με 80 έως 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Από το $0,23R$ έως το $0,7R$ η θερμοκρασία πέφτει περίπου στους $1,3 \times 10^5 \text{ K}$ και η πυκνότητα μειώνεται φτάνοντας τα $0,07 \text{ g/cc}$. Από το $0,7$ έως το $1R$ βρίσκεται η μεταφορική ζώνη, κατά μήκος της οποίας η θερμοκρασία πέφτει, φτάνοντας στην επιφάνεια περίπου τους 5762 K . Η ανώτερη επιφάνεια της μεταφορικής ζώνης, η φωτόσφαιρα, αποτελεί την πηγή σχεδόν ολόκληρης της ηλιακής ακτινοβολίας. Πάνω από τη φωτόσφαιρα βρίσκεται η επιφάνεια αναστροφής, ακολουθούμενη από τη χρωμόσφαιρα σε ύψος 10.000 km και τέλος το ηλιακό στέμμα.

Συνοπτικά:

Μέση απόσταση από τη γη: $149.600.000 \text{ km}$ (η Αστρονομική μονάδα)
Διάμετρος: $1.392.000 \text{ km}$ ($109 \times$ αυτή της γης)
Όγκος: $1.300.000$ φορές μεγαλύτερος από της γης
Μάζα: $1.993 \times 10^{27} \text{ kg}$ (332.000 φορές από αυτή της γης)
Πυκνότητα (στο κέντρο του): $> 100 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ (πάνω από 100 φορές από εκείνη του νερού)
Πίεση (στο κέντρο του): $> 10^9 \text{ atm}$
Θερμοκρασία (στο κέντρο): περίπου $15.000.000 \text{ K}$
Θερμοκρασία (στην επιφάνεια): 6.000 K
Ακτινοβολία ενέργειας: $380 \times 10^{21} \text{ kW}$
Η Γη δέχεται: $170 \times 10^{12} \text{ kW}$ [5]



Σχήμα 2.2.1: Σχηματικό διάγραμμα της δομής του Ήλιου

3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία, γνωστά ως "φωτοβολταϊκά" ή Φ/Β, αποτελούν μια προσέγγιση υψηλής τεχνολογίας για την άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο όρος "φώτο" προέρχεται από τη λέξη φώς, το δε "βολτ" οφείλεται στον Ιταλό φυσικό κόμη Alessandro Volta (1745-1827), ένα πρωτοπόρο στη μελέτη του ηλεκτρισμού, ο οποίος εφεύρε την μπαταρία. Η ανακάλυψη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου αποδίδεται στον Γάλλο φυσικό, A.E. Becquerel, ο οποίος δημοσίευσε το 1839 μια εργασία του, όπου περιέγραφε πειράματα που έκανε με μια μπαταρία υγρού, στη διάρκεια των οποίων διαπίστωσε ότι η τάση του συσσωρευτή αύξανε όταν πλάκες από άργυρο εκτίθενται στο ηλιακό φως. [6]

Επί της ουσίας, φωτοβολταϊκό σημαίνει φωτοηλεκτρικό. Στην απλούστερη μορφή του, ένα φωτοβολταϊκό είναι μια μπαταρία που τροφοδοτείται από τον ήλιο και το μοναδικό αναλώσιμο της είναι το ίδιο το φως. Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, είναι φιλική προς το περιβάλλον και αν έχει την κατάλληλη προστασία, δεν φθείρεται.

Το 1871 οι Adams και Day, περιέγραψαν τις μεταβολές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του σεληνίου όταν αυτό εκτίθεται στο φως. Το σελήνιο είναι ένα μη μεταλλικό στοιχείο, παρόμοιο με το θείο. Το 1883 ο Charles Edgar Fritz, ηλεκτρολόγος από τη Νέα Υόρκη, κατασκεύασε ένα ηλιακό στοιχείο από σελήνιο, το οποίο σε γενικές γραμμές παρουσίαζε ομοιότητες με τα σημερινά φωτοβολταϊκά στοιχεία από πυρίτιο. Το ηλιακό στοιχείο ήταν κατασκευασμένο από λεπτά στρώματα σεληνίου με κάλυψη από λεπτά ημιδιαφανή χρυσά σύρματα και φύλο γυαλιού για προστασία. Όμως ο βαθμός απόδοσης ήταν πολύ μικρός.

Το 1948, δυο ερευνητές οι Bardeen και Brattain, κατασκεύασαν μια επαναστατική συσκευή με ημιαγωγούς, το transistor. Τα transistors κατασκευάζονται από ημιαγωγούς σε καθαρή κρυσταλλική μορφή, όπου εισάγονται προσεκτικά πολύ μικρές ποσότητες προσμίξεων, όπως το βόριο ή ο φώσφορος (διαδικασία γνωστή ως doping που μεταβάλλει την ηλεκτρική συμπεριφορά των ημιαγωγών). Οι ημιαγωγοί είναι μη μεταλλικά υλικά όπως το πυρίτιο, των οποίων οι ηλεκτρικές ιδιότητες βρίσκονται μεταξύ αγωγών (μικρή αντίσταση στην κίνηση των ηλεκτρονίων) και μονωτών (μεγάλη αντίσταση στην κίνηση των ηλεκτρονίων).

Παρ' όλα αυτά, υπήρξε μια σειρά τεχνολογικών προόδων που έδωσε ώθηση στις πρακτικές εφαρμογές των φωτοβολταϊκών. Το 1953 στα Bell Telephone Laboratories (Bell Labs) του New Jersey των ΗΠΑ, η ομάδα των D. Chapin, C. Fuller και G. Pearson, που ερευνούσαν την επίδραση του φωτός στους ημιαγωγούς, κατασκεύασαν στοιχεία από πυρίτιο με προσμίξεις, που ήταν πιο αποδοτικά. Ενώ το 1954 κατάφεραν να κατασκευάσουν ηλιακά στοιχεία απόδοσης 6% και ακόμα μεγαλύτερης (14%) το 1972. Πάντως, η αξιοπιστία τους είχε ήδη αποδειχθεί πολύ νωρίτερα, όταν τα πρώτα ηλιακά στοιχεία πυριτίου που τοποθετήθηκαν στον τεχνητό ερευνητικό δορυφόρο Vanguard 1, τον Μάρτη του 1958 όχι μόνο πέτυχαν να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τον πομπό του στην προβλεπόμενη ολιγόμηνη διάρκεια του προγράμματος, αλλά εξακολούθησαν να λειτουργούν χωρίς προβλήματα επί έξι συνολικά χρόνια, και μάλιστα στο πολύ εχθρικό διαστημικό περιβάλλον, με την έντονη κοσμική ακτινοβολία. Έτσι από το 1969 και ύστερα,

όλοι οι τεχνητοί δορυφόροι και τα άλλα διαστημικά οχήματα, είναι εξοπλισμένα με ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία. [7]

Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν να κάνουν την εμφάνιση τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των φωτοβολταϊκών συνεχώς βελτιωνόταν. Κυριότερος πελάτης των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν είναι η NASA. Οι υψηλές τιμές στα φωτοβολταϊκά ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε περισσότερο ενθουσιώδης αποδοχή από την αγορά. Ενδεικτικά η τιμή των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από τα 500\$ ανά εγκατεστημένο Watt το 1956, ενώ μετά από 14 χρόνια, το 1970 αγγίζει τα 100\$/Watt. Το 1973 οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής φέρνουν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα 50\$/Watt. Η πρώτη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών που φτάνει στα επίπεδα του 1MW γίνεται στην Καλιφόρνια το 1980 από την ARCO Solar χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου, 2 αξόνων.

Η εξέλιξη αρχίζει πλέον να γίνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Το 1983 η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών φτάνει τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000\$.

Το 1999 η εταιρία Spectrolab σε συνεργασία με το National Renewable Energy Laboratory (NREL) των Η.Π.Α. αναπτύσσουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 32.3%. Την ίδια χρονιά το ρεκόρ στην απόδοση των Thin Films φτάνει στο 18.8%. Η παραγωγή όλων των τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών πλαισίων φτάνει συνολικά τα 200 MW.

Από το 2004 και μετά, η μαζική είσοδος μεγάλων εταιρειών στον χώρο των φωτοβολταϊκών φέρνει την μαζική παραγωγή και αυτή με την σειρά της την τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων στα 6.5 ευρώ/Wp. Γερμανία και Ιαπωνία κυριαρχούν στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων και πλέον σε όλες τις αναπτυσσόμενες χώρες αρχίζουν, με τον έναν (παραγωγή εξοπλισμού) ή τον άλλον τρόπο (κατασκευή φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων), να υιοθετούν τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και να τις παγιώνουν στην συνείδηση των επενδυτών αλλά και των καταναλωτών ενέργειας. Η συνολική παραγωγή το 2004 έφτασε τα 1.200 MW ενώ ο τζίρος της ίδιας χρονιάς άγγιξε τα 6.500.000.000\$.

Σήμερα με οικονομίες μεγάλης κλίμακας έχουν επιτευχθεί μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως υλικά και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Επειδή το φως του ήλιου είναι διαθέσιμο παντού, οι φωτοβολταϊκές διατάξεις έχουν πολλά πρόσθετα οφέλη που τις καθιστούν εφαρμόσιμες και αποδεκτές από όλους τους κατοίκους του πλανήτη. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι πολυσυναρτησιακά οπότε η ηλεκτροπαραγωγή τους μπορεί τυπικά να προσαρμοστεί σε κάθε εφαρμογή, από καταναλωτικές χρήσεις χαμηλής ισχύος (ρολόγια, μικρούς υπολογιστές χειρός, φορτιστές μικρών μπαταριών) μέχρι εφαρμογές μεγάλων ενεργειακών απαιτήσεων, όπως η ηλεκτροπαραγωγή σε κεντρικούς σταθμούς των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού. [7]

Υπάρχει επίσης ένας μικρός αλλά αυξανόμενος αριθμός κτιρίων (οικιακής, εμπορικής και βιομηχανικής χρήσης) με συστοιχίες φωτοβολταϊκών οι οποίες καλύπτουν σημαντικό τμήμα των ενεργειακών τους αναγκών. Η απόδοση του καλύτερου ηλιακού στοιχείου από πυρίτιο είναι της τάξης του 24% σε συνθήκες εργαστηρίου. Οι καλύτερες εμπορικά διαθέσιμες φωτοβολταϊκές μονάδες έχουν ολική απόδοση της τάξης του 16%.

4.ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ



Σχήμα 4.1: Φωτοβολταϊκό πάνελ

4.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται άμεσα σε δύο κυρίως μορφές:

i) άμεση μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνει χώρα σε συσκευές ημιαγωγών που ονομάζονται ηλιακές κυψέλες

ii) συσσώρευση θερμότητας σε ηλιακούς συλλέκτες.

Ως εκ τούτου, δεν πρέπει να συγχέουμε τις ηλιακές κυψέλες με τους ηλιακούς συλλέκτες. Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αφορά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο που αφορά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (photovoltaic) ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Α.Ε. Becquerel και χρησιμοποιήθηκε για πρακτικούς σκοπούς στα τέλη της δεκαετίας του '50 σε διαστημικές εφαρμογές.

Το γερμανικό Συμβούλιο για την Παγκόσμια Αλλαγή αναμένει ότι η φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια θα γίνει η κύρια πηγή ενέργειας για τη "μετά-ορυκτά-εποχή". Η αναπτυσσόμενη φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια ως μια καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας θεωρείται προς το παρόν ευγενής σκοπός. Για το σκοπό αυτό, στον ήλιο δίνεται συνειδητά μια πρόσθετη λειτουργία, εκτός από το να παρέχει ενέργεια για τη ζωή στη Γη. Πρόσθετη λειτουργία του ήλιου θα είναι να παρέχει στη Γη ενέργεια για την άνεση των ανθρώπων και την ευημερία με την παραγωγή της ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κίνητρα που ήταν πίσω από την ανάπτυξη και την εφαρμογή της φωτοβολταϊκής ηλιακής ενέργειας ήταν γενικά τα ίδια όπως και για όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα μοτίβα βασίστηκαν στην πρόληψη των αλλαγών του κλίματος και του περιβάλλοντος και την παροχή καθαρής ενέργειας για όλους τους ανθρώπους. Τα τρέχοντα μοτίβα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: την ενέργεια, την οικολογία και την οικονομία.

Ενέργεια

Υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για ενέργεια στον κόσμο, και δεδομένου ότι οι παραδοσιακές πηγές ενέργειας που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα είναι περιορισμένες και θα εξαντληθούν στο μέλλον, η φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια θεωρείται μια υποσχόμενη υποψήφια πηγή ενέργειας. Η ευρεία κλίμακας εφαρμογή των φωτοβολταϊκών θα συμβάλλει επίσης στην πιο ισότιμη κατανομή των πηγών ενέργειας στον κόσμο.

Οικολογία

Η μεγάλη κλίμακας χρήση των φωτοβολταϊκών, η οποία θεωρείται πηγή ενέργειας φιλική προς το περιβάλλον, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της εκπομπής αερίων όπως CO₂, SO_x και NO_x που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων. Όταν εξετάσουμε τη συμβολή του τομέα των φωτοβολταϊκών στη συνολική παραγωγή ενέργειας στον κόσμο, βλέπουμε ότι η συμβολή της ηλιακής ενέργειας είναι μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής παραγωγής ενέργειας. Επί του παρόντος, η συνολική παραγωγή ενέργειας εκτιμάται ότι θα είναι $1,6 \times 10^4$ GW σε σύγκριση με 30,0 GWp εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών παγκοσμίως. Με τον όρο Wp (peak Watt) αντιλαμβανόμαστε μια μονάδα ενέργειας που παρέχεται από ένα ηλιακό κύτταρο υπό πρότυπες συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, είναι η ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια του στοιχείου για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1W όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1kW/m². Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε περισσότερες από 100 χώρες και είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη τεχνολογία στον κόσμο. Το πότε τα φωτοβολταϊκά θα αρχίσουν να συνεισφέρουν σημαντικά στην παραγωγή ενέργειας και συνεπώς στη μείωση των εκπομπών αερίου εξαρτάται από το ρυθμό αύξησης της παραγωγής φωτοβολταϊκής ηλιακής ενέργειας. Αν η ετήσια αύξηση της παραγωγής φωτοβολταϊκής ηλιακής ενέργειας είναι 15%, τότε το έτος 2050 τα ηλιακά κύτταρα θα παράγουν 200,0 GWp. Ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της τάξης του 25%, θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης των 7500 GWp το 2040 και ο ετήσιος ρυθμός αύξησης του 40% θα οδηγήσει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας $2,4 \times 10^4$ GWp το 2030. Αυτό αποδεικνύει ότι πρέπει να υπάρχει μια σταθερή αύξηση στην παραγωγή ηλιακών κυττάρων έτσι ώστε η φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια να αποτελεί μια σημαντική πηγή ενέργειας μετά από μια περίοδο 30 ετών.

Οικονομία

Τα ηλιακά κύτταρα και οι ηλιακοί συλλέκτες είναι ήδη στην αγορά. Ένα πλεονέκτημα της ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών είναι ότι οι ηλιακοί συλλέκτες είναι ευέλικτοι και μπορούν να συνδυάζονται και να συνδέονται μεταξύ τους με ένα τέτοιο τρόπο ώστε να διανέμουν ακριβώς την απαιτούμενη ισχύ. Αναφερόμαστε σε αυτό το χαρακτηριστικό ως "custommade energy". Η αξιοπιστία και το χαμηλό κόστος συντήρησης, καθώς και η ευελιξία και η δυνατότητα επέκτασης, είναι τεράστια πλεονεκτήματα του τομέα των φωτοβολταϊκών σε πολλές αγροτικές εφαρμογές. Υπάρχουν δύο δισεκατομμύρια άνθρωποι σε αγροτικές κυρίως περιοχές του κόσμου, οι οποίοι δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια και η ηλιακή ενέργεια είναι ήδη σήμερα η πιο οικονομικά αποδοτική λύση. Το να προσφερθεί ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια σε αυτούς τους ανθρώπους αποτελεί

μια τεράστια αγορά. Ορισμένες εταιρείες και άνθρωποι έχουν συνειδητοποιήσει ότι η ηλιακή ενέργεια μπορεί να προσφέρει χρήματα άμεσα και το γεγονός αυτό είναι ίσως η πραγματική κινητήρια δύναμη για την ευρεία ανάπτυξη και εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών. Μπορεί να υπολογισθεί χονδρικά το ποσό των χρημάτων που έχει ήδη εμπλακεί στην παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Το 2010 η συνολική παραγωγή των ηλιακών κυψελών που επιτεύχθηκε ήταν περισσότερα από 27 GWp [8]. Ένα μέσο κόστος 1 Wp είναι περίπου 2,0 €. Αυτό σημαίνει ότι τα χρήματα που εμπλέκονται στην παραγωγή ηλιακών κυψελών έφθασαν τα 54 δισεκατομμύρια €. Υποθέτοντας ότι ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα είναι περίπου δύο φορές το κόστος των κυττάρων, τα χρήματα που εμπλέκονται συνολικά το 2010 μπορούν να εκτιμηθούν σε πάνω από 100 δισεκατομμύρια €.

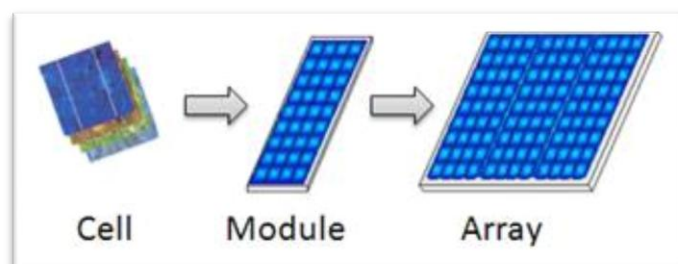
4.2 Πλεονεκτήματα:

- Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
- Η φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι φιλική προς τα περιβάλλον, δεν προκαλεί ρύπανση, ούτε θόρυβο και δε δημιουργεί απόβλητα ή άχρηστα παραπροϊόντα.
- Ικανοποιητική απόδοση μετατροπής.
- Σχετικά εύκολη μέθοδος κατασκευής των ηλιακών κυττάρων από πρώτες ύλες.
- Πολλή μεγάλη διάρκεια ζωής των στοιχείων (τουλάχιστον 25 έτη).
- Τα ηλιακά στοιχεία δεν έχουν κινούμενα μέρη και είναι σχεδόν απαλλαγμένα από την ανάγκη επίβλεψης και συντήρησης. Ακόμα και σε περίπτωση βλάβης, η αποκατάσταση της λειτουργίας γίνεται εύκολα λόγω της σπονδυλωτής μορφής της φωτοβολταϊκής διάταξης.
- Υπάρχει αφθονία πρώτων υλών για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων.
- Δίνει τη δυνατότητα ανεξαρτησίας από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, καθιστώντας τη μια λογικού κόστους παροχή ενέργειας σε εγκαταστάσεις απομακρυσμένες από το κυρίως δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν με όσο μικρή ισχύ ζητηθεί.
- Η αναλογία της παραγόμενης ισχύος προς το βάρος της διάταξης είναι αρκετά μεγάλη, περίπου 100W/kg , που είναι σημαντική ιδιότητα για τις διαστημικές εφαρμογές.
- Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγικών υλικών και η συνεχής μείωση του κόστους παραγωγής τους, οδηγούν σε σταδιακή μείωση και του κόστους των φωτοβολταϊκών πλαϊσίων.

4.3 Μειονεκτήματα:

- Τα φωτοβολταϊκά δεν μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς φως.
- Η τροφοδοσία τους (ηλιακή ακτινοβολία) δεν είναι καθόλου σταθερή.
- Έχουν υψηλό αρχικό κόστος που επισκιάζει το μηδαμινό κόστος συντήρησης και την έλλειψη του κόστους καυσίμου.
- Απαιτείται μεγάλη έκταση για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές.
- Παράγουν συνεχές ρεύμα με αποτέλεσμα να απαιτούνται ειδικοί μετατροπείς για τη χρήση του ρεύματος.
- Είναι απαραίτητες οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας.

4.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα (PV system)



Σχήμα 4.4.1: Διαμόρφωση ηλιακών πάνελ [9]

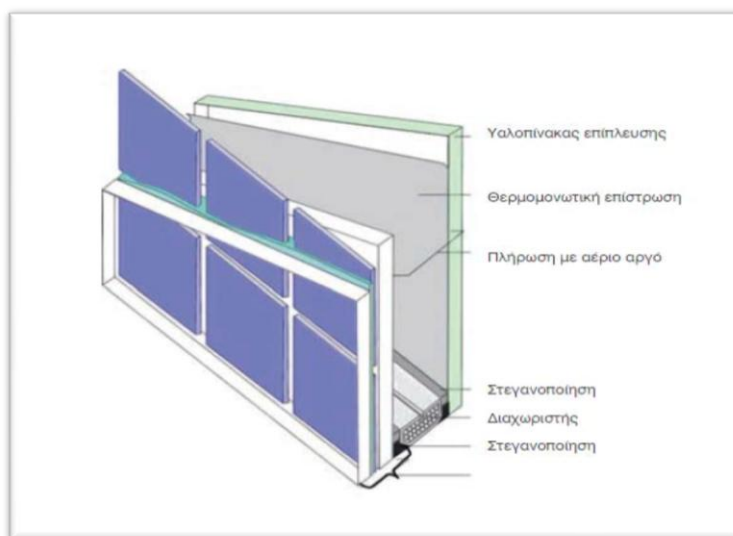
Η βασική μονάδα είναι η **φωτοβολταϊκή κυψελίδα (photovoltaic cell)**, η οποία είναι μικρών διαστάσεων και παρασκευάζεται σε θαλάμους κενού. Μετά την εργαστηριακή παρασκευή της, η όλη μεθοδολογία μεταφέρεται σε θαλάμους μεγαλύτερου μεγέθους που επιτρέπουν την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων μεγαλύτερων διαστάσεων. Αφού κατασκευαστεί βιομηχανικά η βασική δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ακολουθεί η κοπή του στο επιθυμητό σχήμα το οποίο είναι συνήθως τετραγωνικό, έτσι ώστε κατά τη σύνθεση τους σε μεγαλύτερη μονάδα να αφήνουν την ελάχιστη μη εκμεταλλεύσιμη επιφάνεια.

Στην πραγματικότητα, ένα σύνολο από αυτά τα στοιχεία συνδέονται σε σειρά έτσι ώστε να αποτελούν εύχρηστη σε μέγεθος μονάδα, με κατάλληλα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και μέγεθος. Για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, τα βασικά κριτήρια είναι η δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε απλό συσσωρευτή με ΗΕΔ 12V, ενώ για το μέγεθος είναι η ευκολία κατασκευής, μεταφοράς και αντικατάστασης τους από τη συνολική κατασκευή. Ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά αποτελεί την τυπική βιομηχανική μονάδα η οποία ονομάζεται **φωτοβολταϊκό πλαίσιο (photovoltaic module)**. Στη διάταξη αυτή τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι συνήθως 36 σε αριθμό. Συνήθως εμφανίζουν συγκεκριμένη τάση ανοικτού κυκλώματος (από 19V έως 22V) και τοποθετούνται με την πλευρά από την οποία θα φωτίζονται σε επίπεδη γυάλινη πλάκα, υψηλής διαφάνειας, προσαρμοσμένης σε μεταλλικό πλαίσιο το οποίο θα είναι υψηλής αντοχής, συνήθως από αναδύμενο αλουμίνιο. Το πίσω μέρος καλύπτεται από ειδικό πλαστικό υλικό ενθυλάκωσης για την προστασία του από την υγρασία. Η τελική αυτή

διάταξη πληροί τις ειδικές προδιαγραφές για την απαραίτητη μηχανική αντοχή, τις κατάλληλες υποδοχές στήριξης και την αυξημένη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία. Περισσότερα για τη δομή των ηλιακών κυττάρων θα αναφερθούν στο κεφάλαιο 5.

Η τάση και η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου-κυψέλης είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Για αυτό το λόγο τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τοποθετούνται σε ένα ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο αυτό, τα στοιχεία συνδέονται σε σειρά, σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση επιθυμητής τάσης. Τα πλαίσια είναι προκατασκευασμένα στο εργοστάσιο. Τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο ή από ενισχυμένο πλαστικό), που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου, ενώ η εμπρός όψη τους καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με τη βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Διαμορφώνεται έτσι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση φωτοβολταϊκών γεννητριών.

Υπάρχουν δυο τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια με πλαίσιο γυαλιού-ελασμάτων και τα ημιπερατά φωτοβολταϊκά πλαίσια που είναι κρυσταλλικά πλαίσια γυαλιού –γυαλιού. Τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια με πλαίσιο γυαλιού-ελασμάτων κατασκευάζονται με τη μέθοδο της πολυστρωμάτωσης. Ο τύπος αυτός αποτελεί την πιο διαδεδομένη λύση σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων πάνω σε στέγες κτιρίων ή σε πολύ μεγάλες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στην ύπαιθρο. Τα ημιπερατά φωτοβολταϊκά πλαίσια επιλέγονται σε περιπτώσεις αρχιτεκτονικής ενσωμάτωσης, έχουν ιδιαίτερο σχεδιασμό και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονωτικοί υαλοπίνακες.



Σχήμα 4.4.2: Η δομή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Σε ένα πλαίσιο γυαλιού- γυαλιού, στην μπροστινή όψη βρίσκεται το τμήμα “ortisol”, το οποίο αποτελείται από ένα εξαιρετικό λευκό υαλοπίνακα και ένα υαλοπίνακα επίπλευσης. Μεταξύ αυτών των δυο υαλοπινάκων τοποθετείται μια ειδική ρητίνη με ενσωματωμένες τις φωτοβολταϊκές κυψέλες. Το υπόλοιπο τμήμα περιλαμβάνει ένα στρώμα στεγανοποίησης από κάθε πλευρά καθώς και ένα επιπλέον τζάμι με θερμομονωτική επίστρωση, προκειμένου να διασφαλίζεται ικανοποιητική μόνωση. Το διάστημα μεταξύ του βασικού τμήματος και του υαλοπίνακα περιέχει αργό. [10]

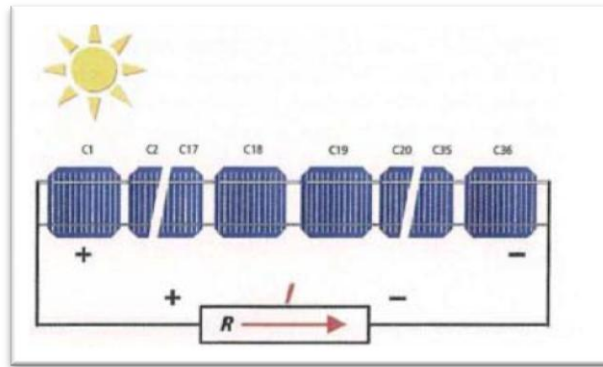
Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας η οποία με τη σειρά της αποτελεί την ‘καρδιά’ παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού σταθμού. Τυπικές τιμές ισχύος αιχμής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου εμπορίου είναι από μερικά Wp έως τα 150 Wp.

Η επιλογή του αριθμού των φωτοβολταϊκών στοιχείων, από τα οποία θα κατασκευαστεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, έχει άμεση σχέση με την ονομαστική ηλεκτρική τάση 12V στους πόλους των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Τα πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα, ανάλογα με τους στόχους μας.

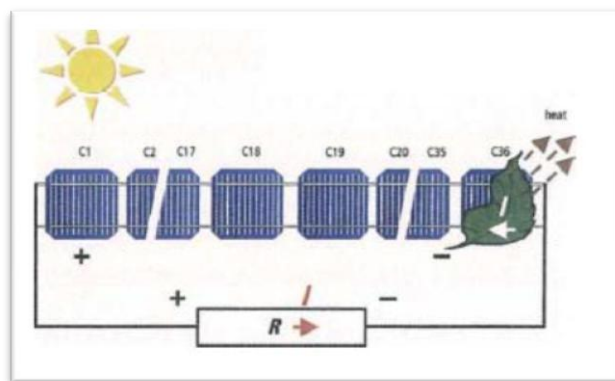
Συνώνυμο σχεδόν με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι το **φωτοβολταϊκό πάνελ (photovoltaic panel)**. Όπως και το πλαίσιο, έχει συναρμολογηθεί και προκατασκευαστεί στο εργοστάσιο και είναι έτοιμο για τοποθέτηση σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, αλλά με τη διαφορά ότι ένα πάνελ μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο) που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Τα τελευταία χρόνια σχεδόν όλες οι εταιρίες που κατασκευάζουν φωτοβολταϊκά στοιχεία, δεν διαχωρίζουν τα πλαίσια από τα πάνελ. Το προϊόν που παράγεται ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο και διατίθεται σε ποικιλία, όσον αφορά την ισχύ που παράγει, την τάση και τελικά τις διαστάσεις του.

Η **φωτοβολταϊκή συστοιχία (photovoltaic array)** είναι ο συνδυασμός πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων καλωδιωμένων μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα, τα οποία είναι σε μια επίπεδη συνήθως επιφάνεια, σταθερή ή περιστρεφόμενη, με το αντίστοιχο ηλεκτρολογικό κιβώτιο όπως και παραπάνω. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται κατά κλάδους όπου κάθε κλάδος αποτελείται από εν σειρά συνδεδεμένα πλαίσια και οι ισοδύναμοι κλάδοι συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους. Η εν σειρά σύνδεση αυξάνει την συνολική τάση, ενώ η παράλληλη το ολικό ρεύμα. Συνήθως τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται έτσι ώστε να αποφεύγονται όσο το δυνατό περισσότερες απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στη γραμμή μεταφοράς. Δηλαδή θέλουμε χαμηλό ρεύμα και αντίστοιχα μεγάλη τάση μέσα στα επιτρεπτά όρια. Το όριο τάσης σε ένα φωτοβολταϊκό είναι τα 600V. Η τελική τάση εξόδου προς τις διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές της εγκατάστασης πρέπει να προσαρμόζεται στην τάση εισόδου από τον κατασκευαστή και φυσικά από τον μελετητή. Για να προσαρμόσουμε την παραπάνω τάση στην ΗΕΔ του συσσωρευτή, απαιτούνται ηλεκτρονικές διατάξεις που ονομάζονται μετατροπείς συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη. Μια ενδεικτική τιμή συνολικής ισχύος αιχμής μιας συστοιχίας είναι από 100W-1KW.

Τα παραπάνω ισχύουν για κύτταρα και κατ' επέκταση για πλαίσια με ίδια χαρακτηριστικά. Όμως αυτό είναι σχεδόν αδύνατο να συμβεί στην πράξη. Είτε για λόγους κατασκευαστικούς είτε λόγω εξωτερικών παραγόντων τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν παρουσιάζουν ίδια χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα να είναι πολύ πιο δύσκολος ο προσδιορισμός της I-V χαρακτηριστικής αλλά και ακόμα χειρότερα να έχουμε περιορισμό της παραγόμενης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η σκίαση, το φαινόμενο hot spot, η θραύση είναι κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η σκίαση ακόμα και μιας μικρής περιοχής ενός πλαισίου μπορεί όχι μόνο να μειώσει δραματικά την παραγόμενη ισχύ του πλαισίου αλλά να οδηγήσει και σε καταστροφή των σκιασμένων κυττάρων (hot spot) με αποτέλεσμα να πρέπει να αντικατασταθεί ολόκληρο το πλαίσιο αφού στο εμπόριο είναι η μικρότερη φωτοβολταϊκή μονάδα που κυκλοφορεί. Όταν ένα κύτταρο σκιαστεί σταματά να παράγει ή παράγει μειωμένο ρεύμα και τάση, ανάλογα με το ποσοστό της επιφάνειας που σκιάστηκε. Όταν διαφορετικά κύτταρα συνδέονται σε σειρά η συνολική τάση είναι το άθροισμα των τάσεων των κυττάρων και το συνολικό ρεύμα είναι ίσο με το ρεύμα του κυττάρου που παράγει το μικρότερο ρεύμα. Αντίστοιχα όταν διαφορετικά κύτταρα συνδέονται παράλληλα το συνολικό ρεύμα είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων αλλά η συνολική τάση είναι ίση με την τάση του κυττάρου που παράγει την μικρότερη τάση. Βλέπουμε λοιπόν ότι η μικρότερη παραγωγή ισχύος του ενός κυττάρου περιορίζει την ισχύ εξόδου και των άλλων κυττάρων. (Αναφερόμαστε σε κύτταρα αλλά τα αντίστοιχα ισχύουν και για πλαίσια και panels).



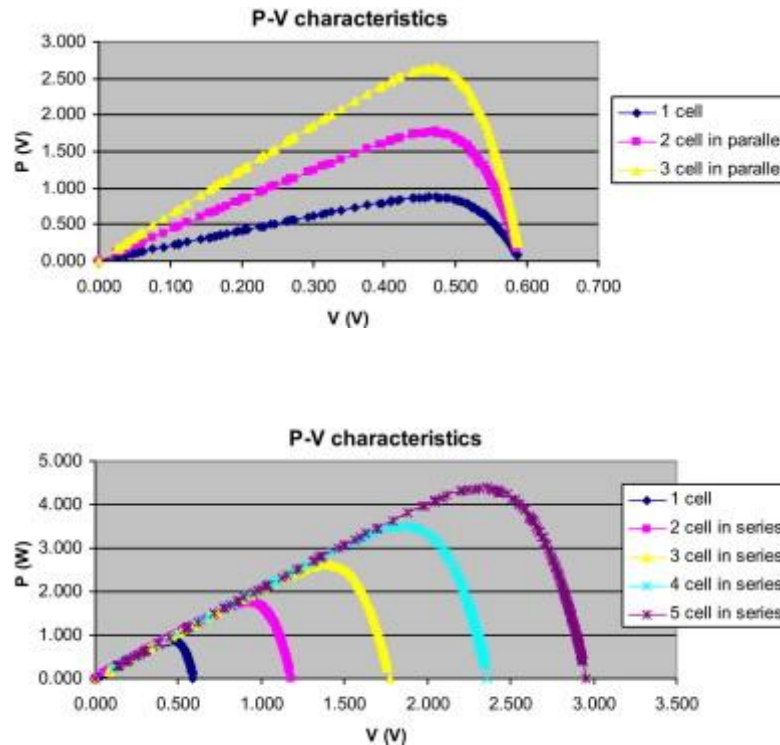
Σχήμα 4.4.3: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με φορτίο



Σχήμα 4.4.4: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με σκιασμένο κύτταρο

Για να δούμε πως δημιουργείται το φαινόμενο **hot spot** ας υποθέσουμε ότι έχουμε αρχικά το παραπάνω πλαίσιο (σχήμα 4.4.3). Έστω τώρα ότι σκιάζεται το τελευταίο κύτταρο του πλαισίου (σχήμα 4.4.4) με συνέπεια να γίνεται αυτό ηλεκτρικό φορτίο και να δέχεται ανάστροφη τάση από την τάση των άλλων κυττάρων. Αυτό το κύτταρο, όχι μόνο σταματά να παράγει ρεύμα αλλά το ρεύμα των άλλων κυττάρων οδηγείται μέσα από το σκιασμένο κύτταρο και καταναλώνεται στις αντιστάσεις R_S και R_{SH} με αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας. Αν το ρεύμα αυτό είναι αρκετά μεγάλο (εξαρτάται από την ώρα και τις καιρικές συνθήκες) μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση του κυττάρου που θα οδηγήσει στην καταστροφή του.

Για να αποφύγουμε το φαινόμενο hot spot αλλά και την απώλεια ισχύος χρησιμοποιούμε διόδους παράκαμψης (bypass diodes). Οι διόδοι αυτοί όπως λέει και το όνομα τους προσφέρουν έναν δρόμο-παράκαμψη για το ρεύμα των άλλων κυττάρων και επιπλέον αποτρέπουν την ανάπτυξη υψηλών τάσεων στα άκρα των σκιασμένων κυττάρων. Αν είχαμε την δυνατότητα να τοποθετούμε δίοδο παράκαμψης παράλληλα με κάθε κύτταρο θα ήταν το βέλτιστο αλλά όχι και πρακτικό. Έτσι οι κατασκευαστές συνηθίζουν να τοποθετούν μια δίοδο ανά 18-20 κύτταρα. [11]



Σχήμα 4.4.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες

Ένα **φωτοβολταϊκό συγκρότημα ή πάρκο** είναι το σύνολο εκείνο των συνεργαζόμενων φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Το φωτοβολταϊκό πάρκο, μαζί με τις διατάξεις που απαιτούνται για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο και τον έλεγχο φόρτισης των συσσωρευτών για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος που επαρκεί για την τροφοδοσία μιας οικίας ή και χωριών, αποτελεί ένα **φωτοβολταϊκό σταθμό**.

4.5 Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνεται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και την πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει μέχρι 0.5-1.0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA ανά cm^2 της επιφάνειας του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθορίζεται με κυριότερο κριτήριο την τιμή του ενεργειακού διακένου του, η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου.

Ως **συντελεστής απόδοσης** ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 25% και

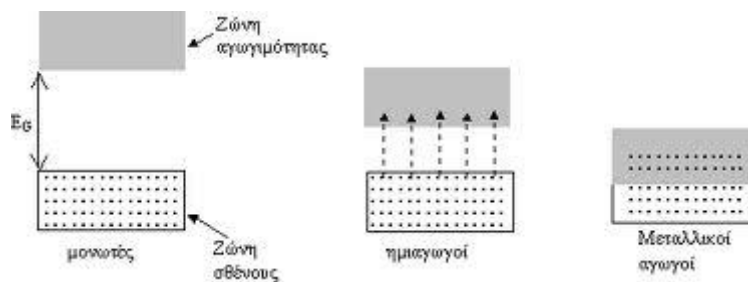
μπορούν να πραγματοποιηθούν με φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5eV για λόγους που θα εξηγηθούν άμεσα. Η ενέργεια ενός φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητας του φωτός που συνδέεται με αυτό. Φωτόνια μικρού μήκους κύματος έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από αυτά με μεγαλύτερο μήκος κύματος. Είναι σημαντικό η ενεργειακή διαφορά των ζωνών του υλικού που χρησιμοποιείται στο φωτοβολταϊκό στοιχείο να ταιριάζει με το φάσμα του φωτός που προσπίπτει σε αυτό. Για παράδειγμα, αν το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας του εισερχόμενου ηλιακού φάσματος βρίσκεται στην περιοχή από κίτρινο έως πράσινο (φωτόνια ενέργειας 1,5 eV), τότε ένας ημιαγωγός με ενεργειακή διαφορά ζωνών της ίδιας τάξης, θα έχει μεγαλύτερη απόδοση. Γενικά ημιαγωγοί με ενεργειακή διαφορά από 1,0 eV έως 1,5 eV είναι κατάλληλοι για φωτοβολταϊκά στοιχεία. [6]

Το πυρίτιο αποτελεί το βασικότερο υλικό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων μια και αποτελεί το κυρίαρχο υλικό στην κατασκευή ημιαγωγών. Έχει ενεργειακή διαφορά στοιβάδων της τάξης του 1,1 eV. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από πυρίτιο κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας είτε μονοκρυσταλλικούς ή πολυκρυσταλλικούς δίσκους, είτε λεπτά φύλλα πυριτίου (άμορφο). Με τη συνεχή αύξηση στην παραγωγή ημιαγωγικών υλικών και τη βελτίωση της τεχνολογίας πυριτίου, η απόδοση των ηλιακών στοιχείων παρουσιάζει μια συνεχή αύξηση πλησιάζοντας τη μέγιστη θεωρητική τιμή τους και με παράλληλη ραγδαία μείωση στο κόστος τους. Για την εκτίμηση του κόστους των ηλιακών στοιχείων χρησιμοποιείται ο συμβατικός όρος watt αιχμής (W_p , peak watt), ο οποίος αναφέρθηκε και προηγούμενα και εκφράζει συνδυασμένα το κόστος κατασκευής σε σχέση με την απόδοση του ηλιακού στοιχείου. [2]

5. ΔΟΜΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

5.1 Ημιαγωγοί

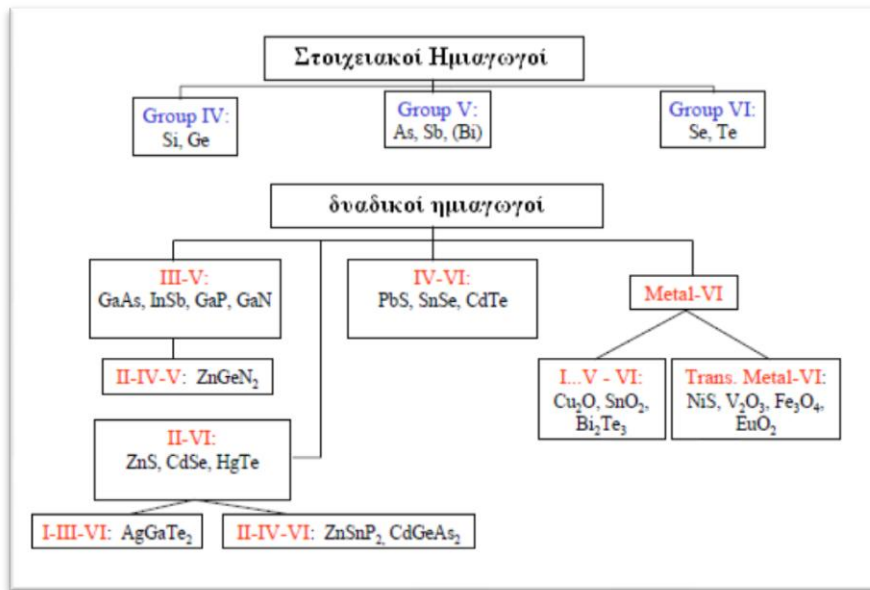
Ηλεκτρική αγωγιμότητα στερεού είναι η ευκολία με την οποία άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. [12] Με τη βοήθεια της κβαντομηχανικής, εξηγείται η αγωγιμότητα διαφόρων υλικών. Όταν ένα άτομο είναι μονωμένο έχουμε κβαντισμένες καταστάσεις και τα ηλεκτρόνια του κατέχουν μόνο ορισμένες διακριτές ενεργειακές στάθμες. Όταν όμως βρεθούν κοντά πολλά άτομα, σχηματίζοντας κρυσταλλικό πλέγμα, συμβαίνει επικάλυψη των κυματοσυναρτήσεων των εξωτερικών ηλεκτρονίων και αποδεικνύεται ότι δημιουργούνται διαπλατυσμένες ενεργειακές ζώνες. Οι δημιουργούμενες ενεργειακές ζώνες είναι η ζώνη αγωγιμότητας, η οποία είναι κενή και η ζώνη σθένους που είναι πλήρως κατειλημμένη διότι επιτρέπεται μόνο ένα ηλεκτρόνιο ανά ενεργειακή στάθμη. Το εύρος της απαγορευμένης ζώνης E_G , στην οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια, εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Ανάλογα με την τιμή του εύρους E_G τα υλικά χωρίζονται σε μονωτές, ημιαγωγούς και αγωγούς (μέταλλα). Επίσης, τα υλικά μπορούν να διακριθούν με βάση τον τρόπο μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.1.1: Σχηματική παράσταση μονωτών, ημιαγωγών, μεταλλικών αγωγών

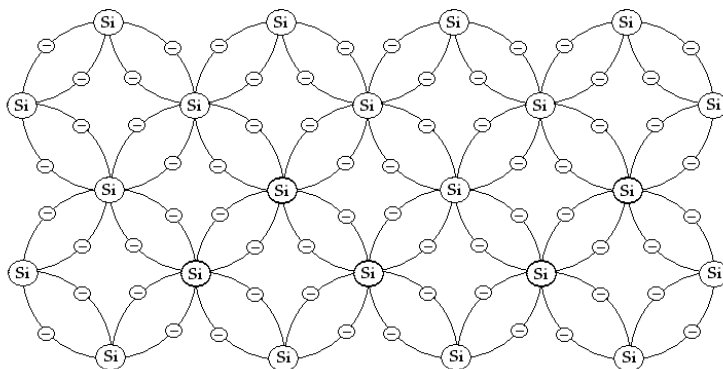
- **Μονωτές (insulators):** το εύρος της ζώνης είναι πολύ μεγάλο (περίπου 5 eV) και με μια συνηθισμένη προσφορά ενέργειας τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Έχουν πολύ χαμηλή τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας.
- **Ημιαγωγοί (semiconductors):** το εύρος της ζώνης E_G είναι μικρό (περίπου 1 eV) και με μικρή προσφορά ενέργειας τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας μια κενή θέση που ονομάζεται οπή. Υπάρχει δυναμική ισορροπία οπών- ηλεκτρονίων που σημαίνει πως συνεχώς δημιουργούνται και καταστρέφονται οπές. Η τιμή της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας είναι μεταξύ αγωγών και μονωτών και αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- **Αγωγοί ή μέταλλα (conductors):** οι ζώνες σθένους και αγωγιμότητας επικαλύπτονται μερικώς και δημιουργείται μια συνεχής ζώνη μισοάδεια, επομένως με μικρή προσφορά ενέργειας μετακινούνται ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους και γίνονται ελεύθερα στη ζώνη αγωγιμότητας. Έχουν υψηλή τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας η οποία ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- **Υπεραγωγοί (superconductors):** παρουσιάζουν μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. [12] [13]

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγωγούς, που όπως αναφέρθηκε, είναι σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, ανάμεσα στους αγωγούς και στους μονωτές.



Σχήμα 5.1.2: Στοιχειώδεις ημιαγωγοί και ενώσεις ημιαγωγών

Ο δημοφιλέστερος ημιαγωγός, ήδη από το 1950 είναι το πυρίτιο (Si), καθώς τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αλλά και το 90% περίπου της σημερινής παραγωγής στηρίζονται σε αυτό. Είναι το δεύτερο στοιχείο σε αφθονία στη Γη, μετά το οξυγόνο (21% έναντι 30%) και χαρακτηρίζεται από την τετραεδρική κρυσταλλική δομή του.



Σχήμα 5.1.3: Απλοποιημένη απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου σε δυο διαστάσεις

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, κάθε άτομο πυριτίου του πλέγματος συνδέεται με 4 χημικούς δεσμούς (2 ηλεκτρόνια δεσμεύονται για τη δημιουργία ενός δεσμού, ένα από κάθε μετέχον άτομο) με τα γειτονικά του άτομα. Συνεπώς, στη θεμελιώδη κατάσταση, όπου και τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους είναι δεσμευμένα, ο ημιαγωγός δεν έχει ελεύθερους φορείς ηλεκτρικού ρεύματος άρα συμπεριφέρεται σαν μονωτής.

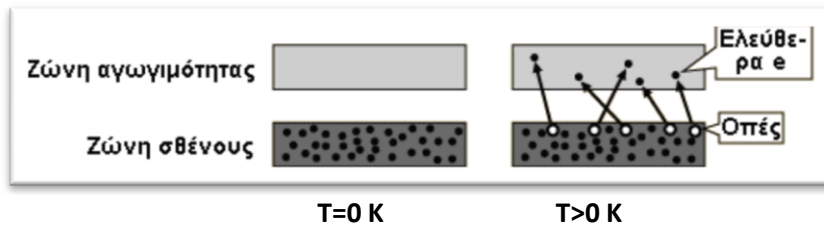
Στους ημιαγωγούς το ενεργειακό διάκενο είναι μη μηδενικό και υπερκαλύπτεται από τα ηλεκτρόνια με σχετικά μικρή προσφορά ενέργειας. Γενικά σε χαμηλές θερμοκρασίες συμπεριφέρονται ως μονωτές, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες ως αγωγοί. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η διαθέσιμη ενέργεια είναι αρκετή, ώστε να προκαλέσει μεταπήδηση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. [12]

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως στην περίπτωση που ένας ημιαγωγός απορροφήσει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας (με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας), παραδείγματος χάριν αν βρίσκεται στη συνηθισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε η θερμική ενέργεια κατανέμεται στα άτομά του και προκαλεί την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ελευθερωμένα ηλεκτρόνια, απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη θερμότητα και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η αποδυνάμωση των δεσμών στο πλέγμα δεν συνεπάγεται την κατάρρευση της συνοχής του σώματος αφού οι τρεις εναπομείναντες χημικοί δεσμοί μαζί με τον ένα ατελή δεσμό, επαρκούν για τη συγκράτηση των ατόμων στη θέση τους.

Τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, τα ελεύθερα δηλαδή ηλεκτρόνια, περιστρέφονται άτακτα στο σώμα όσο διατηρούν την αυξημένη τους ενέργεια. Αν αυτή μειωθεί σημαντικά, τότε επιστρέφουν στην κενή θέση κάποιου ατελούς δεσμού. Η κάλυψη της κενής θέσης μπορεί να γίνει και από κάποιο γειτονικό ηλεκτρόνιο, το οποίο θα αφήσει μία νέα κενή θέση στο αρχικό του άτομο. Η μετατόπιση των κενών θέσεων στο πλέγμα μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ιδεατό σωματίδιο, τις **οπές** (h), οι οποίες θεωρητικά έχουν ίδια μάζα και αντίθετο φορτίο από τα ηλεκτρόνια. Οι οπές μπορούν να καταλαμβάνονται από γειτονικά ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους και να συνεισφέρουν έτσι στην αγωγιμότητα του υλικού. Δηλαδή, στους ημιαγωγούς σημειώνεται αγωγιμότητα και στη ζώνη σθένους. [12]

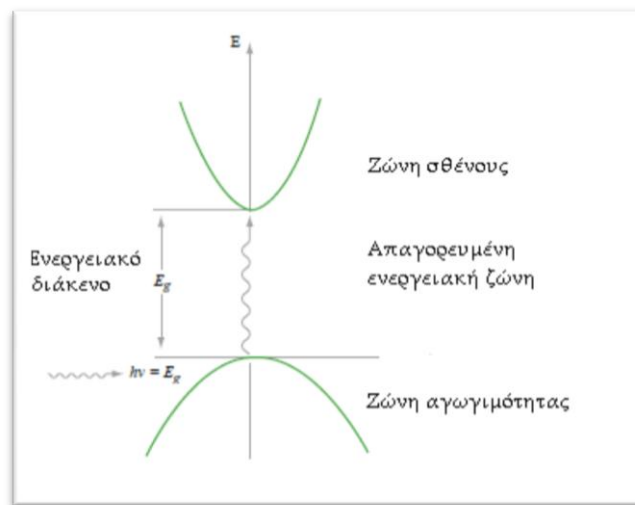
Αναλυτικότερα, το ιδεατό αυτό σωματίδιο, που ονομάζεται οπή, συμπεριφέρεται σαν ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο, παρ' όλο που το κινούμενο φορτίο είναι το ηλεκτρόνιο. Σε έναν αμιγή (χωρίς προσμίξεις) ημιαγωγό, οπές και ηλεκτρόνια συνυπάρχουν πάντοτε σε ίσους αριθμούς. Όταν εφαρμοστεί κάποιο ηλεκτρικό πεδίο, τα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Αυτό το είδος της αγωγιμότητας ονομάζεται ενδογενής αγωγιμότητα. Υπάρχει και ένα άλλο είδος αγωγιμότητας που συνδέεται με τις προσμίξεις. [13]

Από ενεργειακής άποψης, τα ηλεκτρόνια χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Στα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων (λιγότερο ενεργά) που δεν συμμετέχουν στον σχηματισμό των χημικών δεσμών, στα ηλεκτρόνια σθένους που σχηματίζουν τους δεσμούς και στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων σθένους σχηματίζουν μία ενεργειακή ζώνη, την ζώνη σθένους και αντίστοιχα οι ενέργειες των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας σχηματίζουν τη ζώνη αγωγιμότητας. Η ενεργειακή απόσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του λιγότερου ενεργού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και του περισσότερο ενεργού από τα ηλεκτρόνια σθένους, ονομάζεται ενεργειακό διάκενο και εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους ώστε να μετατραπεί σε ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας με ταυτόχρονη δημιουργία μίας οπής.



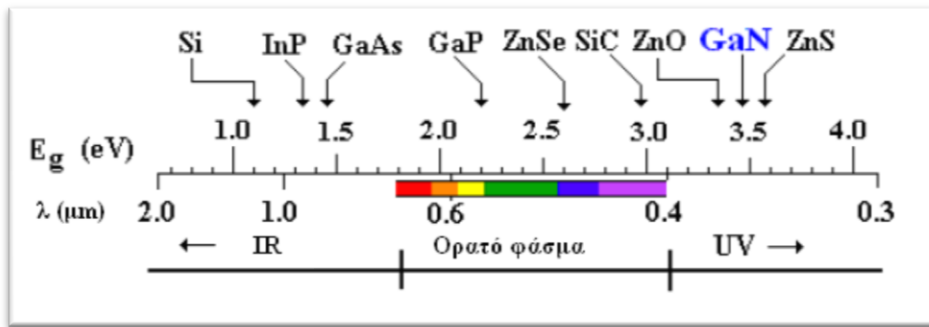
Σχήμα 5.1.4: Μηχανισμός ανάπτυξης ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών σε ημιαγωγό

Σε ένα απολύτως καθαρό σώμα, χωρίς καθόλου προσμίξεις και τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα, δεν υπάρχουν ενεργειακές στάθμες στο διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους (E_v) και τη ζώνη αγωγιμότητας (E_c) και η περιοχή αυτή αποτελεί μία απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη.



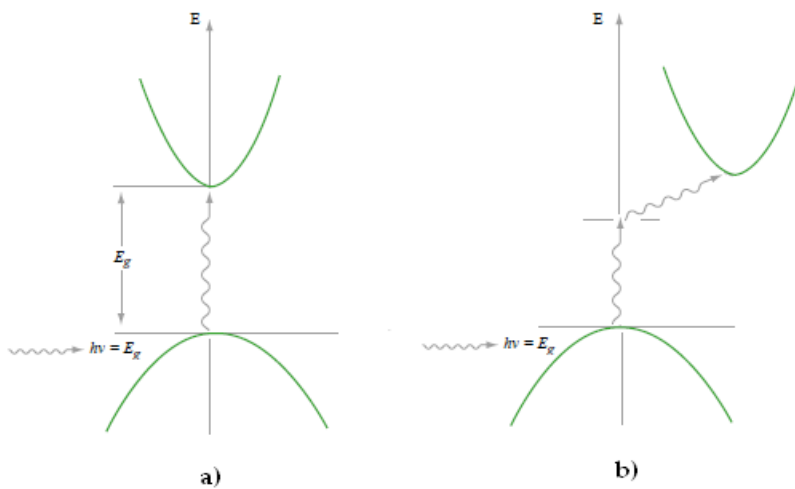
Σχήμα 5.1.5: Αναπαράσταση των ενεργειακών ζωνών και του ενεργειακού διαύλου

Η διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους μπορεί να γίνει όταν του προσφερθεί μία ποσότητα ενέργειας, όπως μια δέσμη ακτινοβολίας με φωτόνια ενέργειας $E=hf$. Στην περίπτωση που η ενέργεια των φωτονίων είναι μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο (E_g) του στοιχείου, τότε το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να την απορροφήσει. Αν τα προσπίπτοντα φωτόνια έχουν ενέργεια μεγαλύτερη του E_g , το ηλεκτρόνιο αφήνει το χημικό δεσμό και η περίσσεια ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική, η οποία γίνεται αντιληπτή ως αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Η πιθανότητα να αποκτήσουν τα ηλεκτρόνια σθένους αρκετή ενέργεια από το περιβάλλον ώστε να διεγερθούν και να υπερπηδήσουν το ενεργειακό διάκενο, εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία του σώματος και έχει τιμή ανάλογη προς το μέγεθος $\exp(-E_g/2kT)$ όπου k είναι η σταθερά Boltzmann.



Σχήμα 5.1.6: Ενεργειακό διάκενο διαφόρων ημιαγωγών σε θερμοκρασία $T=300K$

Η απορρόφηση ενός κατάλληλου φωτονίου όμως δεν είναι πάντα η μοναδική προϋπόθεση για την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου σθένους. Το ενεργειακό διάκενο μπορεί να είναι άμεσο ή έμμεσο. Σε υλικό με άμεσο ενεργειακό διάκενο, φωτόνια με ενέργεια E μεγαλύτερη του E_g επαρκούν για τη δημιουργία ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και οπών. Σε υλικό με έμμεσο διάκενο, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές έχουν διαφορετική ορμή που σημαίνει ότι για την πραγματοποίηση της διέγερσης απαιτείται και η συμμετοχή ενός επιπλέον “σωματιδίου” ώστε να διατηρηθεί η ορμή του συστήματος. Το σωματίδιο αυτό ονομάζεται φωτόνιο και είναι το ενεργειακό κβάντο της θερμικής ταλάντωσης του κρυσταλλικού πλέγματος του ημιαγωγού. Συνεπώς, η απαίτηση της συμμετοχής τριών σωματιδίων, καθιστά την πιθανότητα διέγερσης πολύ μικρότερη από την πιθανότητα διέγερσης σε υλικό με άμεσο ενεργειακό διάκενο.



Σχήμα 5.1.7: α)Υλικό με άμεσο ενεργειακό διάκενο β)Υλικό με έμμεσο ενεργειακό διάκενο

Υλικά με έμμεσο ενεργειακό διάκενο, παρά τη δυσκολία στην δημιουργία φορέων, ευνοούν και την καθυστέρηση της επανασύνδεσής τους, δηλαδή την επιστροφή ενός ηλεκτρονίου αγωγιμότητας στο πλέγμα, καλύπτοντας μία κενή θέση και εκλύοντας ενέργεια ίση περίπου με την τιμή του ενεργειακού διακένου.

5.2 Ημιαγωγοί προσμίξεων

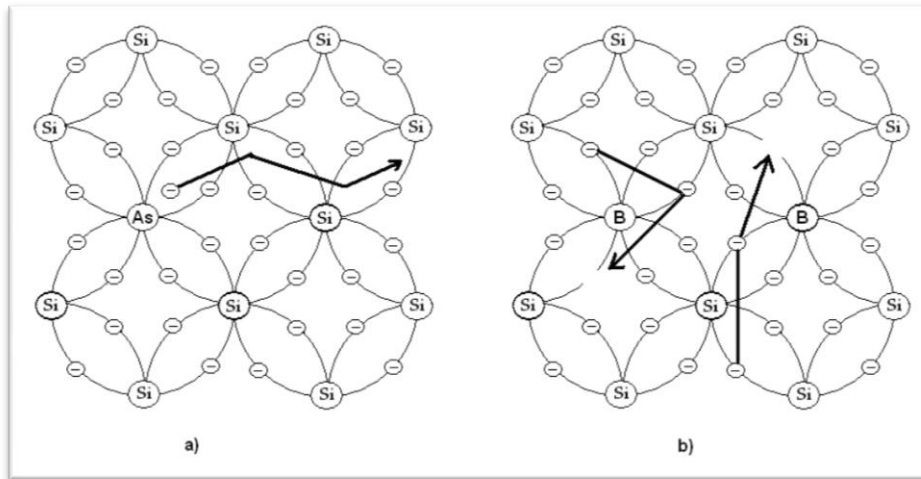
Αν ένας τετρασθενής ημιαγωγός, όπως το πυρίτιο (Si), βρίσκεται σε κατάσταση τήγματος και στο τήγμα γίνει πρόσμιξη μιας μικρής ποσότητας ενός πεντασθενούς στοιχείου, όπως το αρσενικό (As) που ο όγκος των ατόμων του δεν διαφέρει από αυτόν των ατόμων Si, τότε με την ψύξη και στερεοποίηση του σώματος, σχηματίζεται στερεό διάλυμα όπου τα άτομα As έχουν ενσωματωθεί στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου. Τα άτομα αυτά των 5 ηλεκτρονίων σθένους, δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα γειτονικά άτομα Si, και κάθε άτομο θα έχει περίσσεια ενός ηλεκτρονίου, το οποίο θα συγκρατείται πολύ χαλαρά από το θετικό πυρηνικό φορτίο του αρσενικού. Με ενέργεια λιγότερη από την E_g του πυριτίου, τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν να αποσπαστούν από το πλέγμα και να συνεισφέρουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται από τους δεσμούς του πυριτίου, μετατρέποντας τα άτομα του αρσενικού σε θετικά φορτισμένα ιόντα. Άρα το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται σαν δότης ηλεκτρονίων και ταυτόχρονα μετατρέπεται σε θετικό ιόν. Η ενεργειακή στάθμη του πέμπτου ηλεκτρονίου ονομάζεται στάθμη δότη, και το άτομο πρόσμιξης που την προκάλεσε ονομάζεται πρόσμιξη δότη. Στην περίπτωση αυτή, η αγωγιμότητα προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από την κίνηση αρνητικών φορτίων (ηλεκτρονίων). Το υλικό αυτό με τις προσμίξεις τύπου n (negative) ονομάζεται **ημιαγωγός τύπου n**.

Όλα τα στοιχεία της ομάδας V του περιοδικού πίνακα, όπως το άζωτο, ο φώσφορος, το αρσενικό, το αντιμόνιο και το βισμούθιο, μπορούν να παίξουν το ρόλο πρόσμιξης δότη. Ακόμη και σε συνήθεις θερμοκρασίες, υπάρχει σημαντικός αριθμός ηλεκτρονίων στις στάθμες δότη που μπορούν να αποκτήσουν όση ενέργεια χρειάζονται για να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας, όπου είναι πλέον ελεύθερα να περιφέρονται μέσα στο πλέγμα. [13]

Αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται με την πρόσμιξη ενός τρισθενούς στοιχείου, όπως το βόριο (B) όπου υπάρχει πλέον περίσσεια οπών. Με την απορρόφηση λίγης ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να μετακινηθεί προς την κενή θέση αφήνοντας στην προηγούμενη θέση του μία οπή. Έτσι το τρισθενές άτομο μετατρέπεται σε αρνητικά φορτισμένο ιόν και ταυτόχρονα λειτουργεί σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση αυτή, που στον κρύσταλλο επικρατούν οι θετικοί (positive) φορείς (οπές) δημιουργείται ο **ημιαγωγός τύπου p**.

Τα δυο είδη προσμίξεων, n και p, ονομάζονται επίσης δότες και δέκτες, αντίστοιχα, και η διαδικασία της σκόπιμης προσθήκης τους ονομάζεται εμφύτευση (doping). Σε πολλούς ημιαγωγούς εμφυτεύονται συγχρόνως και τα δυο είδη προσμίξεων. Τους ημιαγωγούς αυτούς τους ονομάζουμε αντισταθμισμένους ημιαγωγούς.

Επειδή η συνηθισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος επαρκεί για να αποκτήσουν οι προσμίξεις την απαραίτητη ενέργεια για να διεγερθούν, θεωρείται πρακτικά ότι σε έναν νοθευμένο ημιαγωγό όλοι οι δότες έχουν μετατραπεί σε θετικά ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια και ότι όλοι οι αποδέκτες σε αρνητικά ιόντα και οπές.



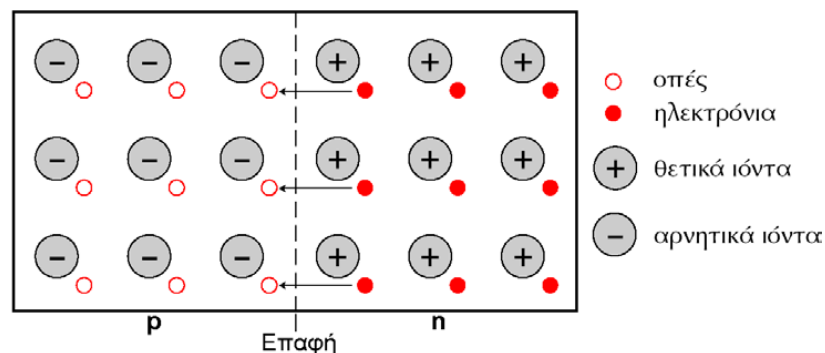
Σχήμα 5.2.1: Κρυσταλλικό πλέγμα νοθευμένων ημιαγωγών με a) πεντασθενές As και b) με τρισθενές B.

5.3 Δίοδος p-n

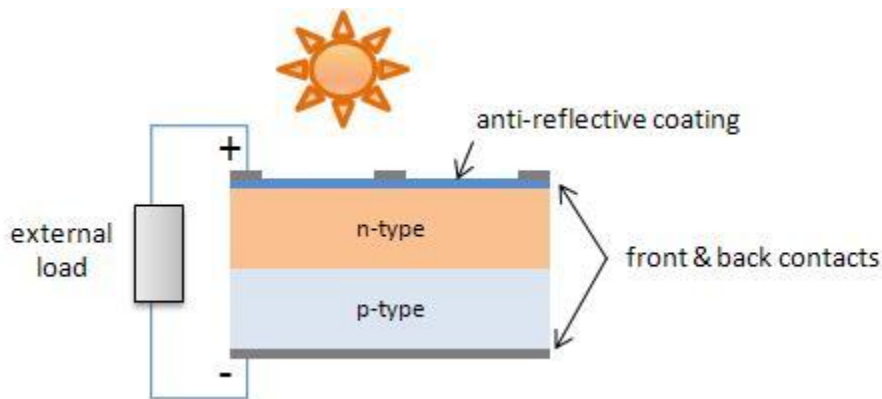
Σε πολλές διατάξεις ημιαγωγών η βασική αρχή λειτουργίας βρίσκεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα του υλικού ελέγχεται με τη συγκέντρωση των προσμείξεων, η οποία μπορεί να μεταβάλλεται σε μια μεγάλη περιοχή τιμών και να αλλάζει από τη μια περιοχή στην άλλη πάνω στη διάταξη. Παράδειγμα αποτελεί η επαφή p-n. [13]

Μία ένωση p-n σχηματίζεται όταν έρθουν σε επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p, δηλαδή ενός νοθευμένου ημιαγωγού με δότες, και ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου n, δηλαδή ενός νοθευμένου ημιαγωγού με αποδέκτες. Σε αυτή την ένωση, ένα μέρος από τους φορείς πλειονότητας του τμήματος τύπου p (οπές) διαχέεται προς το τμήμα τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως φορείς πλειονότητας του τμήματος τύπου n (ελεύθερα ηλεκτρόνια) διαχέονται προς το τμήμα p. Η ανάμιξη των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στην περιοχή κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο τμημάτων, ανατρέπουν την κατάσταση ισορροπίας η οποία αποκαθίσταται με τις επανασυνδέσεις των φορέων.

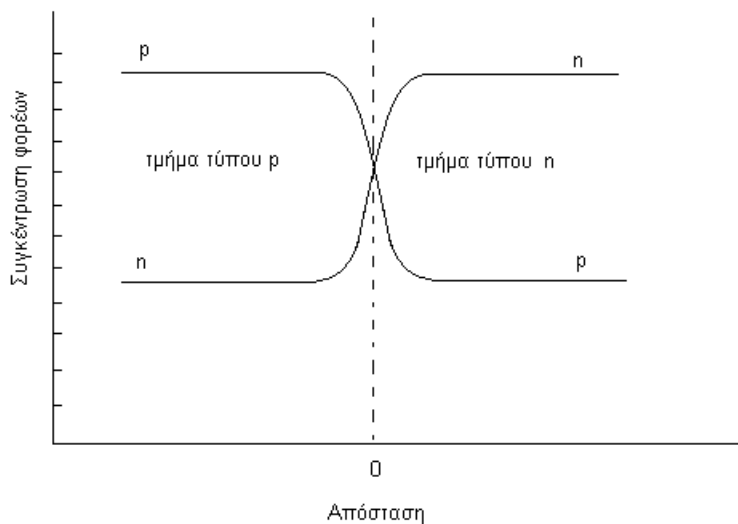
Δίοδος p-n ή κρυσταλλοδίοδος είναι το ηλεκτρονικό εξάρτημα που προκύπτει από την ένωση ενός ημιαγωγού-p με έναν ημιαγωγό-n. [14]



Σχήμα 5.3.1: Δίοδος p-n [14]

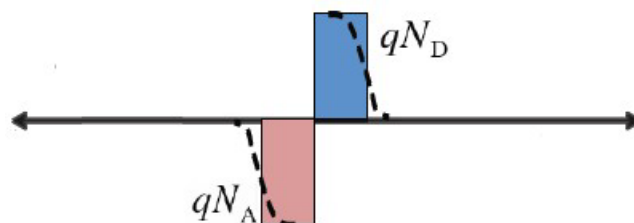


Σχήμα 5.3.2: Διατομή του ηλιακού κυττάρου ενός φωτοβολταϊκού [9]



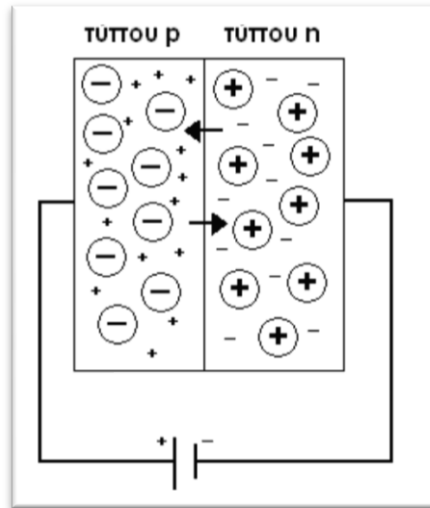
Σχήμα 5.3.3: Συγκεντρώσεις των φορέων και διάχυση

Στην ζώνη εξάντλησης, δηλαδή στην περιοχή κοντά στην επαφή των δύο τμημάτων, τα θετικά ιόντα του τμήματος n και τα αρνητικά ιόντα του τμήματος p, παραμένουν αμετάβλητα στο πλέγμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική του ουδετερότητα και το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, εμποδίζει την περαιτέρω διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης.



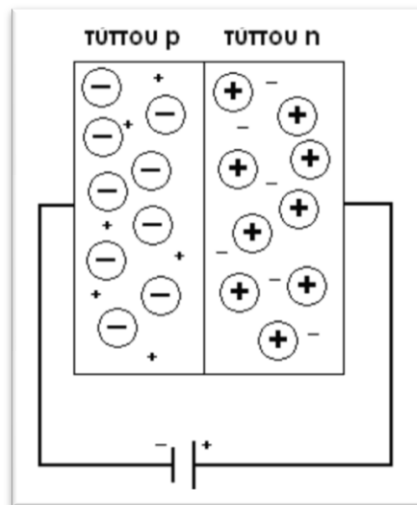
Σχήμα 5.3.4: Φορτίο στη ζώνη εξάντλησης. Χρωματισμένη είναι η θεωρητική πυκνότητα του φορτίου και με διακεκομμένη γραμμή η πραγματική

Αν επιβληθεί **ορθή πόλωση** σε μία δίοδο p-n (διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της) δηλαδή ο αρνητικός πόλος της πηγής να συνδεθεί στο τμήμα n της διόδου και ο θετικός με το τμήμα p, τότε τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος n, προς την περιοχή της ένωσης, όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής διαμέσου του τμήματος p. Το πλάτος της ζώνης εξάντλησης μειώνεται και οι φορείς διασχίζουν εύκολα την επαφή.



Σχήμα 5.3.5: Ορθή πόλωση διόδου p-n

Στην **ανάστροφη πόλωση**, όπου συνδέεται ο αρνητικός πόλος της πηγής με το τμήμα p της διόδου και ο θετικός πόλος με το τμήμα n, γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, ενώ τα ηλεκτρόνια του τμήματος n απομακρύνονται προς τον θετικό πόλο της πηγής. Έτσι οι συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή.



Σχήμα 5.3.6: Ανάστροφη πόλωση διόδου p-n

Για αρνητικές τιμές της επιβαλλόμενης τάσης, σε ανάστροφη πόλωση δηλαδή, η ένταση του ρεύματος σταθεροποιείται σε μία τιμή I_0 , το ανάστροφο ρεύμα κόρου, ενώ για θετικές τιμές της τάσης, άρα ορθή πόλωση, η ένταση του ρεύματος αυξάνεται εκθετικά. Το ρεύμα σε μία δίοδο p-n στην οποία επιβάλλεται μια τάση V δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot V}{\gamma \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]$$

όπου e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

k η σταθερά του Boltzmann

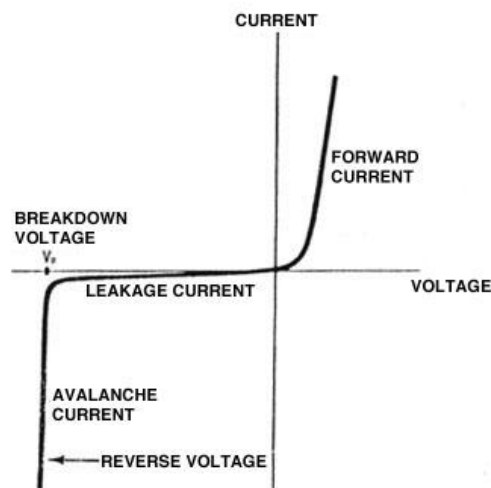
T η απόλυτη θερμοκρασία

γ συντελεστής που χαρακτηρίζει τη δίοδο και $1 < \gamma < 2$

Η παραπάνω έκφραση ισχύει για θετικές και για αρνητικές τιμές της V .

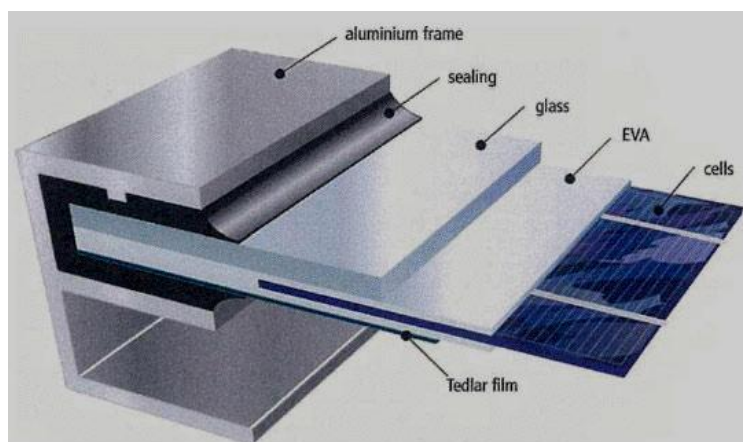
Τα V, I είναι πάντα ομόσημα. Καθώς το V γίνεται πολύ μεγάλο και αρνητικό, το I προσεγγίζει την τιμή $-I_0$.

Στο επόμενο διάγραμμα εμφανίζεται ακριβώς η ιδιόμορφη μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια δίοδο p-n, σε συνάρτηση με την τιμή της τάσης και το είδος της πόλωσης που εφαρμόζεται.



Σχήμα 5.3.7: Χαρακτηριστική I-V διόδου [15]

5.4 Κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων



Σχήμα 5.4.1: Υλικά/ επιστρώσεις φωτοβολταϊκού πλαισίου

Όπως έχει προαναφερθεί, το στοιχείο με την περισσότερη κατανάλωση στον τομέα της κατασκευής φωτοβολταϊκών είναι , μέχρι και σήμερα, το πυρίτιο. Η διαδικασία κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού αποτελείται από τέσσερα στάδια που θα αναφερθούν παρακάτω.

1. Πρώτο στάδιο αποτελεί η κατασκευή των κρυστάλλων πυριτίου.
2. Έπεται η αποκοπή ή ο σχηματισμός λεπτών στρωμάτων από το υλικό αυτό και η εισαγωγή προσμείξεων.
3. Στη συνέχεια, και στις δυο επιφάνειες των στρωμάτων συγκολλούνται μεταλλικά ηλεκτρόδια και τα στρώματα καλύπτονται με κατάλληλο υλικό που αποτρέπει την ανάκλαση του φωτός.
4. Τέλος, κατασκευάζεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με σκοπό την προστασία του στοιχείου από τις φυσικές και χημικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα. [6]

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.4.1. Αυτά με τη σειρά είναι:

1. Ειδικό γυαλί
2. Συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό (Ethylene Vinyl Acetate Sheet ,EVA) για την ενθυλάκωση των στοιχείων
3. Ηλιακά στοιχεία
4. Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
5. Ειδικό γυαλί
6. Κενό αέρος
7. Ειδικό γυαλί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περικλείονται συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα φύλλο πλαστικού ή ακόμα και μόνο από πλαστικό. Τα είδη γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, έγχρωμα και αντανακλούν τη θερμότητα. Το υλικό EVA που χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι ένα λεπτό φιλμ (πάχος 0,25-0,5 mm) και έχει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Οι στρώσεις αυτών των υλικών ενθυλακώνονται συνήθως σε ένα πλαίσιο αλουμινίου. Στο πίσω μέρος μπαίνει ένα junction box από πολυεστέρα για τη σύνδεση των καλωδίων το οποίο προσκολλάται με κόλλα σιλικόνης. [16]

Για την παρασκευή του πυριτίου χρησιμοποιείται πυριτική άμμος με περιεκτικότητα 99,5% σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) καθώς και άνθρακα (C). Τα δυο υλικά αναμειγνύονται και θερμαίνονται σε υψηλή θερμοκρασία. Η διαδικασία αυτή προκαλεί αναγωγή από τον άνθρακα στο διοξείδιο του πυριτίου. Μετά από καθαρισμό, λαμβάνεται πυρίτιο σε λιωμένη κατάσταση.

Για το σχηματισμό μεγάλης ποσότητας κρυσταλλικού πυριτίου, θα πρέπει ένα πολύ μικρό κομμάτι κρυσταλλικού πυριτίου να έρθει σε επαφή με τη επιφάνεια του λιωμένου πυριτίου και να τοποθετηθούν σε κατάλληλο περιστρεφόμενο δοχείο. Το κομμάτι πυριτίου δρα σαν πυρήνας κρυστάλλωσης και έτσι επικάθεται σε αυτό πυρίτιο, με αποτέλεσμα το κομμάτι να μεγαλώσει και να σχηματισθεί σταδιακά ένας νέος μεγαλύτερος κρύσταλλος πυριτίου με τη συνεχή ανύψωση από το λιωμένο πυρίτιο. Το τελικό προϊόν είναι κυλινδρικό με διάμετρο από 7,5cm μέχρι 12cm και μήκος περίπου 1m. Για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων χρειάζεται να κοπούν από τον κύλινδρο που σχηματίστηκε φέτες πάχους 0,25mm.

Παρ' όλα αυτά η παραπάνω μέθοδος είναι πολύ δαπανηρή διότι η διαδικασία κατασκευής κρυσταλλικού πυριτίου απαιτεί πολύ χρόνο και ο κρύσταλλος που δημιουργείται είναι πολύ καθαρός χωρίς να το απαιτεί η κανονική λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού. Η τάξη μεγέθους καθαρότητας είναι ένα άτομο ακαθαρσίας ανά 10^{12} άτομα πυριτίου. Ωστόσο ακόμα και αν η αναλογία ήταν ένα στα 10^6 δεν θα επηρεαζόταν αισθητά το τελικό αποτέλεσμα της αποδοτικότητας.

Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι το γεγονός ότι κατά την κοπή του κρυστάλλου σε κυκλικές φέτες, μια ποσότητα πυριτίου μετατρέπεται σε σκόνη. Επίσης, κατά την κατασκευή των πλαισίων, οι κυκλικές φέτες τοποθετούνται η μία δίπλα στην άλλη με αποτέλεσμα να υπάρχει κενό ανάμεσα τους λόγω τους σχήματος τους. Αυτό είναι κάτι που θα μπορούσε εύκολα να αποφευχθεί αν οι φέτες ήταν τετράγωνες ή ορθογώνιες.

Για την μετατροπή μιας φέτας πυριτίου σε μια δίοδο p-n πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες προσμίξεις. Για παράδειγμα, πρέπει να εισαχθούν στοιχεία όπως το Βόριο ή ο Φώσφορος σε κατάλληλες αναλογίες. Το βόριο ρίχνεται στην αρχή στο λιωμένο πυρίτιο ώστε ο σχηματιζόμενος κρύσταλλος να έχει την απαιτούμενη αναλογία για να είναι p-πυρίτιο.

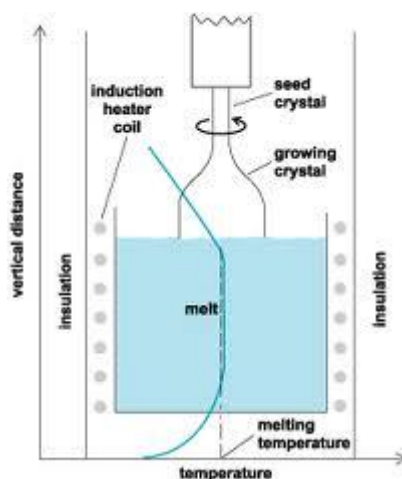
Για την μετατροπή της περιοχής κάτω από μια επιφάνεια της φέτας σε n-πυρίτιο, ο φώσφορος διαβιβάζεται με την βοήθεια ενός αερίου, πάνω από την επιφάνεια που θερμαίνεται με αποτέλεσμα άτομα φωσφόρου να διαχέονται μέσα στο p-πυρίτιο. Αυτό φθάνει σε βάθος ίσο με μερικά δέκατα του 1μm. Για να εισχωρήσουν σε μεγαλύτερο βάθος θα πρέπει ο ημιαγωγός να θερμανθεί περισσότερο. Τα άτομα του φωσφόρου που εισάγονται είναι τόσα ώστε να δώσουν όσα ηλεκτρόνια χρειάζονται για να καλύψουν όλες τις οπές που έχουν δημιουργηθεί από τα άτομα βαρίου και επιπλέον να δώσουν τον κατάλληλο αριθμό ηλεκτρονίων για να σχηματιστεί επιφανειακά το n-πυρίτιο. Στην επιφάνεια επαφής τους, εμφανίζεται ο φραγμός που εμποδίζει τη δίοδο φωτοηλεκτρονίων από το n-πυρίτιο στο p-πυρίτιο.

Η ολοκλήρωση της κατασκευής του φωτοβολταϊκού συμπληρώνεται με τις μεταλλικές επαφές στις δυο επιφάνειες. Η επιφάνεια p καλύπτεται πλήρως από μεταλλικό στρώμα που λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο και η επιφάνεια n έρχεται σε επαφή με ηλεκτρόδιο σχήματος Π ώστε το μεγαλύτερο μέρος της να μένει ελεύθερο για να δέχεται το φως. [6]

5.5 Μέθοδοι προσμίξεων

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο αναφέρθηκε το σημαντικό κόστος ενός καθαρού ημιαγωγού πυριτίου. Εδώ θα αναλυθούν οι μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να γίνει εισαγωγή προσμίξεων σε έναν καθαρό ημιαγωγό.

1. Μέθοδος αναπτύξεως μονοκρυστάλλου ή μέθοδος Czochralski (CZ)



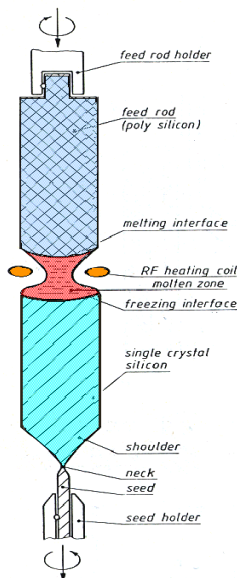
Σχήμα 5.5.1: Μέθοδος Czochralski

Κατά τη μέθοδο Czochralski, μικρό τμήμα του κρυσταλλικού υλικού χρησιμοποιείται ως φίλτρο κρυστάλλωσης, τιθέμενο σε επαφή με την επιφάνεια του τήγματος του ίδιου κρυσταλλικού υλικού και στη συνέχεια ανασύρεται περιστρεφόμενο πολύ αργά, με ταχύτητα μερικών nm ανά λεπτό. Κρύσταλλοι από τήγμα προσκολλώνται προσανατολιζόμενοι στο φίλτρο και έτσι πίσω του σχηματίζεται σταδιακά, ένας μονοκρύσταλλος, σε κυλινδρική μορφή μεγάλης σχετικά διαμέτρου ($\sim 6 \text{ in}$) και μήκους περίπου 1m . Μετά το πέρας της εργασίας, ο κύλινδρος κόβεται σε φέτες κατάλληλου πάχους (wafers) ανάλογες με τη χρήση για την οποία προορίζονται. Στην περίπτωση κατασκευής ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου οι φέτες αυτές, έχουν πάχος συνήθως $300 \mu\text{m}$.

Για την δημιουργία των κρυσταλλικών ημιαγωγών τύπου n ή p ακολουθείται η ίδια εργασία σε τμήμα ημιαγωγού, στο οποίο έχουν προστεθεί οι κατάλληλες για κάθε περίπτωση, προσμίξεις. Δημιουργείται ο κρύσταλλος τύπου n , από τήγμα πολυκρυσταλλικού Si , στο οποίο προστίθεται συνήθως φώσφορος P . Αφού στερεοποιηθεί πλήρως, κόβεται σε λεπτές φέτες και με τη μορφή αυτή υποβάλλεται σε ειδική κατεργασία εισαγωγής προσμίξεων αποδεκτών, που για το πυρίτιο είναι, συνήθως το βόριο (B). Θεωρητικά, η επόμενη εργασία είναι η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, εκ των οποίων το τοποθετούμενο στην όψη της διάταξης, έχει τη μορφή σχάρας. Στην πράξη προηγείται η δημιουργία περιοχών εμπλουτισμένων σε περιεκτικότητα των αντίστοιχων προσμίξεων, ώστε τα δυο εξωτερικά στρώματα να χαρακτηρίζονται από σχεδόν μεταλλική αγωγιμότητα.

2. Μέθοδος της επιπλέουσας ζώνης (Floating Zone Method, FZ)

Float-zone pulling



Σχήμα 5.5.2: Μέθοδος Floating Zone

Η πειραματική διεργασία είναι παρόμοια με αυτή της μεθόδου Czochralski, αλλά εξελίσσεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση (κίνηση από πάνω προς τα κάτω), χωρίς δοχείο τήξεως (crucible) του πολυκρυσταλλικού πυριτίου (p-Si). Το p-Si, σε μορφή ράβδου (ingot), τοποθετείται με τον άξονα του κατακόρυφο, σε σύστημα που του επιτρέπει την αργή κατακόρυφη κίνηση. Ένα φίλτρο από καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο, προσαρμόζεται κάτω από τον κύλινδρο p-Si, ο οποίος κατερχόμενος διέρχεται από χώρο θέρμανσης, με συσκευή υψηλής συχνότητας (RF). Το αντίστοιχο τμήμα του (Ζώνη) τήκεται, αποκρυσταλλούμενο στο κρυσταλλικό φίλτρο, το οποίο κατέρχεται ομοίως, περιστρεφόμενο. Το τηγμένο πυρίτιο, που ακολουθεί, στερεοποιείται αμέσως μετά, δημιουργώντας ένα κατακόρυφο κύλινδρο καθαρού κρυσταλλικού πυριτίου, διαμέτρου μερικών cm (~10 cm). Το τελικό προϊόν είναι υψηλότερης καθαρότητας σε σχέση με αυτό της μεθόδου CZ και τα παρασκευαζόμενα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου, βιομηχανικής παραγωγής, με τη μέθοδο FZ, χαρακτηρίζονται από υψηλότερη απόδοση (17-18%), έναντι απόδοσης 13-14%, των φωτοβολταϊκών στοιχείων της μεθόδου CZ. Πάντως η μέθοδος CZ αποδεικνύεται οικονομικότερη και δίνει κυλίνδρους μεγαλύτερης διαμέτρου (κατά συνέπεια και μεγαλύτερης διαμέτρου wafers).

3. Μέθοδος κράματος (Alloying technique)

Στην επιφάνεια λεπτού πλακιδίου ημιαγωγού τύπου n τοποθετείται ποσότητα άλλης ουσίας, που συμπεριφέρεται ως αποδέκτης, για τον ημιαγωγό του πλακιδίου. Παραδείγματος χάριν, πάνω σε λεπτό πλακίδιο Γερμανίου, Ge, τύπου n, τοποθετείται ποσότητα Ινδίου In, το οποίο είναι εξαιρετικά εύτηκτο. Το σύστημα θερμαίνεται μέχρι να τήξει το Ινδίο. Η διείσδυση του In στο Ge, δημιουργεί μια περιοχή εύτηκτου κράματος, όπου οι προσμείξεις τύπου p υπερτερούν των προσμείξεων τύπου n, με αποτέλεσμα τη δημιουργία του ημιαγωγού Ge τύπου p. Το απομένον τμήμα του Ινδίου αποτελεί τη μεταλλική επαφή της πλευράς αυτής. Με την τεχνική αυτή είναι δύσκολος ο ακριβής καθορισμός των διαφόρων στρωμάτων και μάλιστα με επαναλαμβανόμενο τρόπο.

4. Τεχνική της διάχυσης (Diffusion technique)

Το υπόστρωμα, δηλαδή ο ημιαγωγός ορισμένου τύπου πρόσμειξης, τοποθετείται σε κατάλληλο θάλαμο, στον οποίο εισάγεται νέα πρόσμειξη, με τη μορφή ατμών σε υψηλή θερμοκρασία, αντίθετου τύπου από την υπάρχουσα στο υπόστρωμα. Τα άτομα της νέας πρόσμειξης διαχέονται σε μέρος του υποστρώματος, υπερκαλύπτοντας την συγκέντρωση της αρχικής πρόσμειξης. Το τμήμα αυτό, με τη νέα πρόσμειξη, σε στενή επαφή με το υπόλοιπο που περιέχει την αρχική πρόσμειξη, αποτελούν την επαφή p-n.

5. Τεχνική της εμφύτευσης ιόντων (Ion implantation technique)

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

Εξέλιξη, που αφορά ιδιαίτερα στις δυο τελευταίες μεθόδους, αποτελεί η χρήση λεπτών στρωμάτων οξειδίου του πυριτίου (SiO_2 , πάχους 1μm), πάνω σε υπόστρωμα, από ενδογενή ημιαγωγό ή ημιαγωγό πρόσμειξης. Με χημική μέθοδο το οξείδιο απομακρύνεται από ορισμένα τμήματα του καλυμμένου υποστρώματος και αποκαλύπτονται εκείνα τα τμήματα του, στα οποία επιθυμούμε να εισάγουμε αντίθετου είδους προσμείξεις. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε νέα επίστρωση ημιαγωγίμου υλικού ή μεταλλικής επαφής. Η μέθοδος αυτή, ονομάζεται: **λιθογραφία** (φωτολιθογραφία, ακτινών χ, δέσμης ηλεκτρονίων, Laser κ.α., ανάλογα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του οξειδίου) και χαρακτηρίζεται από αποτελέσματα εξαιρετικής γεωμετρικής ακρίβειας.

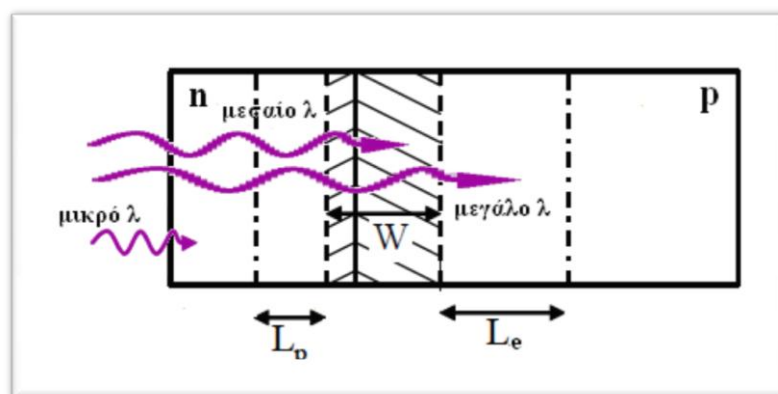
Η λιθογραφία χρησιμοποιείται κατ' εξοχήν στη μικροηλεκτρονική για τη δημιουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, σε συνδυασμό με την υψηλής ποιότητας λεπτών ημιαγωγίμων υποστρωμάτων, **μέθοδο της επιταξίας**.

Σύμφωνα με την τεχνολογία αυτή, το υλικό εξαερώνεται με θέρμανση σε περιβάλλον λίαν χαμηλής πίεσης και οι ατμοί του εναποτίθενται σε υπόστρωμα, σχηματίζοντας ένα ή περισσότερα αλληπάλληλα λεπτά στρώματα (περίπτωση πολυστρωματικών διατάξεων, superlattices). Το πάχος έκαστου στρώματος καθορίζεται με χρήση σκιάστρων που παρεμβάλλονται στις δέσμες, η λειτουργία των οποίων ελέγχεται ηλεκτρονικά. Η διεργασία αυτή γίνεται μέσα σε ειδικούς θαλάμους υψηλού κενού (10-11 torr), ώστε να ελαχιστοποιείται η οξείδωση του παρασκευαζόμενου υλικού και η ενσωμάτωση ξένων ατόμων και τελικά, η δομή του να χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα.

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

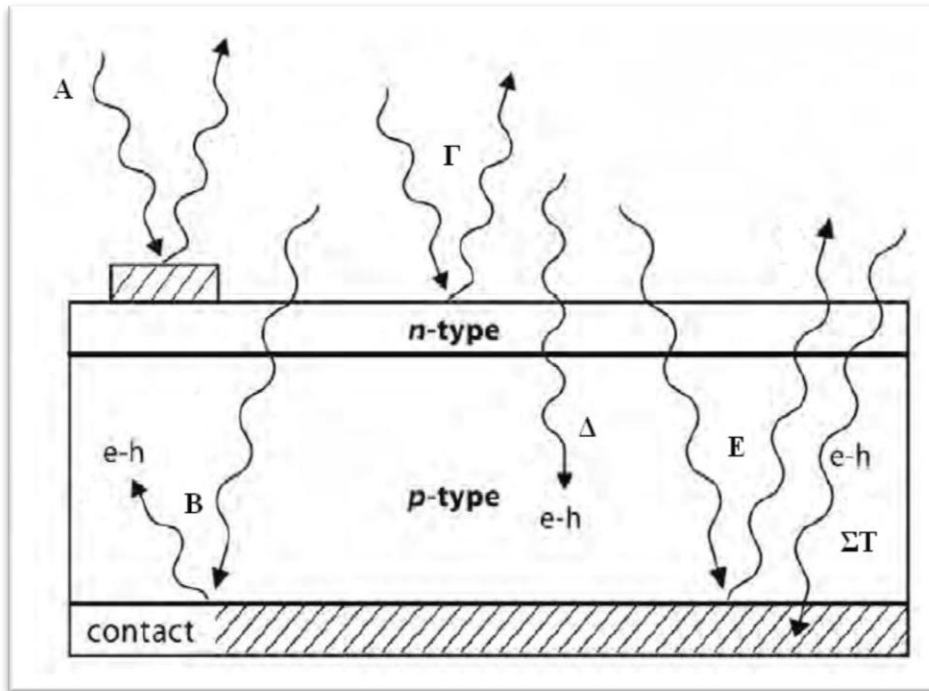
5.6 Τρόπος λειτουργίας ΦΒ

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο βασίζεται σε μία δίοδο p-n με πολύ λεπτή και έντονα νοθευμένη περιοχή επιφάνειας. Η επιφάνεια ακτινοβολίας μπορεί να είναι η περιοχή p ή η περιοχή n. Στα στοιχεία πυριτίου, η επιφάνεια ακτινοβολίας είναι η περιοχή n. Όταν το στοιχείο φωτίζεται, τότε τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, μπορούν να απορροφηθούν από τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια και να προκαλέσουν τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής τα οποία διαχωρίζονται αμέσως λόγω του εσωτερικού ηλεκτροστατικού πεδίου E_0 . Τα ηλεκτρόνια έτσι ολισθαίνουν προς την επιφανειακή περιοχή n και αντίστοιχα οι οπές προς την p περιοχή. Συνεπώς δημιουργείται μία τάση ανοιχτού κυκλώματος ανάμεσα στους ακροδέκτες της διάταξης και η p περιοχή είναι θετικά φορτισμένη σε σχέση με την επιφανειακή περιοχή. Χωρίς την ύπαρξη του ηλεκτροστατικού πεδίου E_0 δεν είναι δυνατόν να διαχωριστούν τα φωτοδιεγειρόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών και να συσσωρευτούν επιπλέον ηλεκτρόνια στην επιφανειακή περιοχή και επιπλέον οπές στην p περιοχή.



Σχήμα 5.6.1: Απορρόφηση φωτονίων στο φωτοβολταϊκό στοιχείο

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι στο περιβάλλον.



Σχήμα 5.6.2: Ανάκλαση και απορρόφηση ακτινοβολίας. Α,Ε: Ανάκλαση στους μεταλλικούς ακροδέκτες. Β:Ανάκλαση στον μεταλλικό ακροδέκτη και μετέπειτα απορρόφηση της ακτινοβολίας. Γ:Ανάκλαση στην επιφάνεια τύπου n. Δ:Απευθείας απορρόφηση της ακτινοβολίας. ΣΤ: Απορρόφηση ακτινοβολίας στον ακροδέκτη.

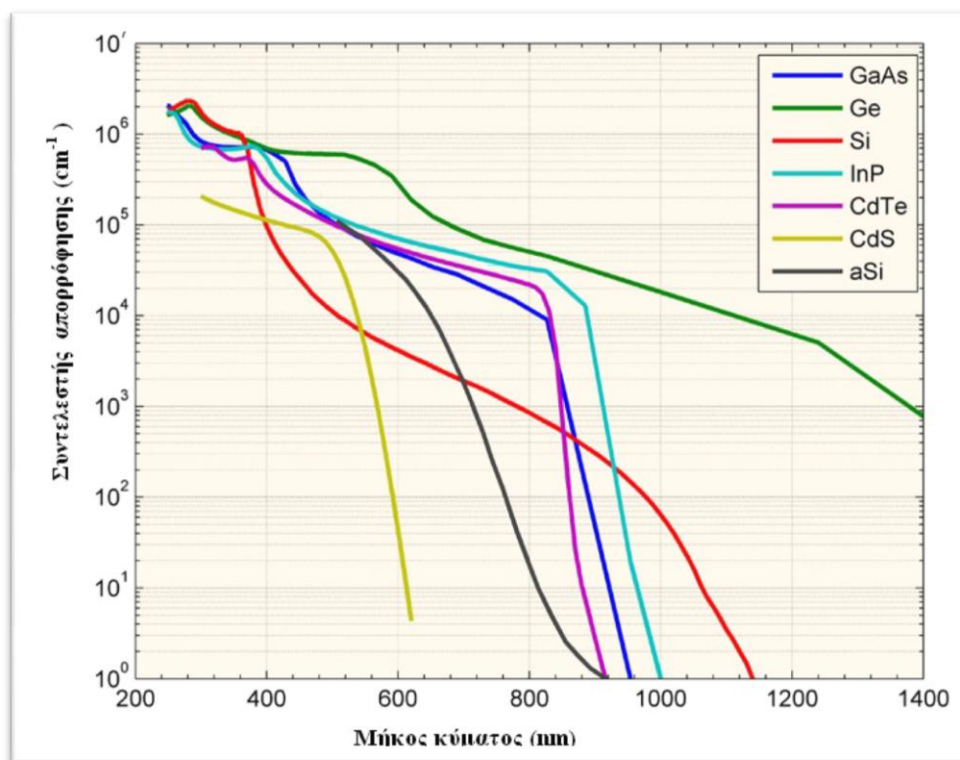
Ακολούθως, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος των φωτονίων που έχουν ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο. Για αυτά τα φωτόνια, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διάφανο σώμα. Τα φωτόνια που έχουν ενέργεια $h\nu$ ίση ή μεγαλύτερη από το E_g , απορροφώνται και δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με ενέργεια $h\nu$. Επειδή τα διεγερμένα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε θερμική ισορροπία στην ζώνη αγωγιμότητας μόνο όταν έχουν ενέργεια περίπου ίση με το E_g , το υπόλοιπο της ενέργειας που απορρόφησαν, $h\nu - E_g$, πρέπει να χαθεί. Αυτή η ποσότητα ενέργειας μεταφέρεται στις πλεγματικές ταλαντώσεις υπό μορφή θερμότητας καθώς τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται από τα ταλαντευόμενα άτομα.

Τα φωτόνια με κατάλληλη ενέργεια για να διεγείρουν τον ημιαγωγό, απορροφώνται πολύ πιο εύκολα κοντά στην επιφάνεια που ακτινοβολείται και λιγότερο εύκολα στο βάθος του υλικού. Η ροή των φωτονίων Φ εντός του ημιαγωγού δίνεται από τη σχέση

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x)$$

Φ_0 η αρχική τιμή της ροής στην επιφάνεια
 x η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία εντός του ημιαγωγού
 α ο συντελεστής απορρόφησης.

Ο συντελεστής απορρόφησης (μετράται σε m^{-1}) εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων άρα από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



Σχήμα 5.6.3: Ο συντελεστής απορρόφησης συναρτήσεως του μήκους κύματος για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φωτοβολταϊκών διατάξεων

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, ο συντελεστής απορρόφησης μηδενίζεται για εκείνα τα μήκη κύματος που δηλώνουν μικρότερη ενέργεια από αυτή του ενεργειακού διακένου του υλικού. Αντίθετα, παίρνει μεγάλες τιμές προς την πλευρά των μικρών μηκών κύματος, άρα η απορρόφηση των αντίστοιχων φωτονίων γίνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια.

Τα ΖΗΟ (ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών) λόγω της φωτοδιέγερσης που δημιουργείται από φωτόνια μεγάλου μήκους κύματος, απορροφώνται στην p περιοχή και διαχέονται στην περιοχή αυτή αφού δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Αν ο χρόνος επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων είναι τ_e τότε το ηλεκτρόνιο διαχέεται σε μία μέση απόσταση

$$L_e = \sqrt{D_e \cdot \tau_e}$$

όπου D_e είναι ο συντελεστής διάχυσης στην p περιοχή.

Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε απόσταση L_e από την περιοχή εξάντλησης μπορούν εύκολα να διαχυθούν μέχρι εκεί. Από την περιοχή αυτή και μετά ολισθαίνουν λόγω του πεδίου E_0 και μεταβαίνουν στην n περιοχή. Έτσι μόνο τα φωτοδημιουργούμενα ΖΗΟ που βρίσκονται σε απόσταση μήκους διάχυσης L_e των φορέων μειονότητας από τη ζώνη εξάντλησης συνεισφέρουν στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Μόλις ένα ηλεκτρόνιο διαχυθεί μέχρι την ζώνη απογύμνωσης, σαρώνεται προς την n -περιοχή από το πεδίο E_0 , δίνοντας έτσι εκεί ένα επιπλέον αρνητικό φορτίο. Οι οπές που παραμένουν στην p -περιοχή δημιουργούν ένα συνολικό θετικό φορτίο στην περιοχή. Τα ΖΗΟ που δημιουργούνται σε απόσταση από την ζώνη εξάντλησης μεγαλύτερη του μήκους

διάχυσης L_e , χάνονται λόγω επανασύνδεσης. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι το μήκος της διάχυσης L_e , είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο. Οι ίδιες αρχές ισχύουν και για τα ΖΗΟ που δημιουργούνται στην n-περιοχή, λόγω της απορρόφησης φωτονίων μικρού μήκους κύματος. Οι οπές που δημιουργούνται εντός απόστασης μικρότερης του μήκους διάχυσης L_h , μπορούν να φτάσουν μέχρι τη ζώνη εξάντλησης όπου και σαρώνονται στην p-περιοχή.

Επομένως, η φωτοδιέγερση των ΖΗΟ που συνεισφέρει στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο λαμβάνει χώρα στην περιοχή μήκους L_h+W+L_e . Αν οι ακροδέκτες της διάταξης είναι βραχυκυκλωμένοι, τότε τα επιπλέον ηλεκτρόνια της n-περιοχής μπορούν να ρεύσουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και να εξουδετερώσουν τις οπές στην p περιοχή. Το ρεύμα που οφείλεται στη ροή των φωτοδιεγερμένων φορέων, ονομάζεται φωτόρευμα I_{ph} . Το φωτόρευμα εξαρτάται από παράγοντες όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης, το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κ.α.

6.ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



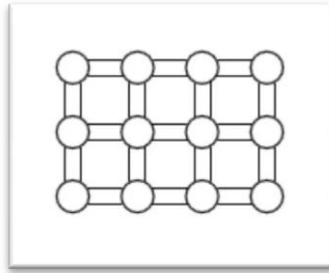
Σχήμα 6.1: Τύποι φωτοβολταϊκών κυττάρων

6.1 Κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

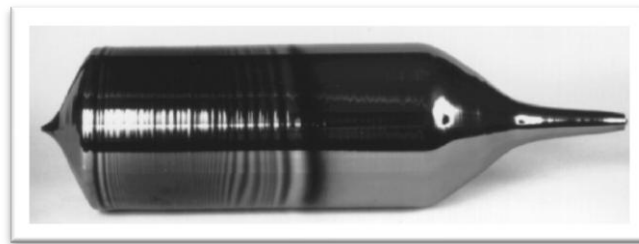
Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν σαν βάση το πυρίτιο, μιας κ βρίσκεται σε αφθονία στον πλανήτη και διότι είναι ο πιο δημοφιλής ημιαγωγός ήδη από το 1950 άρα υπάρχει μεγάλο υπόβαθρο γνώσης πάνω σε αυτό το στοιχείο. Η επικρατούσα τεχνολογία σήμερα είναι αυτή του μονοκρυσταλλικού και του πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

6.1.1 φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου

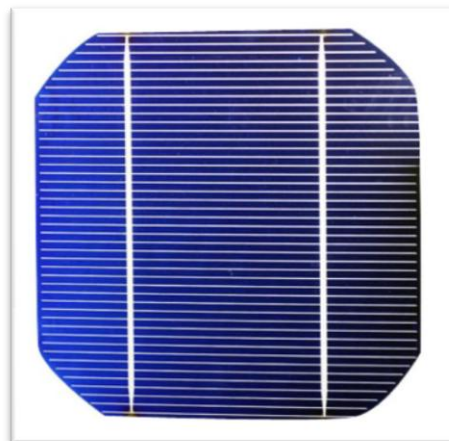
Όπως προαναφέρθηκε, μέχρι πρόσφατα η πλειοψηφία των ηλιακών στοιχείων κατασκευαζόταν από καθαρό μονοκρυσταλλικό πυρίτιο το οποίο είναι απλό, συνεχές κρυσταλλικό πλέγμα και στην πράξη δεν έχει καμία ατέλεια ή πρόσμιξη. Το υλικό αυτό προέρχεται από ένα μικρό γόνιο κρύσταλλο (seed crystal) ο οποίος αποσπάται με αργό ρυθμό από την τηγμένη μάζα του πολυκρυσταλλικού πυριτίου (το οποίο είναι λιγότερο καθαρό). [6] Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (200 έως 400 μm). Τα εργαστηριακά φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν φθάσει σχεδόν σε αποδοτικότητα 24%, με τις εμπορικές μονάδες των κυττάρων τους να κυμαίνονται από 13% έως 16%. Το χρώμα των κυττάρων είναι συνήθως σκούρο μαύρο με μία ενιαία επίπεδη δομή. Στο μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, που παράγεται με τη μέθοδο Czochralski ή με τη μέθοδο Floating zone, τα άτομα του πυριτίου σχηματίζουν 4 χημικούς δεσμούς με τα γειτονικά άτομά τους σχηματίζοντας μία τέλεια κρυσταλλική δομή. Τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά στοιχεία παρουσιάζουν την υψηλότερη απόδοση καθώς και το υψηλότερο κόστος από όλα τα στοιχεία πυριτίου.



Σχήμα 6.1.1.1: Δομή μονοκρυσταλλικού πυριτίου



Σχήμα 6.1.1.2: Ράβδος καθαρού μονοκρυσταλλικού πυριτίου



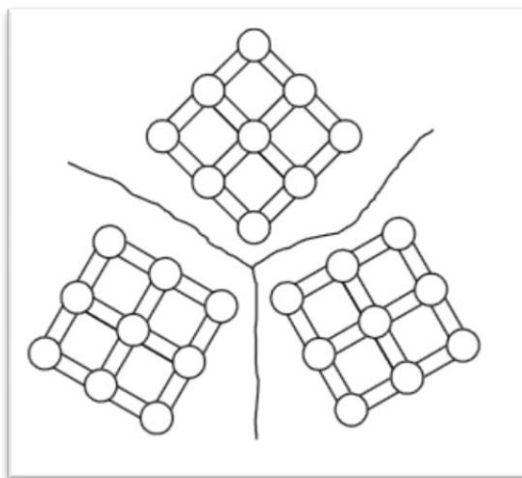
Σχήμα 6.1.1.3: Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου

6.1.2 φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Τα πολύ-κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κατασκευάζονται σε μεγάλες επιφάνειες. Δημιουργούνται από μεγάλες ορθογώνιες ράβδους καθαρού πυριτίου σε ειδικούς κλιβάνους στους οποίους ψύχεται αργά τήγμα πυριτίου με σκοπό τη δημιουργία μεγάλων κρυστάλλων. Συνήθως κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία, είναι μεγαλύτερα από τα μονοκρυσταλλικά και αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα, πάχους 10 μm έως 50 μm. Στην επιφάνεια της κυψελίδας, διακρίνονται οι διαφορετικές μονό-κρυσταλλικές περιοχές. Στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο διατηρείται η κρυσταλλική δομή, αλλά πλέον εμφανίζονται διαφορετικοί κρύσταλλοι πυριτίου. Τα σημεία στα οποία ενώνονται, οι ατέλειες δηλαδή της κατασκευής, λειτουργούν ως κέντρα επανασύνδεσης των φωτοδιεγερμένων φορέων. Η μειωμένη απόδοση εξαιτίας αυτών των ατελειών αντισταθμίζεται με το μικρότερο κόστος

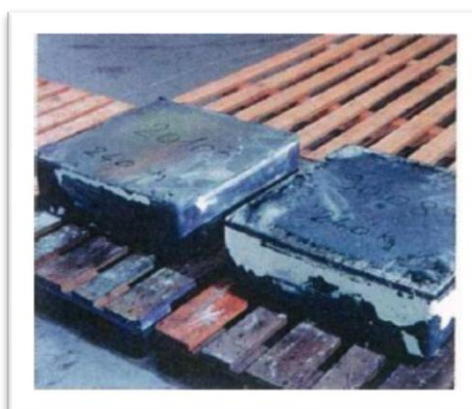
των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σχέση με αυτό των μονοκρυσταλλικών.

Γενικά, όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου, τόσο υψηλότερη είναι και η απόδοσή του, η οποία κυμαίνεται από 17% έως 20%, με τις εμπορικές μονάδες γύρω στο 12%-15%. Χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα. Το κόστος παρασκευής των πολυκρυσταλλικών είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο των μονοκρυσταλλικών. Με την επιλογή κατάλληλου επιστρώματος δημιουργείται μία ποικιλία χρωματιστών φωτοβολταϊκών, με πιο διαδεδομένο χρώμα, το σκούρο μπλε, λόγω της καλύτερης απόδοσης που παρουσιάζει.

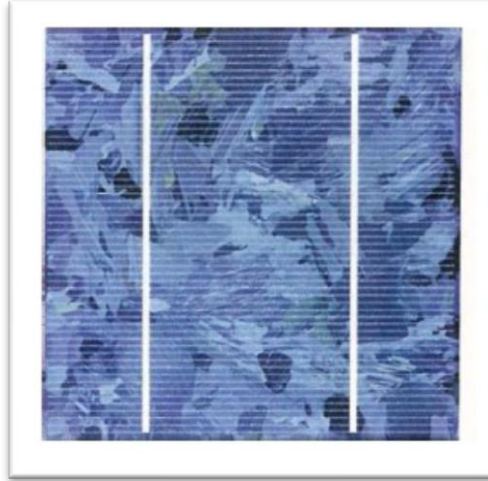


Σχήμα 6.1.2.1: Δομή πολυκρυσταλλικού πυριτίου και οι ατέλειες

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο παράγεται με μεθόδους ανάπτυξης μπαρών πυριτίου οι οποίες τεμαχίζονται προς την κατασκευή των wafers.



Σχήμα 6.1.2.2: Μπάρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου



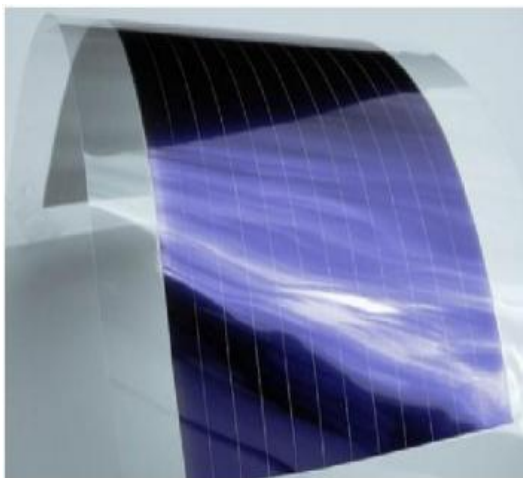
Σχήμα 6.1.2.3: Πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου

6.1.3 φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας (ribbon silicon)

Πρόκειται για τη δημιουργία λεπτής ταινίας από τηγμένο υλικό το οποίο είναι πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με απόδοση περίπου 13%. Η μέθοδος κατασκευής είναι υψηλού κόστους και προς το παρόν η βιομηχανική παραγωγή είναι περιορισμένη.

Εκτός από το πυρίτιο, έχουν χρησιμοποιηθεί και ενώσεις στοιχείων της 13ης και 15ης ομάδας του περιοδικού πίνακα όπως το GaAs το οποίο έχει άμεσο ενεργειακό διάκενο 1.42eV καθιστώντας το ιδανικό για φωτοβολταϊκές εφαρμογές από επιστημονική άποψη και μόνο, καθότι η σπανιότητα του Γαλλίου, άρα και το κόστος του, είναι απαγορευτική για βιομηχανική χρήση. Λόγω της αντοχής του σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς και σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, το αρσενικούχο γάλλιο ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές.

6. 2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων

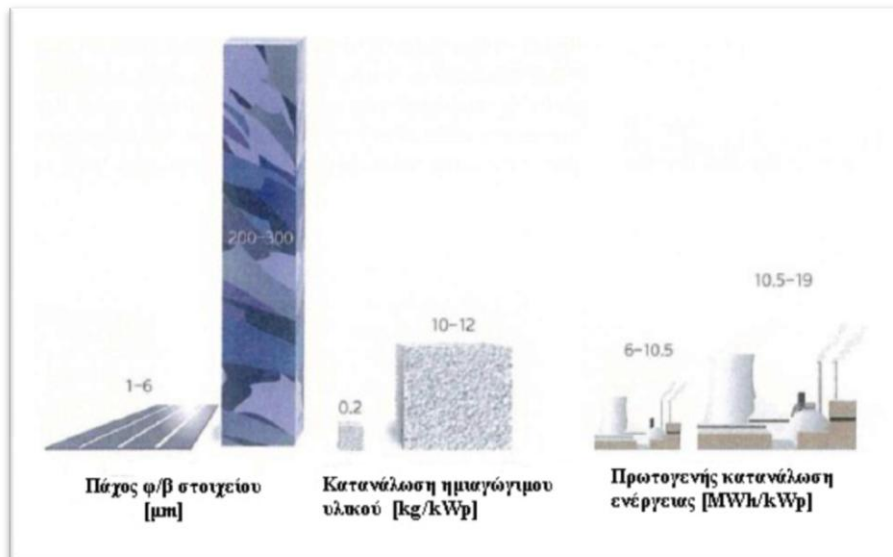


Σχήμα 6.2.1: Φωτοβολταϊκό στοιχείο thin film

Στις τεχνολογίες λεπτών υμενίων (thin film) η επεξεργασία του υλικού γίνεται με μεθόδους που δεν απαιτούν την ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών άρα με μειωμένο κόστος. Το ημιαγώγιμο υλικό τοποθετείται πάνω σε ένα φτηνό υπόστρωμα, όπως γυαλί, πλαστικό ή μέταλλο, σε λεπτές στρώσεις (thin film) με μεθόδους όπως η εναπόθεση ατμών. Έτσι δαπανάται πολύ λιγότερο υλικό μειώνοντας περαιτέρω το κόστος παραγωγής. Στην πίσω επιφάνεια τοποθετείται μεταλλικός αγωγός και στη συνέχεια η όλη διάταξη κόβεται με laser για την παραγωγή μιας σειράς ηλεκτρικά συνδεδεμένων αλλά ξεχωριστών στοιχείων. Μερικά από τα ημιαγώγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή την τεχνολογία είναι το άμορφο πυρίτιο (a:Si), το Copper Indium Diselenide (CuInSe_2), το Gallium Arsenide (GaAs), ή και το Cadmium Telluride (CdTe), που χαρακτηρίζονται από πολύ καλή απορρόφηση του φωτός.

6.2.1 φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous or thin film silicon)

Τα πιο γνωστά ηλιακά στοιχεία της τεχνολογίας αυτής παράγονται από άμορφο πυρίτιο. Με τον όρο άμορφο, εννοείται ότι η συμμετρία του κρυστάλλου καταστρέφεται για αποστάσεις μεγαλύτερες από μερικές ατομικές αποστάσεις. [6] Η απόδοση των στοιχείων μειώνεται έντονα στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 6% έως 8%. Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων φωτοβολταϊκών στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος, με απόδοση που φτάνει σε εργαστηριακά κύτταρα έως 13%. Το ιδιαίτερο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδοχικών στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες πλαισίων.



Σχήμα 6.2.1.1: Σύγκριση κρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου (δεξιά) με στοιχείο thin film (αριστερά)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία thin film δεν έχουν περιορισμούς όσον αφορά την μορφή τους όπως συμβαίνει με τα κρυσταλλικά στοιχεία. Θεωρητικά, το υπόστρωμα μπορεί να πάρει οποιαδήποτε μορφή προτού εναποτεθεί πάνω του το ημιαγωγικό υλικό. Όμως επειδή η διασύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων thin film γίνεται εσωτερικά (με μονολιθογραφία κατά το στάδιο της επίστρωσης του υλικού) και όχι με εξωτερικούς ακροδέκτες όπως με τα wafers, μόνο για πρακτικούς σκοπούς, κατασκευάζονται ορθογώνιες μορφές.

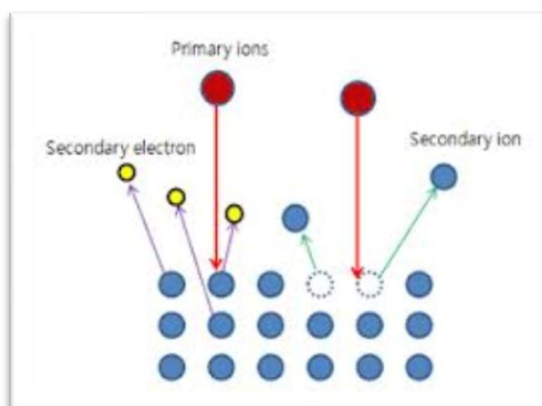
6.2.2 μέθοδοι ανάπτυξης οργανικών και ανόργανων λεπτών υμενίων

Οι τρόποι κατασκευής διαφόρων ειδών thin film καθώς και η επεξήγηση τους παρουσιάζονται παρακάτω:

- Εναπόθεση με βομβαρδισμό ιόντων (sputtering)
 1. DC Sputtering
 2. Pulsed DC Sputtering
 3. RF Sputtering
 4. Magnetron Sputtering

Κατά τη διαδικασία του sputtering, ενεργητικά ιόντα συνήθως ιόντα αργού από την εκκένωση αίγλης (glow discharge) ή πλάσμα αερίου (plasma), βομβαρδίζουν τον στόχο (ως στόχος ή πηγή ορίζεται η κάθοδος της εκκένωσης) και αναγκάζουν τα άτομα της επιφάνειας να οπισθοσκεδάσουν. Μερικά από τα ιόντα αερίου εισχωρούν μέσα στον στόχο και εμφυτεύονται εκεί. Αντίθετα τα άτομα που απομακρύνονται από το στόχο υφίστανται συμπύκνωση κατά την επαφή τους με το υπόστρωμα (την άνοδο της εκκένωσης) σχηματίζοντας λεπτά υμένια. Το πλάσμα είναι μερικά ιονισμένο αέριο μέσα στο οποίο υπάρχουν τρία είδη σωματιδίων, τουλάχιστον. Τα σωματίδια αυτά είναι θετικά φορτισμένα ιόντα, ηλεκτρόνια και ουδέτερα σωματίδια αερίου. Ως εκκένωση ορίζεται το ρεύμα που ρέει δια μέσου του αερίου χαμηλής πίεσης. Αυτό οδηγεί στο σχηματισμό του πλάσματος, το οποίο ακτινοβολεί λόγω αποδιέγερσης των διεγερμένων ατόμων. Τέτοιου είδους πλάσμα απαιτείται για την εναπόθεση υμενίων με την τεχνική sputtering. Οι πυκνότητες των ηλεκτρονίων και των ιόντων είναι ίσες, με συγκέντρωση ηλεκτρονίων 10^{10} cm^{-3} , εκτός από

τις μικρές φορτισμένες περιοχές, που ονομάζονται sheaths, που περιβάλλουν οποιοδήποτε αντικείμενο βρίσκεται σε επαφή με το πλάσμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης των ιόντων.



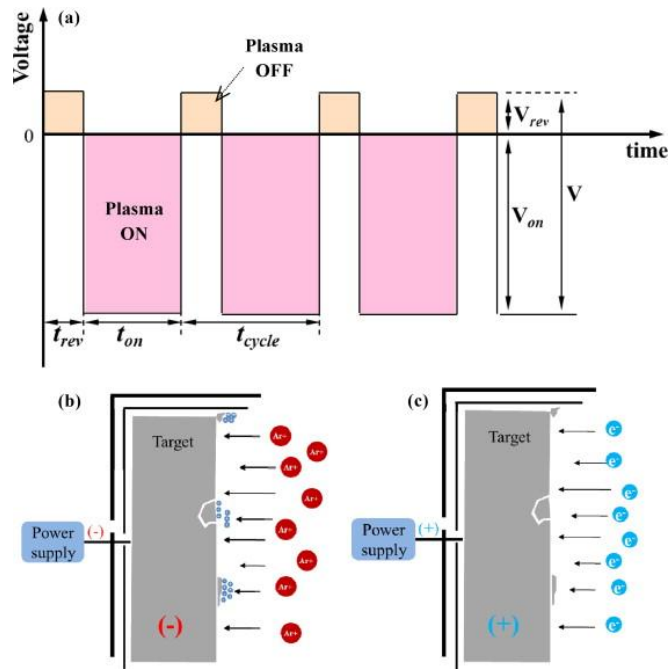
Σχήμα 6.2.2.1: Sputtering

1. DC Sputtering

Η διαδικασία τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ του στόχου (κάθοδος) και του υποστρώματος (άνοδος) δίνεται από μια πηγή DC (Direct Current) υψηλής τάσης μερικών kVolts. Η επιφάνεια του στόχου είναι συνήθως της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων cm^2 και η απόσταση μεταξύ καθόδου και ανόδου είναι της τάξης των λίγων cm . Η άνοδος μπορεί να είναι γειωμένη, αρνητικά πολωμένη ή στον αέρα χωρίς ηλεκτρική σύνδεση. Το αργό είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο αέριο που εφαρμόζεται στην τεχνική sputtering με πίεση 1 Torr. Το αέριο εισάγεται στο θάλαμο και με την εφαρμογή αρνητικής τάσης δημιουργείται πλάσμα. Τα θετικά ιόντα του πλάσματος προσπίπτουν στο στόχο και απομακρύνουν από αυτόν τα ουδέτερα άτομα. Στη συνέχεια, τα άτομα συμπυκνώνονται πάνω στο υπόστρωμα σχηματίζοντας το λεπτό υμένιο. Το πλάσμα συντηρείται από την πηγή DC μέσω μηχανισμών που σχετίζονται με εκπομπές δευτερογενών ηλεκτρονίων στην κάθοδο καθώς και τον επιπλέον ιονισμό ουδέτερων ατόμων του αερίου, που προκαλείται από τις κρούσεις. Η τυπική τιμή της πυκνότητας ρεύματος ιόντων στην κάθοδο είναι 1 mA/cm^2 . Σε αυτή τη μορφή οι εκκενώσεις DC δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως για την εναπόθεση υμενίων, καθώς απαιτείται οι στόχοι να είναι αγώγιμοι. Για το λόγο αυτό η χρήση τους περιορίζεται στην εναπόθεση υμενίων από μεταλλικά υλικά. Η μόνη περίπτωση που ο στόχος είναι μονωτής είναι στην τεχνική DC Magnetron Sputtering. [17]

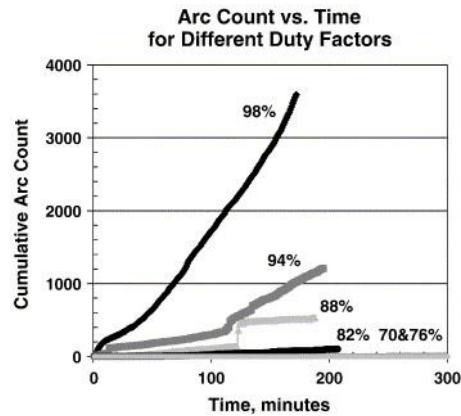
2. Pulsed DC Sputtering

Όταν στην επιφάνεια του στόχου σχηματιστεί ένα μονωτικό φιλμ, αυτό έχει τη δυνατότητα να φορτισθεί. Σε περίπτωση που η τιμή του ηλεκτρικού φορτίου γίνει ίση (ή σχεδόν ίση) με την τιμή της τάσης κατάρρευσης του μονωτικού φιλμ (breakdown voltage) τότε σχηματίζεται ένα ηλεκτρικό τόξο (arc). Ο σχηματισμός του τόξου έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση σωματιδίων του υλικού του στόχου, προκαλώντας υποβάθμιση στην ποιότητα του μονωτικού φιλμ. Λύση σε αυτό το πρόβλημα αποτελεί η χρήση πηγής ισχύος RF, η οποία ωστόσο κοστίζει περισσότερο από την DC. Ο τρόπος λειτουργίας της τεχνικής που εξετάζουμε φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.2.2.2: Τα παραπάνω σχήματα απεικονίζουν: (a) την κυματομορφή εξόδου του παλμικού συνεχούς ρεύματος, (b) την περίοδο εναπόθεσης φιλμ κατά την είσοδο του πλάσματος και (c) την περίοδο καθαρισμού της επιφάνειας του στόχου κατά την έξοδο του πλάσματος.

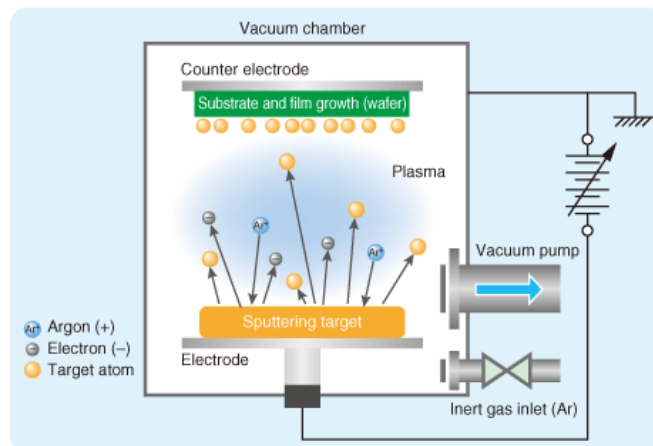
Με την γεννήτρια pulsed DC, η πολικότητα της τάσης που εφαρμόζεται στον στόχο εναλλάσσεται μεταξύ αρνητικών και θετικών τιμών. Κατά τη διάρκεια των αρνητικών τιμών της τάσης, που αποτελεί συνηθισμένη κατάσταση λειτουργίας αυτής της τεχνικής, τα ιόντα έλκονται προς τον στόχο βομβαρδίζοντας τον με αποτέλεσμα την απομάκρυνση ατόμων από αυτόν. Αντίθετα, όταν η τάση έχει θετική τιμή, έλκονται προς τον στόχο τα ηλεκτρόνια του πλάσματος τα οποία αποφορτίζουν τις περιοχές του στόχου που είχαν φορτισθεί. Αφού το μέγεθος και η χρονική διάρκεια που εφαρμόζεται η αρνητική τάση είναι μεγαλύτερα σε σχέση με τα αντίστοιχα της θετικής τάσης, η πηγή ισχύος Pulsed DC ονομάζεται μη συμμετρική και χρησιμοποιείται συνήθως για την εφαρμογή reactive sputtering σε μονωτικά φιλμ. Η συχνότητα παλμού έχει εύρος 70-100 kHz, ωστόσο με την σημερινή τεχνολογία μπορεί να φτάσει τα 300 kHz. Μια άλλη, εξίσου σημαντική παράμετρος για τον έλεγχο της λειτουργίας της γεννήτριας Pulsed DC είναι ο χρόνος που εφαρμόζεται η αρνητική τάση δια του χρόνου που διαρκεί ένας κύκλος (duty circle). Αν ο χρόνος διάρκειας του κύκλου είναι ίσος ή μικρότερος από 65-70%, τότε ο σχηματισμός arcs περιορίζεται ακόμα και για μεγάλης χρονικής διάρκειας reactive εναπόθεση φιλμ μονωτικού υλικού. [18]



Σχήμα 6.2.2.3: Συνάρτηση arc-χρόνου για διαφορετικούς χρόνους διάρκειας κύκλου

3. RF Sputtering

Στη μέθοδο DC Sputtering υπάρχουν στόχοι που είναι από υλικά τα οποία δεν μπορούν να εκτελέσουν την διαδικασία του sputtering επιτυχώς. Αυτό το μειονέκτημα, μπορεί να αντιμετωπιστεί με την μέθοδο RF Sputtering. Πιο συγκεκριμένα, το επιμεταλλωμένο υλικό φτάνει στο υπόστρωμα σε κατάσταση χαμηλής πίεσης με αποτέλεσμα η σκέδαση να μειώνεται και έτσι να οδηγούμαστε σε υψηλή τιμή απόδοσης του sputtering. Επίσης η μέθοδος RF μπορεί να αντανακλά ένα ηλεκτρόνιο και κατόπιν να το χρησιμοποιήσει για ιονισμό, χωρίς περαιτέρω διαδικασία, διότι δυο ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό δυναμικό συγκρινόμενα με το πλάσμα. Συμπερασματικά, η τεχνική RF Sputtering υπερέρχει συγκριτικά με την DC τόσο για τους λόγους που προαναφέρθηκαν όσο και για το γεγονός ότι μπορεί να εφαρμοσθεί και σε μονωτικούς στόχους. Παρόλα αυτά, οι πηγές RF έχουν υψηλότερο κόστος και απαιτούν για τη λειτουργία τους υποστηρικτικό δίκτυο συστημάτων, γεγονός που τις επιβαρύνει με επιπλέον κόστος. Συγκρίνοντας τα δυο είδη πηγών και υποθέτοντας ότι παράγουν την ίδια ισχύ, ο ρυθμός εναπόθεσης της RF είναι σχεδόν υποδιπλάσιος από αυτόν με την χρήση DC. [17]

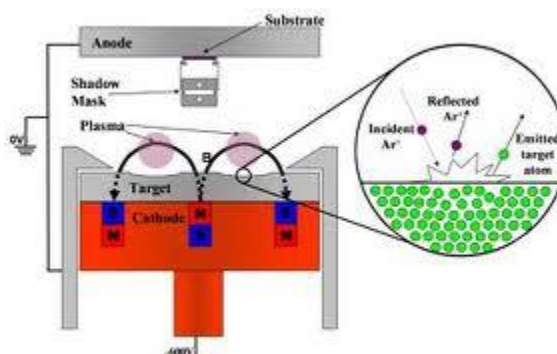


Σχήμα 6.2.2.4: RF Sputtering

4. Magnetron Sputtering

Είναι η μέθοδος για τη βελτίωση της απόδοσης του sputtering με την εγκατάσταση μόνιμου μαγνήτη ή ηλεκτρομαγνήτη στο πίσω μέρος του στόχου με σκοπό τη βελτίωση του ιονισμού του στόχου, συλλέγοντας τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την κάθοδο τοπικά στο μαγνητικό πεδίο που σχηματίζεται εκτός του στόχου και διευκολύνοντας την

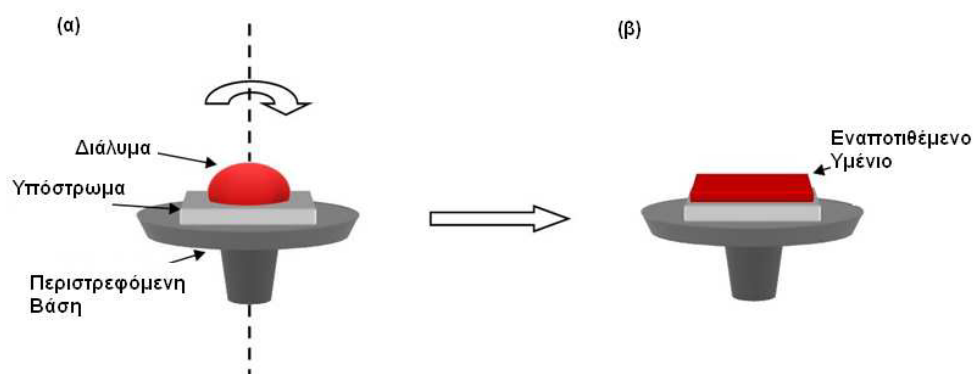
εναπόθεση με αέριο άτομο Ar. Η τεχνική Magnetron Sputtering παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων, ωστόσο έχει και μειονεκτήματα. Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται: η αυξημένη αποδοτικότητα του sputtering, η δυνατότητα χαμηλής θερμοκρασίας του υποστρώματος, η καλή πρόσφυση των σχηματιζόμενων φιλμ με το υπόστρωμα, είναι σχετικά οικονομική μέθοδος εναπόθεσης, υπάρχει καλός έλεγχος και σταθερότητα της διεργασίας σε βάθος χρόνου, με αυτή την τεχνική τόσο κράματα όσο και διάφορες ενώσεις υλικών με διαφορετικές μερικές πιέσεις ατμών μπορούν να υποστούν sputtering. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται τα επόμενα: η κατεύθυνση εισόδου του μαγνητικού πεδίου πρέπει να είναι κάθετη στην επιφάνεια του στόχου, καταναλώνονται πολλοί στόχοι λόγω του προαιρετικού sputtering γύρω από το μαγνητικό πεδίο. [17]



Σχήμα 6.2.2.5: Magnetron Sputtering

- Εναπόθεση οργανικών υλικών με spin coating

Η εναπόθεση με spin coating μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή δειγμάτων στο εργαστήριο αφού είναι ακατάλληλη για μαζική παραγωγή. Είναι μια τεχνική για ανάπτυξη λεπτών υμενίων σε επίπεδα υποστρώματα. Συνήθως χρησιμοποιείται για ανάπτυξη οργανικών διαλυμάτων τα οποία μπορούν να αναπτύξουν λεπτά υμένια πάχους 10nm. [19] κατά την τεχνική της εναπόθεσης spin coating, το διάλυμα απλώνεται στο υπόστρωμα με περιστροφή του υποστρώματος.



Σχήμα 6.2.2.6: Διαδικασία εναπόθεσης με Spin Coating (α) Εναπόθεση διαλύματος και περιστροφή (β)Εναποτιθέμενο υμένιο

Αρχικά γίνεται η τοποθέτηση του υλικού, σε υγρή μορφή, πάνω στο υπόστρωμα. Αυτό μπορεί να γίνει στατικά, πριν την έναρξη της περιστροφής, ή εν κινήσει. Για την ρύθμιση της ποσότητας του υλικού που θα τοποθετηθεί χρησιμοποιείται δοσομετρητής. Λόγω της κεντρομόλου επιτάχυνσης, κατά την περιστροφή, το διάλυμα απλώνεται σχηματίζοντας ένα ομογενές φιλμ πάνω στην επιφάνεια. Τόσο κατά τη διάρκεια της περιστροφής, όσο και μετά, ο διαλύτης εξατμίζεται και το διάλυμα στερεοποιείται. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την εναπόθεση είναι η περιστροφική ταχύτητα, η επιτάχυνση και η διάρκεια της περιστροφής. Επιπλέον, το πάχος και η ποιότητα του υμενίου που δημιουργείται επηρεάζονται από το ιξώδες του διαλύματος, το ρυθμό εξάτμισης του διαλύτη, τη συγκέντρωση του διαλύματος και τις επιφανειακές τάσεις. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου η απώλεια του 90% της πρώτης ύλης καθώς και η μη συμβατότητα της τεχνικής με την παραγωγή roll-to-roll. [20]

- Εναπόθεση οργανικών υλικών με Doctor Blanding

Αντίθετα με την τεχνική spin coating, η παρούσα τεχνική εναπόθεσης είναι πιο συμβατή με τις κοινώς χρησιμοποιούμενες διαδικασίες τυπώματος για μια παραγωγή roll to roll. Το διάλυμα απλώνεται σε ένα υπόστρωμα με τη χρήση λεπίδας. Η λεπίδα που χρησιμοποιείται παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με τις λεπίδες που χρησιμοποιούνται στην ιατρική και για το λόγο αυτό η τεχνική ονομάστηκε doctor blade. Η απόσταση λεπίδας υποστρώματος είναι μερικά μm. Το διάλυμα τοποθετείται μπροστά από τη λεπίδα κ στη συνέχεια εκείνη κινείται κατά μήκος του υποστρώματος. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η εναπόθεση. Το πάχος του δημιουργούμενου υμενίου εξαρτάται από τη φύση του διαλύματος και ορισμένες άλλες παραμέτρους. Παραδείγματα των παραμέτρων αυτών είναι η συγκέντρωση, το ιξώδες του διαλύματος, η ταχύτητα με την οποία κινείται η λεπίδα, η απόσταση αυτής από το υπόστρωμα, η θερμοκρασία της θερμαινόμενης πλάκας.



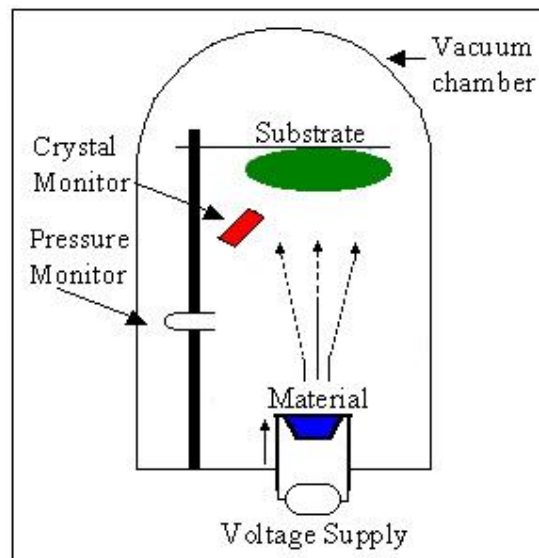
Σχήμα 6.2.2.7: Doctor Blanding

- Εναπόθεση οργανικών υλικών με εκτύπωση (printing)

Οι συμβατικές μέθοδοι ανάπτυξης thin film δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν το πλεονέκτημα των οργανικών φωτοβολταϊκών να έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής. Υπάρχουν διάφορα είδη απευθείας εκτύπωσης υψηλής ανάλυσης όπως εκτύπωση μικροεπαφών, νάνο-αποτύπωση, εκτύπωση οθόνης, ψεκασμού μελάνης, εκτύπωση με χρήση laser. Εδώ θα αναλυθεί η εκτύπωση επί της οθόνης (screen printing) που είναι ευρέως διαδεδομένη. Γίνεται εναπόθεση των βασικών στοιχείων της διάταξης σε μορφή διαλύματος μέσω ανοξείδωτων μηχανικών μασκών. Δίνει τη δυνατότητα παραγωγής μεγάλων διαστάσεων οργανικών φωτοβολταϊκών. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα σχηματοποίησης ώστε να επιλεγθούν τα συγκεκριμένα κομμάτια του υποστρώματος που θα δεχθούν την εναπόθεση. Σε περίπτωση που υπάρχουν πολλά ξεχωριστά, μεγάλου μεγέθους, κελιά το screen printing επιτρέπει στις ξεχωριστές αυτές συσκευές να καθοριστούν πάνω στο ίδιο υπόστρωμα για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής ολόκληρου του συστήματος. [21]

- Εναπόθεση με θερμική εξάχνωση (thermal evaporation)

Η τεχνική της θερμικής εξάχνωσης χρησιμοποιείται για τις εναποθέσεις ανόργανων αλλά και οργανικών υλικών. Για την τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ένα πυρίμαχο σκεύος μέσα στο οποίο τοποθετείται το υλικό που θα εξατμιστεί, δηλαδή ο στόχος. Το σκεύος είναι συνήθως κατασκευασμένο από κεραμικό υλικό όπως το οξειδίο του αργιλίου ή αλουμίνα (Al_2O_3), το διοξείδιο του ζirkονίου ή ζirkονία (ZrO_2), το νιτρίδιο του βορίου και άλλα. Επίσης το σκεύος ενδέχεται να είναι κατασκευασμένο από δύστηκτο μέταλλο όπως βολφράμιο (W), ταντάλιο (Ta) ή μολυβδαίνιο (Mo). Το κριτήριο επιλογής του υλικού είναι να μην αντιδρά χημικά ο στόχος με το σκεύος ή να μην σχηματίζει κάποιο εύτηκτο κράμα. Ο τρόπος θέρμανσης του σκεύους εξαρτάται από το υλικό του. Αν είναι κεραμικό τυλίγεται γύρο του μια αντίσταση. Αν είναι μέταλλο, εφαρμόζεται τάση απευθείας στα άκρα του, μεταδίδεται από μετασχηματιστή και βρίσκεται στην περιοχή των 5-100 Volts. Κρατώντας τη θερμοκρασία του στόχου σταθερή, επιτυγχάνεται σταθερός ρυθμός εξάτμισης και τα υμένα παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή πάχους και υψηλό βαθμό κρυσταλλικότητας. Η διαδικασία γίνεται σε υψηλό κενό για να αποφευχθούν τυχόν συγκρούσεις με μόρια αερίων και για να προκύπτουν υμένα χωρίς περιττές προσμίξεις. [22]



Σχήμα 6.2.2.8: Thermal Evaporation

6.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, δεν μπορεί να γίνει εκμετάλλευση όλου του φάσματος της ακτινοβολίας, καθώς τα φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από αυτή του ενεργειακού διάκενου του ημιαγωγικού υλικού, τα διαπερνούν χωρίς καμία απορρόφηση. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων (multijunction/tandem cell) είναι ενώσεις όπου τα ανεκμετάλλευτα φωτόνια του πρώτου στρώματος φωτοβολταϊκού υλικού, συνεχίζουν την πορεία τους προς το δεύτερο υλικό, το οποίο έχει μικρότερο ενεργειακό διάκενο από το πρώτο, ώστε να διεγείρουν τους φορείς του. Η μέθοδος κατασκευής των thin film έχει συνδυαστεί με αυτή τη δομή, χρησιμοποιώντας άμορφο πυρίτιο, δισεληνοϊνδούχο χαλκό, αρσενικούχο γάλλιο και άλλα στοιχεία, που οδήγησαν στην παραγωγή φωτοβολταϊκών διατάξεων μέγιστης απόδοσης έως και 43.5% (Solar Junction).

6.3.1 Δισεληνοϊδούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS)

Ένα λεπτό πολυ-κρυσταλλικό υλικό, που έχει φθάσει σε εργαστηριακή απόδοση το 17,7%. Πλεονεκτεί στο χαμηλό κόστος κατασκευής του, αλλά σήμερα στην αγορά έχει χαμηλή απόδοση, γύρω στο 10%.

6.3.2 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Ένα λεπτό πολυ-κρυσταλλικό υλικό, που προέρχεται από την ηλεκτροαπόθεση. Παρέχει εξαιρετική εκμετάλλευση ηλιακού φάσματος, αλλά παρουσιάζει δυσκολία δημιουργίας μεταλλικών επαφών. Η απόδοσή του κυμαίνεται περίπου 7-8%.

6.3.3 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Έχει κρυσταλλική δομή παρόμοιας αυτής του πυριτίου, αλλά αποτελείται από στοιχεία Γαλλίου και Αρσενίου. Έχει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, αλλά και υψηλό κόστος κατασκευής. Η απόδοση φτάνει στο 22%.

6.4 Οργανικά φωτοβολταϊκά



Σχήμα 6.4.1: Οργανικό φωτοβολταϊκό

Στα λεγόμενα ηλεκτροχημικά ή οργανικά στοιχεία η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιείται σε οργανικά συστήματα. Τα πολυμερή ηλιακά κύτταρα (πλαστικά ηλιακά κύτταρα) είναι ένας τύπος των οργανικών φωτοβολταϊκών. Είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία εμφανίζεται με την μορφή λεπτού φιλμ. Η αρχική τους μορφή ήταν υγρή και στην πορεία των ερευνών έφτασε σε πηκτή, παχύρρευστη μορφή. Οι ερευνητές προσπαθούν να κατασκευάσουν όσο το δυνατόν πιο στερεά οργανικά στοιχεία, ώστε να σχηματιστεί το πάνελ. Λόγω της ρευστότητας της πρώτης ύλης (υγρό διάλυμα) τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν ευκαμψία. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από πολυχρωμία, λόγω των χρωστικών ουσιών στο διάλυμα.

Η απόδοση των πολυμερών οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει φτάσει σήμερα στο 2,5%. Το βασικό πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών στοιχείων αυτής της τεχνολογίας είναι το εξαιρετικά χαμηλό κόστος παρασκευής τους, γεγονός που επιτρέπει να θεωρείται δυνατή η αξιοποίησή τους ακόμα και με το μειονέκτημα του πολύ μικρότερου χρόνου ζωής τους σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. (για τα οργανικά φωτοβολταϊκά θα γίνει εκτενής ανάλυση σε επόμενο κεφάλαιο)

6.5 Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά

Τα νανοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα ή αλλιώς τα ηλιακά κύτταρα κβαντικών τελείων 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 τελείων μπορούν να προσφέρουν διάφορα πλεονεκτήματα όπως ευκαμψία, χαμηλό κόστος, καθαρή πηγή ενέργειας και απόδοση έως και 65%.

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 χαμηλού κόστους σύστημα αναπτύχθηκε το 1991 από τον Michael Grätzel and Brian O'Regan στην Πολυτεχνική Σχολή της Λοζάνης. [23]

7. ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

7.1 Εισαγωγή

Τα κλασικά φωτοβολταϊκά έχουν υψηλό κόστος κατασκευής σε σύγκριση με τις εναλλακτικές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, το συνεχιζόμενο ενδιαφέρον για αυτή την τεχνολογία προέρχεται από το γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά είναι η μόνη πραγματική φορητή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που είναι διαθέσιμη σήμερα. Ο παράγοντας που δημιουργεί το ουσιαστικό κόστος στην παραγωγή φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι η δαπανηρή επένδυση σε τεχνολογίες επεξεργασίας ημιαγωγών. Λόγω αυτού, η σκέψη για φωτοβολταϊκά στοιχεία που στηρίζονται σε λεπτούς πλαστικούς φορείς, κατασκευάζονται από τεχνικές επίστρωσης και εκτύπωσης από κύλινδρο σε κύλινδρο, και συσκευάζονται με τεχνικές πλαστικοποίησης δεν είναι μόνο ενδιαφέρουσα αλλά και ιδιαίτερα ελκυστική από την άποψη κόστους. Για την εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων, οι υψηλές τεχνολογίες παραγωγής για μεγάλο όγκο επιφάνειας επίστρωσης πρέπει να εφαρμόζονται σε υλικά χαμηλού κόστους. Οι ημιαγωγοί οργανικών και ανόργανων υλικών, έχουν μεγάλες δυνατότητες να εκπληρώσουν αυτές τις απαιτήσεις. Η ευέλικτη χημική ραφή επιτρέπει το σχεδιασμό των οργανικών ημιαγωγών με τις επιθυμητές ιδιότητες, και τις τεχνικές εκτύπωσης ή επίστρωσης. [24]

Την τελευταία δεκαπενταετία έχει γίνει σημαντική αύξηση ενδιαφέροντος για τα ηλιακά κύτταρα που βασίζονται σε οργανικά υλικά. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην ταχεία ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής αγοράς, η οποία έχει υποκινήσει την έρευνα στις πιο μακροπρόθεσμες, πιο καινοτόμες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες, και εν μέρει στην ανάπτυξη των οργανικών ηλεκτρονικών υλικών για τις εφαρμογές επίδειξης.

Η γρήγορη πρόοδος στα οπτικοηλεκτρονικά μοριακά υλικά έχει εισάγει μια σειρά πιθανών νέων φωτοβολταϊκών υλικών, καθώς επίσης και μια βελτιωμένη κατανόηση των ικανοτήτων τέτοιων υλικών και της εμπιστοσύνης στην εφαρμογή και στη χρήση τους.

Οι οργανικές φωτοβολταϊκές διατάξεις (OPVs) είναι ημιαγωγικές διατάξεις οι οποίες αποτελούνται από ένα ή περισσότερα πολυμερικά στρώματα-ταινίες (polymeric films). [25]

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά θα μπορούσαν να θεωρηθούν ιδανικά, αφού 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, ως εκ τούτου, είναι αν η υπόσχεση για χαμηλό κόστος (αν πράγματι επιτευχθεί) μπορεί επαρκώς να αντισταθμίσει τη μείωση (αν και βελτιώνεται) αποδόσεων, ώστε να μπορέσουν τα OPV να γίνουν εμπορικά βιώσιμα.

Παρ' όλη την έρευνα που έχει γίνει για τα OPVs εξακολουθούν να υπάρχουν εμπόδια που αποτρέπουν τη χρήση τους εκτός εργαστηρίου. Το πρώτο είναι η ευαισθησία στο οξυγόνο. Πολλά από τα κύτταρα που παράγονται σε εργαστήρια σήμερα

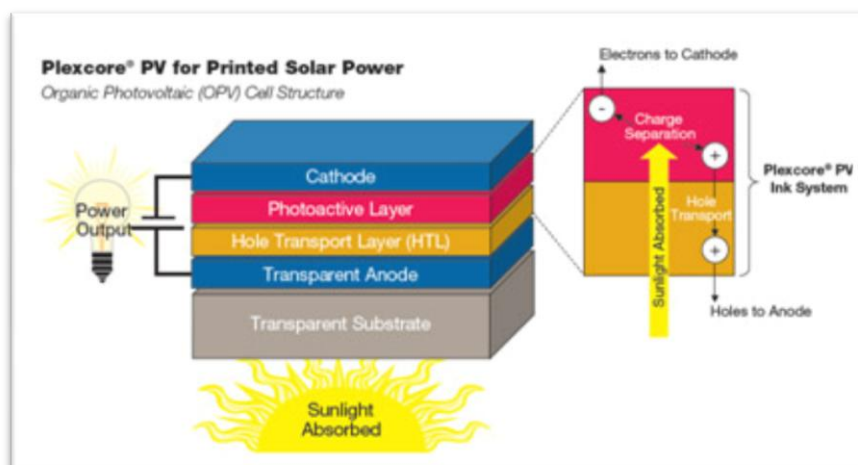
κατασκευάζονται και δοκιμάζονται χωρίς ποτέ να έχουν εκτεθεί στον αέρα (και τη φυσική υγρασία που περιέχει). Παρόλο που υπάρχουν τεχνικές ενθυλάκωσης, θα πρέπει να προστεθούν στο κόστος παραγωγής. Ακόμη και αν τα κύτταρα δεν καταστρέφονται από την έκθεση στον αέρα, πολλά από αυτά θα έχουν μικρή διάρκεια ζωής, επειδή υποβαθμίζονται γρήγορα με την έκθεση στο φως. Ένα άλλο θέμα είναι το μέγεθος των κυττάρων που κατασκευάζονται. Επί του παρόντος, τα περισσότερα κύτταρα κατασκευάζονται για περιοχές της τάξεως του 1 m^2 . Για να είναι όμως αξιοποιήσιμα, θα πρέπει να κατασκευάζονται για περιοχές της τάξης των 10 ή 100 cm^2 και αυτά τα κύτταρα θα πρέπει να είναι σε θέση να συναρμολογηθούν σε μεγαλύτερα πάνελ για περιοχές της τάξεως m^2 . Περαιτέρω θέματα προς επίλυση είναι το πώς μπορεί να αξιοποιηθεί πραγματικά η ενέργεια που παράγεται. Για παράδειγμα, εάν 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. [26]

Τα OPV εντοπίστηκαν για πρώτη φορά ήδη από το 1906, όταν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε στην οργανική σύνθεση anthracene. Το ενδιαφέρον αναζωπυρώθηκε από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 όταν ανακαλύφθηκαν τα πολυμερή, ένα επίτευγμα που επέτρεψε στους επιστήμονες Dr Alan Heeger, Καθηγητής 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.

Όπως και με το συμβατικό πυρίτιο ή τα βαρέα μέταλλα η ένωση μπορεί να δημιουργήσει ημιαγωγούς. Ειδικοί συνδυασμοί υλικών, όπου ένα υλικό ενώνεται με ένα δεύτερο μπορεί να δημιουργήσουν κόμβους δότη και δέκτη ηλεκτρονίων. Η μηχανική αναφέρεται σε αυτά τα υλικά ως ενώσεις τύπου p-n. Τα υλικά μπορεί να αναφέρονται ως p είτε ως n σύμφωνα με το αν τα ηλεκτρόνια (n) ή οι κενές θέσεις ή 'οπές' ηλεκτρονίων (p) είναι η πλειοψηφία του ηλεκτρικού φορτίου.

Αυτές οι διασταυρώσεις είναι θεμελιώδους σημασίας για την ηλεκτρονική και οπτικο-ηλεκτρονική δραστηριότητα. Διαφορετικοί συνδυασμοί οργανικών και οργανικών/ ανόργανων υλικών παρέχουν διαφορετικά επίπεδα δραστηριότητας. Ορισμένες διασταυρώσεις χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρονικές συσκευές, κυρίως ως οργανικές δίοδοι εκπομπής φωτός (OLED) και το αντίστροφο τους, δηλαδή ως οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα που μετατρέπουν φως σε ηλεκτρική ενέργεια και όχι το ηλεκτρικό ρεύμα σε φως. [27]

7.2 Αρχή λειτουργίας



Σχήμα 7.2.1: Παραγωγή ενέργειας στα οργανικά φωτοβολταϊκά

Η θεωρία λειτουργίας των οργανικών ηλιακών κελιών 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. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού δύο λειτουργιών που λαμβάνουν χώρα στον ημιαγωγό όταν προσπίπτει το ηλιακό φως πάνω του. Η πρώτη λειτουργία είναι η παραγωγή, μέσω φωτός, ηλεκτρικών φορτίων (ηλεκτρόνια ή οπές) σε ένα ελαφρύ απορροφητικό υλικό και η δεύτερη είναι ο διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στην αγώγιμη επαφή η οποία θα μετατρέψει το διαχωρισμό αυτό σε ηλεκτρική ενέργεια.

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. Το φωτοενεργό υλικό, που συνήθως είναι ένα μείγμα πολυμερούς με κάποια νανοδομή, τοποθετείται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, ενός διαφανούς, απ' όπου εισέρχεται το φως, και ενός μεταλλικού, σαν παράδειγμα από αλουμίνιο. Όταν φωτιστεί το φωτοενεργό υλικό, το φως που απορροφάται διεγείρει τα ηλεκτρόνια του πολυμερούς. Η διέγερση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση των ηλεκτρονίων από τον πυρήνα, οπότε το πολυμερές εμφανίζεται σαν να σχηματίζεται από δύο τμήματα, ένα με θετικό και ένα με αρνητικό φορτίο. Ο συνδυασμός των δύο αντίθετων φορτίων είναι το εξιτόνιο, το οποίο μπορεί να διαχωριστεί σε ελεύθερα φορτία μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου.

7.2.1 Η έννοια των Εξιτονίων

Ο όρος εξιτόνιο, στους ημιαγωγούς, ορίζει ένα ζευγάρι ηλεκτρονίων-οπών συνδεδεμένο από την δύναμη Coulomb (exciton Wannier). Εξιτόνια υπάρχουν στους ημιαγωγούς, σε μοριακούς κρυστάλλους και στα πολυμερή. Είναι ηλεκτρικά ουδέτερο με μια μόνο διπολική στιγμή.

Ένα εξιτόνιο σχηματίζεται όταν ένα φωτόνιο απορροφάται από κάποιο ημιαγωγίμο 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. Ένα εξιτόνιο μπορεί να θεωρηθεί ως εξιτόνιο Frenkel, 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 (charge transfer). [28]

Η έννοια των εξιτονίων προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Yakov Frenkel το 1931 όταν περιέγραψε τη διέγερση ατόμων σε μια κυψελωτή δομή μονωτών. Πρότεινε ότι αυτή η διεγερμένη κατάσταση θα είναι σε θέση να ταξιδέψει σε μορφή σωματιδίου μέσα απ τη δικτυωτή δομή χωρίς την απόλυτη μεταφορά φορτίου.

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 (10-9 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. Η ανάμιξη 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.

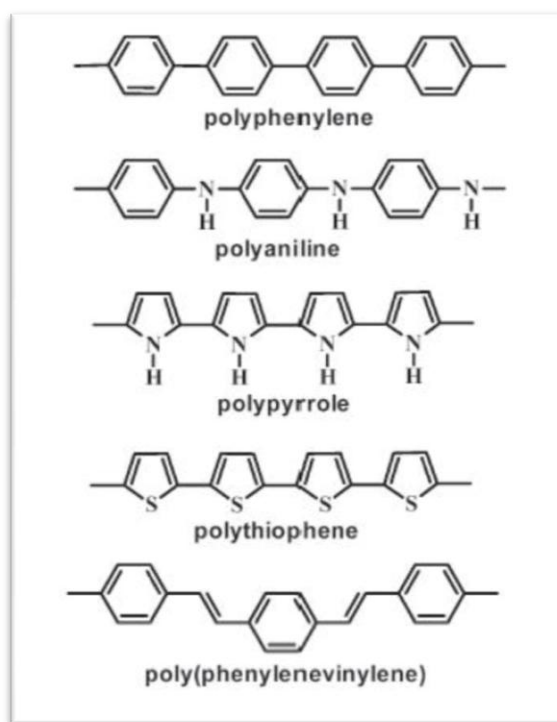
7.2.2 Συζυγή Πολυμερή (Conjugated Polymers)

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). [29]

Τα συνήθη πολυμερή είναι μονωτές του ηλεκτρικού ρεύματος, πράγμα που επιτρέπει σε πολλά από αυτά να χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά (π.χ. στα ηλεκτρικά καλώδια ως περίβλημα του μεταλλικού αγωγού). Παρ' όλα αυτά, η χρησιμοποίηση κατάλληλων πολυμερών υλικών, με τρόπο ώστε να συνδυάζονται οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών ή των μετάλλων με άλλες ιδιότητες (π.χ. χαμηλή πυκνότητα), ανοίγει καινούριους ορίζοντες τόσο στην έρευνα όσο και στην εφαρμογή αυτών των υλικών στη βιομηχανία. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες που έχουν τα πολυμερή τους προσδίδουν πλεονεκτήματα όπως χαμηλό κόστος, χαμηλή τοξικότητα και ευκολία εναπόθεσης σε μεγάλα εύκαμπτα υποστρώματα χαμηλού βάρους. Τέτοιες τεχνικές εναπόθεσης έχουν ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 6. [28]

Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Στα πολυμερή που η μεταφορά φορτίου γίνεται με ιοντικό μηχανισμό και ονομάζονται πολυμερείς ηλεκτρολύτες ή ιοντικά πολυμερή, και στα πολυμερή που ο μηχανισμός μεταφοράς φορτίου είναι κυρίως ηλεκτρονιακής φύσης και ονομάζονται αγώγιμα πολυμερή. Στη συγκεκριμένη εργασία μας ενδιαφέρουν τα αγώγιμα ή αλλιώς συζυγή πολυμερή. [30]

Σε αυτή την κατηγορία υλικών, ο μηχανισμός μεταφοράς φορτίου είναι κυρίως ηλεκτρονιακής φύσης. Μερικά από τα συζυγή πολυμερή που υπάρχουν σε αυτή την κατηγορία είναι:



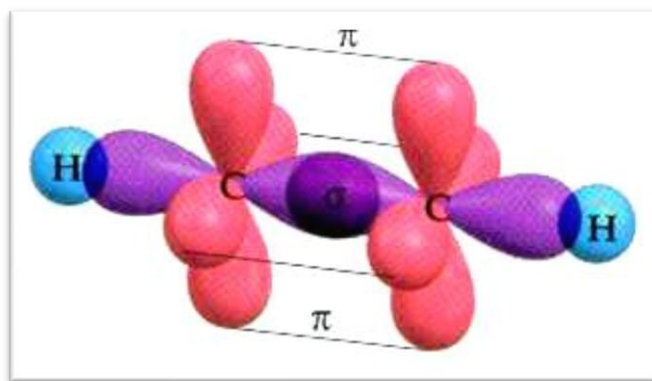
Σχήμα 7.2.2.1: Παραδείγματα αγώγιμων οργανικών πολυμερών

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως τα συζυγή πολυμερή συμπεριφέρονται ως μονωτές ή ημιαγωγοί, ενώ μετά από νόθευση (doping), γίνονται αγωγοί. Ο άνθρακας, είναι το βασικό στοιχείο ενός οργανικού μορίου. Τα άτομα άνθρακα συνδέονται μαζί με ομοιοπολικούς δεσμούς και δημιουργούν μια πολυμερή αλυσίδα, όπου με την σειρά της αποτελείται από μικρές μονάδες, επαναλαμβανόμενες σε όλη την αλυσίδα. Οι μονάδες αυτές ονομάζονται μονομερή και είναι οι δομικές μονάδες του πολυμερούς. [28] Η μόνη ιδιότητα των συζυγών πολυμερών είναι η παρουσία συζυγών διπλών δεσμών κατά μήκος της κύριας στήλης του πολυμερούς το οποίο έχει ως αποτέλεσμα αυτά τα υλικά να έχουν υψηλή ανισοτροπία στην αγωγιμότητά τους, η οποία είναι υψηλότερη κατά μήκος της αλυσίδας. Η ηλεκτρονιακή δομή των συζυγών πολυμερών, όπως ήδη αναφέρθηκε, μπορεί να τροποποιηθεί με χημικές ή ηλεκτροχημικές διεργασίες ντοπαρίσματος. Η χημική αντίδραση που πραγματοποιείται είναι οξείδωση ή αναγωγή αυτών των συζυγών πολυμερών από δέκτες (π.χ. οξέα Lewis) ή δότες ηλεκτρονίων (π.χ. αλκαλιμέταλλα), αντίστοιχα. Η οξείδωση του μακρομορίου αντιστοιχεί σε ντοπάρισμα p-τύπου ενώ η αναγωγή σε ντοπάρισμα n-τύπου. [30]

Στη συζυγία οι δεσμοί μεταξύ του άνθρακα είναι διαδοχικά μονοί και διπλοί. Κάθε διπλός δεσμός περιέχει έναν λιγότερο έντονα εντοπισμένο δεσμό π- που είναι πιο αδύναμος και κάθε απλός δεσμός συνδέεται με ένα σ- δεσμό ο οποίος είναι και πιο ισχυρός. Τα άτομα του άνθρακα συμπεριφέρονται σαν ένας χημικός δεσμός. Η ηλεκτρονική δομή του άνθρακα είναι $1s^2 2s^2 2p^2$, έχοντας έξι ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, από τα οποία μόνο τα τέσσερα μπορούν να αξιοποιηθούν στους δεσμούς. Τα δύο πρώτα αναφέρονται ως ηλεκτρόνια πυρήνα ενώ τα άλλα τέσσερα ονομάζονται ηλεκτρόνια σθένους. Τα ηλεκτρόνια σθένους στο άτομο άνθρακα εκθέτουν την υβριδοποίηση, ένα

αποτέλεσμα της ηλεκτρονικής διέγερσης ενός ή περισσότερων 2s ηλεκτρονίων σε ένα κενό 2p τροχιακό. [28]

Ανάλογα με το πώς τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους στον άνθρακα υβριδοποιούν, ένας έχει την sp^3 , την sp^2 ή την υβριδοποίηση sp . Στα συζυγή πολυμερή, τρία από τα ηλεκτρόνια, δύο με 2p ($2p_x$ και $2p_y$) και ένα με 2s, διαμορφώνουν τρία υβριδοποιημένα $2sp$ τροχιακά. Τρία sp τροχιακά που υβριδοποιούνται, αποτελούνται από τρεις λαβές συμμετρικά κατευθυνόμενες από το xy -plane. Δύο από αυτές θα διαμορφώσουν τη κύρια στήλη του δεσμού σ - ενώ το τρίτο θα δεσμευτεί σε ένα άτομο υδρογόνου. Το τέταρτο ηλεκτρόνιο σθένους θα διαμορφώσει την τροχιακή p στο xy -plane του σ - δεσμού. Η κίνηση των p ηλεκτρονίων είναι αρκετά ελεύθερη σε ορισμένη απόσταση, καθορίζοντας το μήκος της συζυγίας. Ο συνδυασμός που αποτελείται από έναν δεσμό σ - και έναν δεσμό π - ανάμεσα σε δύο άτομα που έχουν δοθεί αναφέρεται ως διπλός δεσμός.



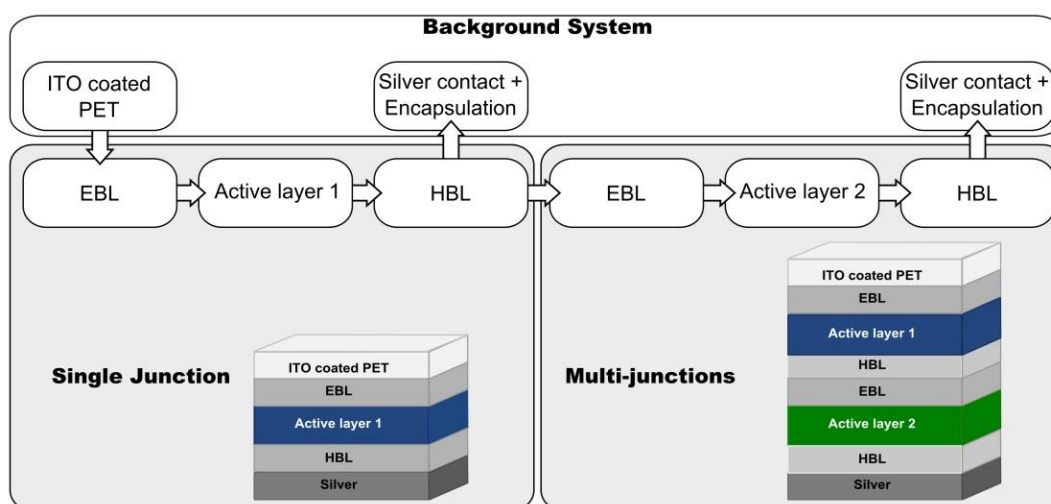
Σχήμα 7.2.2.2: Απλή μοριακή τροχιακή αντιπροσώπευση με δεσμούς τύπου σ και τύπου π

7.2.3 Ηλεκτρονικές Ιδιότητες των Συζυγών Πολυμερών

Τα συζυγή πολυμερή είναι ηλεκτρικοί μονωτές ή ημιαγωγοί. Οι ενεργειακές ζώνες τους έχουν ανάλογη δομή με των ανόργανων υλικών. Οι ιδιότητες των συζυγών πολυμερών ως προς την ημιαγωγική τους συμπεριφορά, συσχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των δεσμών τύπου π -. Οι δεσμοί π - είναι διεσπαρμένοι σε ολόκληρο το μόριο και η κβαντομηχανική επικάλυψη των τροχιακών p_z - σε δύο άτομα του άνθρακα χωρίζει τον εκφυλισμό τους και παράγει δύο τροχιακούς, μια συνδετική τροχιά π - και μια μη συνδετική τροχιά π -. Το τροχιακό π - με την χαμηλότερη ενέργεια παράγει τη ζώνη σθένους, ενώ το τροχιακό π^* - με την υψηλότερη ενέργεια διαμορφώνει τη ζώνη αγωγιμότητας. Τα διάφορα ηλεκτρόνια σε μια πολυμερή αλυσίδα, συμβάλλουν στο σύστημα π - και οι συνδεδεμένες και μη συνδεδεμένες τροχιές εκφυλίζονται περαιτέρω. Αναλόγως με τη ζώνη σθένους και αγωγιμότητας στους ανόργανους ημιαγωγούς, η κατειλημμένη ζώνη π - διαμορφώνει το υψηλότερο κατειλημμένο μοριακό τροχιακό HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) και οι ελεύθερες μορφές ζωνών π^* - διαμορφώνουν το χαμηλότερο μη κατειλημμένο μοριακό τροχιακό, το LUMO του πολυμερούς (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Καθώς η επικάλυψη μεταξύ των γειτονικών τροχιακών p_z και του αριθμού ηλεκτρονίων συμμετέχουν στις αυξήσεις συστημάτων π , τα πλάτη των ενεργειακών ζωνών γίνονται ευρύτερα και το κενό ενέργειας μεταξύ τους μειώνεται. Χάσμα ζώνης είναι διαφορά στην ενέργεια μεταξύ του HOMO και του LUMO και ονομάζεται ενεργειακό διάκενο. Τα χάσματα ζωνών κυμαίνονται από 1.5 σε 3.5 eV, δείχνοντας ότι τα περισσότερα από τα πολυμερή είναι ενεργά στην περιοχή του ορατού μήκους κύματος. Διεγείροντας ένα ηλεκτρόνιο από

τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ισοδύναμο με τη μεταφορά ηλεκτρονίου από ένα δεσμικό τροχιακό σε ένα αντί-δεσμικό τροχιακό, παρέχοντας του ενέργεια μεγαλύτερη από το χάσμα ζώνης. Σε μια πραγματική πολυμερή αλυσίδα η συζυγία είναι απίθανο να επεκταθεί μαζί με το πλήρες μήκος της, καθώς οι ατέλειες και τα ελαττώματα διακόπτουν την τροχιακή επικάλυψη. Αντί αυτού θα υπάρξει μια σειρά τμημάτων αλυσίδων, κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από έναν διαφορετικό αριθμό επανάληψης μονάδων και έχουν ένα διαφορετικό ενεργειακό χάσμα. Τα μικρά τμήματα της αλυσίδας θα έχουν ένα ευρύ ενεργειακό διάκενο, ενώ τα μεγάλα τμήματα θα έχουν ένα στενότερο. Στα στερεά κρύσταλλα υπάρχει μια τρισδιάστατη ηλεκτρονική δομή ζωνών που ανταποκρίνεται στη τρισδιάστατη φύση του κρυστάλλου. Τα πολυμερή είναι μονοδιάστατα συστήματα. Αυτό είναι λόγω της πολύ μακριάς κύριας στήλης των ατόμων άνθρακα. Εκεί οι δεσμοί είναι ισχυρά δεμένοι μεταξύ τους και η αλληλεπίδραση με τις γειτονικές πολυμερείς αλυσίδες είναι μικρή. Ιδιαίτερα, υπάρχει μια ισχυρή ένωση μεταξύ των διεγέρσεων των ηλεκτρονικών και της τοπικής διαμόρφωσης της πολυμερούς αλυσίδας. Αυτό οδηγεί σε μια οικογένεια διεγερμένων καταστάσεων όπως είναι τα εξιτόνια, που αντιπροσωπεύουν τις ηλεκτρονικές διεγέρσεις του πολυμερούς σώματος συνδυασμένες με τις σχετικές στρεβλώσεις του δικτυωτού πλέγματος τους. [28] [31]

7.3 Κατηγορίες οργανικών φωτοβολταϊκών

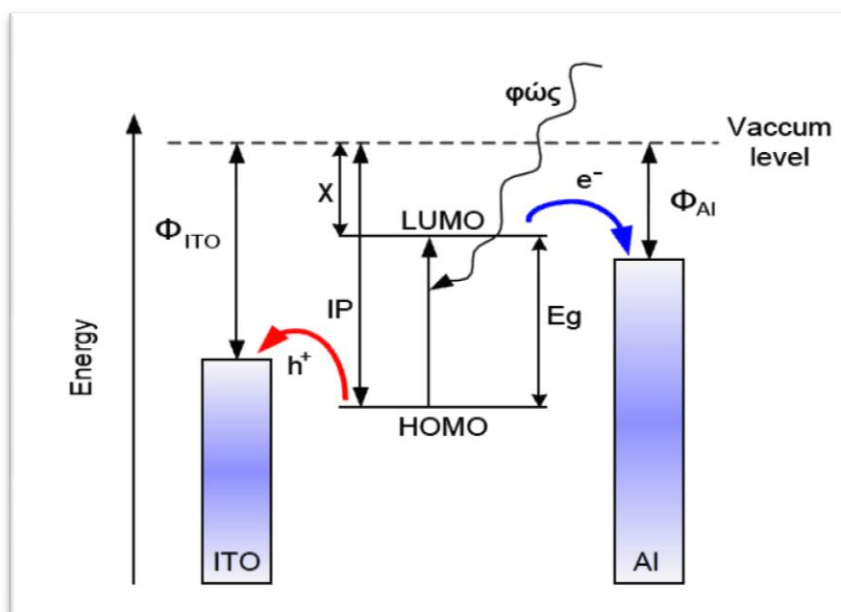


Σχήμα 7.3.1: Μονοστρωματικές, πολυστρωματικές διατάξεις

7.3.1 Μονοστρωματικές διατάξεις (Single Layer)

Η πρώτη προσπάθεια δημιουργίας και ανάπτυξης των οργανικών φωτοβολταϊκών, έγινε με τις μονοστρωματικές διατάξεις. Το ενεργό τους στρώμα αποτελείται από ένα και μόνο οργανικό υλικό (homojunctions), το οποίο βρίσκεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με διαφορά δυναμικού. Ένα εκ των δυο είναι διάφανο ώστε να μπορεί να περνά η ηλιακή ακτινοβολία και να φτάνει στο φωτοευαίσθητο στρώμα. Η όλη λειτουργία στηρίζεται στο οργανικό υλικό της διάταξης αφού σε αυτό γίνεται η απορρόφηση του φωτός, η δημιουργία των εξιτονίων, αλλά και η διάσπαση τους σε ξεχωριστούς φορείς. Μετ' έπειτα, οι φορείς που δημιουργούνται κατευθύνονται ο καθένας σε ξεχωριστό ηλεκτρόδιο εξαιτίας του δημιουργούμενου ηλεκτρικού πεδίου λόγω της διαφοράς δυναμικού των ηλεκτροδίων. Παρατηρήθηκε ότι η διάσπαση των εξιτονίων γινόταν πιο αποτελεσματικά στις επαφές με τα ηλεκτρόδια και λόγω του μικρού μήκους διάχυσης των εξιτονίων στο ενεργό υλικό, η

διαδικασία αυτή δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική, επειδή έχουμε μεγάλη πιθανότητα επανασύνδεσης. Δε συμμετέχει δηλαδή στη διαδικασία δημιουργίας των φορέων όλος ο όγκος του ενεργού υλικού, αλλά μόνο η περιοχή του που βρίσκεται σε επαφή με τα ηλεκτρόδια. Αναφέρουμε ότι το μήκος διάχυσης των φορέων είναι της τάξης των 10 nm, με συνέπεια το πάχος του ενεργού υλικού να πρέπει να είναι και αυτό της ίδιας τάξης μεγέθους. Το πολύ λεπτό φιλμ όμως έχει ως αποτέλεσμα την λιγότερη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας. Για πολλούς οργανικούς ημιαγωγούς το πάχος του υμενίου θα πρέπει να είναι της τάξης των 100 nm, ώστε να απορροφούν ικανοποιητικά. Η αύξηση στο πάχος του υμενίου θα έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη απορρόφηση του φωτός, αλλά μόνο ένα μικρό μέρος από τα δημιουργούμενα εξιτόνια θα μπορούν να φτάσουν στη διεπιφάνεια και να διαχωριστούν. Ένα από τα μειονεκτήματα αυτών των διατάξεων είναι ότι κάποιες φορές το ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διάσπαση των εξιτονίων, δεν είναι τόσο ισχυρό όσο απαιτείται, με συνέπεια η όλη διαδικασία να μην είναι αρκετά αποτελεσματική.



Σχήμα 7.3.1.1: Ενεργειακό διάγραμμα μονοστρωματικής διάταξης

7.3.2 Διστρωματικές διατάξεις

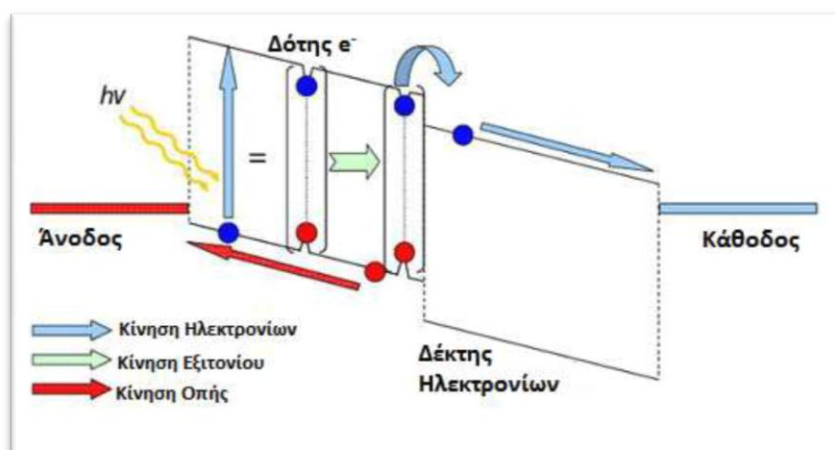
Λόγω των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στις μονοστρωματικές διατάξεις, έγινε αναγκαία η παρασκευή νέων ενεργών υλικών τα οποία αποτελούνται από μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών (heterojunctions), όπου το ένα συμπεριφέρεται σαν δότης ηλεκτρονίων και το άλλο σαν δέκτης. Η χρήση αυτών των διατάξεων οφείλεται στον Tang, ο οποίος χρησιμοποίησε ενεργό υλικό αποτελούμενο από δύο διαφορετικές χρωστικές και είχε σαν αποτέλεσμα μια σημαντική αύξηση στην απόδοση.

Το κοινό χαρακτηριστικό με τις μονοστρωματικές διατάξεις είναι ότι πάλι το ενεργό υλικό τοποθετείται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με διαφορά δυναμικού, λόγω των οποίων οι δημιουργούμενοι, από τη διάσπαση των εξιτονίων, φορείς συλλέγονται στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Η διάσπαση όμως των εξιτονίων οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών λόγω διαφοράς στην ηλεκτρονική συγγένεια (χ) και το δυναμικό ιονισμού (IP) μεταξύ των δύο υλικών. Για τη δημιουργία

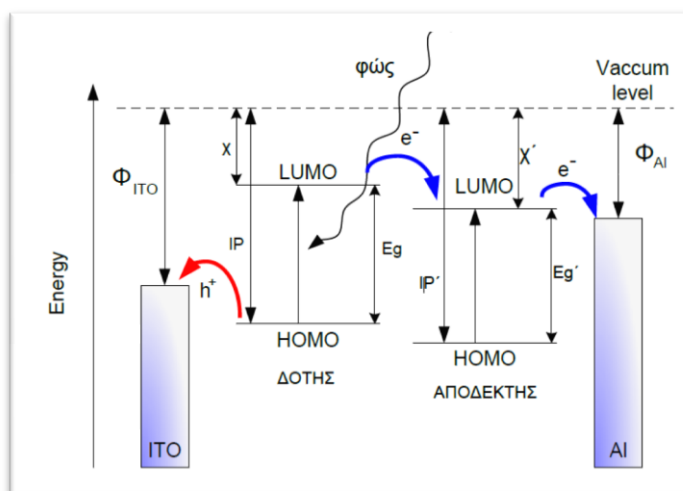
ηλεκτρικού πεδίου που θα ευνοεί το διαχωρισμό των φορτίων, θα πρέπει η ηλεκτρονική συγγένεια όσο και το δυναμικό ιονισμού να είναι μεγαλύτερα στο ένα υλικό (δέκτης ηλεκτρονίων) από ότι στο άλλο (δότης ηλεκτρονίων), με την προϋπόθεση αυτή η διαφορά της δυναμικής ενέργειας να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια δεσμού του εξιτονίου. Η απορρόφηση του φωτός γίνεται από το δότη. Η διέγερση του δότη έχει σαν αποτέλεσμα ένα ηλεκτρόνιο να μεταβεί από το τροχιακό LUMO στο τροχιακό HOMO αφήνοντας πίσω μια οπή. Το ηλεκτρόνιο με την οπή μπορούν να επανασυνδεθούν έχοντας σαν αποτέλεσμα την εκπομπή φωτός ή μπορούν να διαχωριστούν. Ο διαχωρισμός αυτός ευνοείται αν υπάρχει διαφορά στα τροχιακά LUMO μεταξύ του δότη και του δέκτη, οπότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταφερθεί. Βασικό πλεονέκτημα των διατάξεων αυτών είναι ότι η δημιουργία και η διάσπαση των εξιτονίων γίνεται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών που συνθέτουν το ενεργό υλικό και στη συνέχεια οι φορείς που δημιουργούνται, μεταφέρονται σε διαφορετικά υλικά.

Η μορφολογία λοιπόν της διεπιφάνειας των δύο υλικών διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευή αποδοτικών διατάξεων. Η καλύτερη ρύθμιση του ενεργειακού χάσματος (band gap) και συνάμα η βελτιστοποίηση της απορρόφησης του φωτός μπορεί να ρυθμιστεί καλύτερα χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς ημιαγωγούς.

Τα υλικά της διεπιφάνειας μπορεί να αποτελούνται από κάποιο πολυμερές σε επαφή με φουλερένιο ή κάποιο παράγωγό του, πολυμερές σε επαφή με άλλο πολυμερές, πολυμερές σε επαφή με κάποιο άλλο μόριο, επαφή δύο χρωστικών κ.α. Στην περίπτωση της επαφής με το φουλερένιο, στο πολυμερές γίνεται η απορρόφηση του φωτός, η δημιουργία του εξιτονίου στη διεπιφάνεια και ο διαχωρισμός του με την εισαγωγή του ηλεκτρονίου στο φουλερένιο. Επομένως ο δέκτης ηλεκτρονίων είναι το φουλερένιο και ο δότης το πολυμερές. Όπως φαίνεται λοιπόν η καλή αγωγιμότητα στη μεταφορά οπών ή ηλεκτρονίων είναι βασικό χαρακτηριστικό για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις αυτές. Τέλος, σημαντικό ρόλο στην κατασκευή αποδοτικών διατάξεων παίζει ο καλός έλεγχος της διεπιφάνειας μεταξύ δότη και δέκτη. [31]



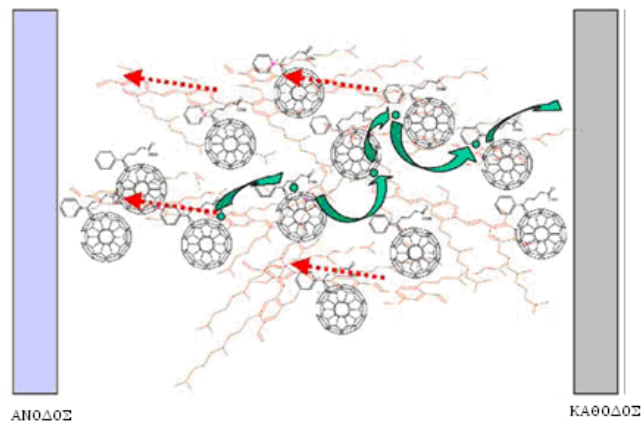
Σχήμα 7.3.2.1: Bi-layer δομή οργανικών φωτοβολταϊκών



Σχήμα 7.3.2.2: Ενεργειακό διάγραμμα διστρωματικής διάταξης

7.3.3 Διατάξεις διεσπαρμένης ετεροεπαφής

Οι περισσότερες εξελίξεις στον τομέα των οργανικών φωτοβολταϊκών έχουν να κάνουν με bulk heterojunction δομές. Η ιδέα πίσω από ένα heterojunction είναι η χρήση δύο υλικών με διαφορετικές ηλεκτροσυγγένειες και δυναμικά ιονισμού. Η έννοια των bulk heterojunction οργανικών φωτοβολταϊκών πρωτοεμφανίστηκε το 1995 από τον Yu et al. και στόχο έχει να περιγράψει ένα μίγμα δότη/δέκτη ηλεκτρονίων. Ένα υλικό ονομάζεται bulk heterojunction αν από οποιοδήποτε σημείο μέσα στο υλικό και σε απόσταση μερικών νανομέτρων συναντούμε διεπιφάνεια δότη/δέκτη ηλεκτρονίων (D/A), αν αυτά δηλαδή εμφανίζονται σαν μίγμα. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο bulk heterojunction, το οποίο δημιούργησαν ο Yu *et al.*, ήταν ένα μίγμα poly[2-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylene vinylene], MEH-PPV, σαν δότη ηλεκτρονίων και cyano-PPV σαν δέκτης ηλεκτρονίων (Yu, Heeger 1995). Μια bulk heterojunction δομή φαίνεται στο σχήμα 7.3.3.1. Σημαντική βελτίωση της σχετικά μικρής συλλογής φορτίων σημειώθηκε με τη χρήση της συγκεκριμένης δομής. Ενώ τα bi-layer OPV's συλλέγουν μια πολύ μικρή ποσότητα φωτονίων λόγω του περιορισμένου πάχους της ενεργής περιοχής, τα bulk heterojunction OPV's λόγω της ανάμιξης του δότη/δέκτη ηλεκτρονίων σε ένα στρώμα έχουν μεγαλύτερες διεπιφάνειες διάσπασης εξιτονίων πράγμα που συνεπάγεται τη δυνατότητα μεγαλύτερου πάχους της φωτοενεργής περιοχής και κατ' επέκταση μεγαλύτερη απορρόφηση φωτονίων. Στην D/A διεπιφάνεια, τα δυναμικά που προκύπτουν είναι ισχυρά και ευνοούν τη διάσπαση των εξιτονίων. Το ηλεκτρόνιο τότε, συλλέγεται από το υλικό με τη μεγαλύτερη ηλεκτροσυγγένεια και η οπή από το υλικό με το χαμηλότερο δυναμικό ιονισμού. Προϋπόθεση ώστε να γίνει αυτό είναι η διαφορά στα δυναμικά των δύο υλικών του bulk heterojunction να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια σύζευξης του εξιτονίου ώστε αυτό να μπορεί να διασπαστεί. [20]

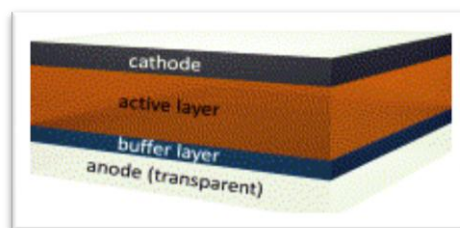


Σχήμα 7.3.3.1: Δομή bulk heterojunction

7.4 Τυπική δομή

Ένα τυπικό οργανικό φωτοβολταϊκό έχει την παρακάτω δομή:

- ❖ Διαφανές ηλεκτρόδιο καθόδου: Χρησιμοποιείται για την απορρόφηση της ακτινοβολίας. Το υλικό που χρησιμοποιείται πιο πολύ είναι το ITO και είναι το σημείο κατά το οποίο συλλέγονται οι σπές.
- ❖ Οργανικό στρώμα: Βρίσκεται ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια και είναι το μέσο στο οποίο δημιουργούνται τα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Μερικά από τα οργανικά υλικά που χρησιμοποιούνται σαν υπόστρωμα είναι τα P3OT, MEH-PPV, PFO.
- ❖ Ηλεκτρόδιο ανόδου: Είναι το σημείο κατά το οποίο συλλέγονται τα ηλεκτρόνια. Συνήθως κατασκευάζεται από αλουμίνιο καθώς και από άλλα υλικά όπως Ca, Mg, Cu κα.



Σχήμα 7.4.1: Τυπική δομή OPV

7.5 Πλεονεκτήματα

Μέχρι στιγμής αρκετά είναι τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα όσον αφορά την περαιτέρω ανάπτυξη των οργανικών πολυμερικών φωτοβολταϊκών διατάξεων. Έτσι μερικά από τα πλεονεκτήματα είναι:

- Έχουν χαμηλό κόστος.
- Μικρό βάρος.
- Μηχανική ευκαμψία και διαφάνεια.
- Το χάσμα ζωνών των οργανικών υλικών μπορεί εύκολα να συντονιστεί χημικά με την ενσωμάτωση διαφορετικών λειτουργικών ομάδων.
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών.
- Σημαντική μείωση του κόστους σε σύγκριση με άλλες πιο παραδοσιακές λύσεις.
- Σημαντικά οικολογικά και οικονομικά πλεονεκτήματα.
- Λόγω των ιδιοτήτων τους (εύκαμπτα και εύκολα προσαρμοζόμενα) μπορούν να ενσωματωθούν σε μαλακές επιφάνειες.
- Επεξεργάζονται πολύ εύκολα με διάφορες τεχνικές:
 1. Spin coating
 2. Doctor Blade techniques (wet processing)
 3. Evaporation (dry processing)
 4. Printing

Αυτά τα χαρακτηριστικά ωφελούν την εμπορευματοποίηση, όμως, όπως και τα άλλα είδη, έτσι και τα οργανικά φωτοβολταϊκά πρέπει να πληρούν τις βασικές απαιτήσεις για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Στην αγορά ενέργειας η ανταγωνιστική θέση της κάθε τεχνολογίας καθορίζεται κυρίως από παράγοντες όπως η αποδοτικότητα, η διάρκεια ζωής και το κόστος (ανά Wp). Θεωρείται πως αν τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι σε θέση να υλοποιήσουν ένα συγκεκριμένο τεχνολογικό προφίλ, τότε θα υπάρξει ουσιαστική ελευθερία για εμπορευματοποίηση. [24]

Τα πολυμερή έχουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα. Σε αντίθεση με το κρυσταλλικό πυρίτιο, το οποίο είναι άκαμπτο και εύθραυστο, πολλοί οργανικά υλικά είναι εύκαμπτα και μπορούν να τοποθετηθούν τόσο σε εύκαμπτα όσο και σε άκαμπτα υποστρώματα. Θα έπρεπε να υπάρχει η δυνατότητα, για παράδειγμα, να αναπτυχθούν προϊόντα OPV που θα είναι εύχρηστα και θα μπορούν να τυλίγονται και να απομακρύνονται όταν δεν χρειάζονται. Τα οργανικά υλικά μπορούν να εναποτεθούν σε πολύ λεπτές στιβάδες που έχουν υψηλή διαφάνεια, έτσι ώστε τα OPV να μπορούν να ενσωματωθούν σε παράθυρα και ημιδιαφανείς προσόψεις. Τα OPVs τείνουν να είναι φωτοενεργά σε ένα ευρύτερο φάσμα του προσπίπτοντος φωτός από ότι τα συμβατικά PV, με αποτέλεσμα τα οργανικά φωτοβολταϊκά να λειτουργούν όχι μόνο σε άμεσο ηλιακό φως, αλλά και σε χαμηλό φωτισμό, σε κλειστούς χώρους και ακόμη και με υπέρυθρη ακτινοβολία (θερμότητα). Μερικά οργανικά PV υλικά δραστηριοποιούνται πάνω από ευρύτερες γωνίες συχνότητας από τα συμβατικά υλικά. [27]

7.6 Μειονεκτήματα

Μερικά από τα πιο κατανοητά προβλήματα που παρουσιάζουν τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι:

- Η παρουσία ισχυρής οδηγούσας δύναμης για την διάσπαση του εξιτονίου.
- Παρατηρείται μικρή κινητικότητα του φορτίου.
- Έχουν σχετικά μικρό χρόνο ζωής που κυμαίνεται σε λιγότερο από 5 χρόνια και μικρή σχετικά με την τεχνολογία του πυριτίου απόδοση, της τάξεως κοντά του 5%. [32]
- Προβλήματα σταθερότητας των διατάξεων (τα οργανικά υλικά είναι ευαίσθητα στο οξυγόνο και την υγρασία)
- Δεν υπάρχουν ακόμη στην αγορά, ωστόσο παρατηρείται έντονη ερευνητική δραστηριότητα (σε ακαδημαϊκά ιδρύματα, ερευνητικά κέντρα και εταιρείες).
- Δυνατότητα / προοπτική (potential) για σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής ή και παραγωγής σε μαζική κλίμακα.

Τα OPVs δείχνουν μια υποσχόμενη τεχνολογική ανάπτυξη μιας και η αποδοτικότητα μέχρι το 10% μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική από το 5% περίπου που ισχύει σήμερα δεν εμφανίζει αναγνωρισμένα εμπόδια. Επίσης η χρησιμοποίηση της τεχνικής roll to roll (R2R) εγγυάται χαμηλό κόστος κατασκευής. Η τεχνική αυτή δίνει τη δυνατότητα της συνεχούς παραγωγής, με γρήγορους ρυθμούς. Όλα τα παραπάνω δημιουργούν την πεποίθηση ότι τα OPVs είναι οι πλέον υποσχόμενες διατάξεις για την επόμενη γενιά των φωτοβολταϊκών διατάξεων.

7.7 Βελτιώσεις

Με τη λειτουργία δύο στοιβαγμένων κυττάρων παράλληλα, τα επίπεδα αποδοτικότητας μπορούν να αυξηθούν περισσότερο. Το 2007, ο Alan Heeger και οι συνάδελφοι του, νικητές του βραβείου Νόμπελ, μαζί με τον Lee, έναν ερευνητή της Νότιας Κορέας, παρουσίασαν ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο με την προσθήκη ενός διπλού στρώματος που απορροφά ένα ευρύτερο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας σε σύγκριση με τα μονού επιστρώματος ηλιακά κύτταρα και επιτυγχάνει μια αποδοτικότητα 6,5%. Ένα polymerfullerene σύνθετο και ένα πολυθειοφένιο σύνθετο ήταν τα κύρια οργανικά συστατικά. Ο Olle Inganäs στο Πανεπιστήμιο Linköping, δηλώνει ότι τα ανώτατα όρια για μια φωτοβολταϊκή κυψέλη με βάση P3HT αναμεμιγμένο με ένα παράγωγο fullerene θα μπορούσαν να είναι περίπου 9%. Ωστόσο υψηλότερες προσμείξεις μπορεί να απαιτήσουν τελικά πιο πολύπλοκες συσκευές.

Το εντυπωσιακά λεπτό υλικό που μπορεί να επιτευχθεί από υμένιο OPV απεικονίζεται με ένα προϊόν της έρευνας του Ηνωμένου Βασιλείου. Οι επιστήμονες στο Cambridge University Cavendish Laboratory έχουν κατορθώσει να τοποθετήσουν δύο ημιαγώγιμα πολυμερή σε ένα υμένιο πάχους 100 νανόμετρα, σε σύγκριση με τα περίπου 200 μικρά από πυρίτιο, στα συμβατικά ηλιακά κύτταρα. Υποστηρίζουν ότι η τεχνολογία τους υπόσχεται αποδόσεις έως 5%.

Αναμφισβήτητα το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των οργανικών φωτοβολταϊκών είναι το προσιτό κόστος τους. Οι ειδικοί υπολογίζουν ότι το ανέξοδο πλαστικό υλικό των φωτοβολταϊκών που εναποτίθεται στο υπόστρωμα με συνεχή διαδικασία θα μπορούσε να μειώσει το κόστος μέχρι και κάτω από το κρίσιμο US \$ 1,00 ανά watt, όριο που απαιτείται για την ισοτιμία του δικτύου. (Πηγές του κλάδου δείχνουν ότι μπορεί να πάρει άλλη μια

δεκαετία για το πυρίτιο να πέσει στο US \$ 1,00 / watt, από το σημερινό επίπεδο του US \$ 2.3 / watt). Η σκέψη είναι ότι το OPV θα μπορούσε να πάρει αυτή τη τιμή νωρίτερα. Σύμφωνα με εκπρόσωπο της εταιρείας Plextronics, η τεχνολογία OPV υπόσχεται κόστος φωτοβολταϊκών τέσσερις ή πέντε φορές χαμηλότερο από αυτό των συστημάτων κρυσταλλικού πυριτίου. [27]

8.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

8.1 Αναφορικά

Κατηγορίες εφαρμογών φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα απευθύνονται σε περιοχές εφαρμογών, όπου το σχετικό υψηλό κόστος τους δεν αποτελεί σημαντικό εμπόδιο. Οι εφαρμογές αυτές συνήθως χαρακτηρίζονται από:

- Χαμηλές ενεργειακές ανάγκες.
- Έλλειψη εναλλακτικών τρόπων παροχής ενέργειας ή, όπου αυτοί υπάρχουν, είναι πολύ ακριβοί (π.χ. σύνδεση με ένα απομακρυσμένο δίκτυο).
- Απαιτήσεις υψηλής αξιοπιστίας ή και χαμηλές ανάγκες συντήρησης.

8.1.1. Καταναλωτικά προϊόντα (0,001Wp-100Wp)



Σχήμα 8.1.1.1: Φακός που φορτίζεται με ηλιακή ενέργεια

Τα συστήματα της κατηγορίας των καταναλωτικών προϊόντων χρησιμοποιούνται σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο ή σε τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, κλπ., για την εξυπηρέτηση αναγκών φωτισμού και ψύξης και για προϊόντα όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φακοί κ.ά.

8.1.2. Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100Wp – 200KWp)

Στα αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα συγκαταλέγονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και μικρούς οικισμούς που δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Ακόμη χρησιμοποιούνται για:

- Αφαλάτωση / άντληση / καθαρισμό νερού
- Φωτισμό (δρόμων , πάρκων , αεροδρομίων)
- Συστήματα τηλεπικοινωνιών (τηλέφωνο, ραδιόφωνο, τηλεόραση), τηλεμετρήσεων και συναγερμού (φωτιά, ομίχλη, πλημμύρες)
- Συστήματα σηματοδότησης (οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας)
- Ψύξη (αγροτικών προϊόντων , φαρμάκων κ.λπ.)

8.1.3. Συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο (200kWp έως αρκετά MWp)



Σχήμα 8.1.3.1: Φωτοβολταϊκό πάνελ τοποθετημένο σε στέγη

Η τρίτη κατηγορία είναι τα συνδεδεμένα συστήματα με το δίκτυο, που σύμφωνα με τις συμβατικές θεωρήσεις δεν θεωρούνται, προς το παρόν, οικονομικά βιώσιμη λύση. Αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες συστημάτων:

- Φωτοβολταϊκά συστήματα μεγέθους έως μερικών εκατοντάδων kWp που τροφοδοτούν κατοικίες, συγκροτήματα κατοικιών ή άλλα κτίρια και όπου η τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια τροφοδοτείται (πωλείται) προς το δίκτυο
- Φωτοβολταϊκοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο.

Για τα φωτοβολταϊκά συστήματα που αναρτώνται σε κτίρια (σε προσόψεις, οροφές, κλπ.), σε σύνδεση με το δίκτυο, τελευταία έχει εκδηλωθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τα οφέλη που προκύπτουν είναι:

- Συγχρονισμός ψυκτικών φορτίων κτιρίων με μέγιστη παραγόμενη ισχύ από Φ/Β
- Αποφυγή χρήσης γης
- Αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Επίσης, γίνεται προσπάθεια για χρήση των φωτοβολταϊκών και ως δομικών στοιχείων στα κτίρια, αυξάνοντας έτσι τα οικονομικά οφέλη πέραν αυτών που ήδη αναφέρθηκαν.

Κυριότερες εφαρμογές φωτοβολταϊκών

Η επιστήμη έχει κάνει μεγάλα άλματα στον τομέα των φωτοβολταϊκών από την εμφάνισή τους. Φωτοβολταϊκές διατάξεις έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς σε πάρα πολλούς τομείς. Στον τομέα των τηλεπικοινωνιών η εφαρμογή των φωτοβολταϊκών καθιστά τερματικούς σταθμούς και αναμεταδότες αυτόνομους καθώς και αξιόπιστους, σε περιοχές δύσβατες και απροσπέλαστες. Στις διαστημικές εφαρμογές επίσης, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως φωτοβολταϊκά μιας και αντλούν την ενέργειά τους από τον ήλιο, διατηρώντας έτσι την αυτονομία τους. Αυτόνομα συστήματα φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούνται ακόμη σε περιοχές ανά τον κόσμο, όπου δεν φτάνει το εκάστοτε ηλεκτρικό δίκτυο. Σημαντική βοήθεια προσφέρουν επίσης στο ηλεκτρικό δίκτυο τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά πάρκα μιας και παρουσιάζουν μεγάλη απόδοση τις μεσημεριανές ώρες όπου η ζήτηση

φορτίου είναι ιδιαίτερος αυξημένη. Προσπάθειες ακόμη έχουν γίνει σε διάφορες χώρες για την υποστήριξη αυτόνομων συστημάτων μικρής κλίμακας εντός πόλεων, όπως σε εκδοτήρια εισιτηρίων, παρκόμετρα και στάσεις λεωφορείων, προκειμένου να αποσυμφορηθεί η ενεργειακή ζήτηση του κεντρικού δικτύου. Τέλος, η επιστήμη έχει στραφεί στη χρήση φωτοβολταϊκών τόσο στον τομέα των μεταφορών εμπορευμάτων, όσο και σε αυτόν των γενικότερων μετακινήσεων. Ένας από τους βασικότερους λόγους για αυτό είναι η σημαντική μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

8.2 Παραδείγματα

Η αύξηση της αποδοτικότητας, η μείωση του κόστους και η ελάχιστη ρύπανση είναι οι βάσεις των φωτοβολταϊκών συστημάτων που έχουν οδηγήσει στην ευρεία εφαρμογή τους. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες μελέτες.

1. Εφαρμογή σε κτίρια

Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών και των ιδιοτήτων τους σε δομικά υλικά (BIPV), όπως στέγες, πλευρικά τοιχώματα, και υαλοπίνακες προσφέρει πλεονεκτήματα στο κόστος και την εμφάνιση καθώς έχουν αντικαταστήσει τα συμβατικά υλικά στις νέες κατασκευές. Επιπλέον, οι εγκαταστάσεις αυτές είναι περισσότερο ελκυστικές αρχιτεκτονικά σε σύγκριση με τις κατασκευές φωτοβολταϊκών στις οροφές. Έχει προταθεί, από τον Υοο, ο σχεδιασμός κτιρίων τα οποία θα χρησιμοποιούν την σκίαση που προσφέρουν οι μονάδες φωτοβολταϊκών το καλοκαίρι, ούτως ώστε να μειώσουν τα φορτία ψύξης, ενώ την ίδια στιγμή θα επιτρέπουν στην ηλιακή ενέργεια να εισέλθει στο κτίριο κατά την περίοδο που απαιτείται θέρμανση για την παροχή φωτός ημέρας. Κατόπιν πρέπει να γίνει ανάλυση της απόδοσης του συστήματος, αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος καθώς και της ισχύος εξόδου. Επίσης έχουν ήδη περιγραφεί, από τον Βακος, οι εγκαταστάσεις, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, η λειτουργία και η οικονομική αξιολόγηση των διασυνδεδεμένων σε κτίριο ολοκληρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων (BIPV) και οι τεχνικοί και οι οικονομικοί παράγοντες, που εξετάστηκαν με τη χρήση αυτοματοποιημένων ανανεώσιμων ενεργειακών τεχνολογιών (RETs). Ο Ordenes ανέλυσε το δυναμικό επτά BIPV τεχνολογιών που εφαρμόζονται σε μια κατοικημένη πρωτότυπη προσομοίωση σε τρεις διαφορετικές πόλεις της Βραζιλίας και εκτελούνται προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το εργαλείο λογισμικού EnergyPlus για την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών ως επιπλέον τροφοδοσία στην ενεργειακή ζήτηση των κτιρίων. Ο Xu ανέπτυξε και αξιολόγησε τις επιδόσεις ενός κτιρίου το οποίο με την εφαρμογή μιας νέας τεχνολογίας στο περίβλημα του θα έχει την ικανότητα να ρυθμίζει τη θερμοκρασία του (ψύξη ή θέρμανση) μέσω της αλληλεπίδρασης του με τον ήλιο με τη χρήση φωτοβολταϊκών (PV) και θερμοηλεκτρικών (TE) τεχνολογιών. Ο Chow περιγράφει την αποτελεσματικότητα της ψύξης με τη βοήθεια ενός φυσικού ρεύματος αέρα εξαερισμού που θα βασίζεται σε δύο επιλογές ψύξης με ένα διάκενο αέρος μεταξύ των φωτοβολταϊκών πάνελ και της εξωτερικής πρόσοψης: (i) ένα ανοικτό διάκενο αέρος με αναμειγμένη μεταφορά θερμότητας, και (ii) μια ηλιακή καμινάδα με κατακόρυφη ροή και διαπίστωσε ότι η αποτελεσματική ψύξη του φωτοβολταϊκού πάνελ μπορεί να αυξήσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλιακά στοιχεία.

2. Μονάδα αφαλάτωσης

Ο Lamei συζήτησε την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κατά την οποία η ηλιακή ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί οικονομική και να χρησιμοποιηθεί για RO (αντίστροφη όσμωση) αφαλάτωση που είναι ανεξάρτητη από την ικανότητα της εγκατάστασης και πρότεινε μια εξίσωση για να εκτιμήσει το κόστος παραγωγής ανά μονάδα αφαλάτωσης που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του κόστους ανά μονάδα παραγωγής για την αφαλάτωση νερού με χρήση φωτοβολταϊκών, βασισμένη στις τρέχουσες και τις μελλοντικές τιμές των φωτοβολταϊκών. Ο Kershner έχει μελετήσει μια πειραματική μονάδα για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού με την διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης (SWRO), η οποία θα τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) στην ακτή της Λιβύης της Μεσογείου τόσο με την μετατροπή της αιολικής ενέργειας (WEC) όσο και με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών (PV). Ο Hasnain πρότεινε μια απλή εγκατάσταση ηλιακού αποστακτήρα με χωρητικότητα 5,8 m³ ανά ημέρα για την διαδικασία απόρριψης άλμης που λαμβάνεται από φωτοβολταϊκή μονάδα αφαλάτωσης, η οποία μπορεί να διαμορφωθεί και να λειτουργήσει ως 100% με ηλιακή ενέργεια, για κάθε θέση και κάθε ποιότητα υφάλμυρου νερό και διαπίστωσε ότι οι ηλιακοί αποστακτήρες για μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις είναι πιο βιώσιμοι για χρήση σε απομακρυσμένη περιοχή, όπου η αξία της γης είναι αμελητέα, καθώς οι ηλιακοί αποστακτήρες είναι εύκολο να εγκατασταθούν και να κατασκευαστούν με τοπικά διαθέσιμα υλικά.

3. Διάστημα

Ο Seboldt ανέπτυξε ένα νέο σχέδιο για έναν δορυφόρο της γης τροφοδοτούμενο από ηλιακή ενέργεια, Solar Power Satellite (SPS). Αυτός ονομάζεται 'European Sail Tower SPS' και χαρακτηρίζεται ως ένας εξαιρετικά ελαφρύς και μεγάλος πύργος που μοιάζει με δορυφόρο και έχει τη δυνατότητα να εφοδιάσει την Ευρώπη με σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία και θα μεταφέρεται στη Γη μέσω μικροκυμάτων. Ο Girish μελέτησε τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών κατά τη διάρκεια της νύχτας σε πλανητικά σώματα όπως η Σελήνη χρησιμοποιώντας το ανακλώμενο φως από κοντινά πλανητικά αντικείμενα με βάση την τελευταία, χαμηλής έντασης και χαμηλού φωτισμού (LILT), τεχνολογία των ηλιακών στοιχείων.

4. Οικιακά ηλιακά συστήματα

Ο Bond περιγράφει την πρόσφατη εμπειρία και τις δοκιμές στο Ανατολικό Τιμόρ στα ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV), με την εισαγωγή στα οικιακά ηλιακά συστήματα (SHS). Ο Posorski προτείνει οικιακά ηλιακά συστήματα, που είναι ελκυστικά λόγω του κόστους τους και μπορούν να υποκαταστήσουν αποτελεσματικά τις μπαταρίες με τελικό σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ως εκ τούτου να συμβάλλουν σημαντικά στην προστασία του περιβάλλοντος.

5. Σωληνώσεις

Ο Rande σχεδίασε και ανέπτυξε σωληνώσεις που φέρουν φωτοβολταϊκά για την καλλιέργεια σε οπωρώνες σε άνυδρες περιοχές, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες

παραμέτρους όπως το μέγεθος της αντλίας, τις απαιτήσεις νερού, την ημερήσια διακύμανση στην πίεση της αντλίας λόγω αλλαγής στην ποσότητα της ακτινοβολίας. Ο Meah συζήτησε ορισμένες πολιτικές για να κάνει τη χρήση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στην άντληση νερού (SPVWP) ένα κατάλληλο σύστημα τεχνολογίας για την αντίστοιχη περιοχή εφαρμογής του, σε θέματα τεχνικά, οικονομικά, και περιβαλλοντικά στις ανεπτυγμένες χώρες.

6. Τεχνολογία φωτοβολταϊκών και θερμικών συλλεκτών

Ο Chow περιγράφει μια πειραματική μελέτη μιας κεντρικής εγκατάστασης φωτοβολταϊκών και συλλέκτη ζεστού νερού που μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα σύστημα προθέρμανσης του νερού. Οι συλλέκτες τοποθετούνται σε κάθετες προσόψεις καθώς προτιμάται η φυσική κυκλοφορία του νερού. Η θερμική απόδοση βρέθηκε ίση με 38,9% σε θερμοκρασία μηδέν βαθμών, ενώ η αντίστοιχη απόδοση μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 8,56% [140]. Ο He πρότεινε τη χρήση υβριδικών φωτοβολταϊκών και θερμικών συλλεκτών (PVT) χρησιμοποιώντας το νερό ως ψυκτικό μέσο ως λύση για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Ο Vokas μελέτησε τον συνδυασμό ενός φωτοβολταϊκού-θερμικού συστήματος για οικιακή θέρμανση και ψύξη και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα μπορεί να καλύψει ένα αξιοσημείωτο ποσοστό των εγχώριων απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης. Ο Othman μελέτησε έναν υβριδικό φωτοβολταϊκό-θερμικό (PV / T) ηλιακό συλλέκτη για την παραγωγή τόσο ηλεκτρικής ενέργειας όσο και θερμικής και πέτυχε βελτιώσεις στην συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος με τη χρήση ενός συλλέκτη double-pass και πτερυγίων. [33]

8.3 Εφαρμογές

➤ Επικάλυψη στεγών και τοίχων σε κτίρια

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν δυνατότητα να τοποθετηθούν σε στέγες κατοικιών, καθώς και να ενσωματωθούν σε στέγες ή και τοίχους κτιρίων, μη οικιακών. Αυτή η εφαρμογή θα προσφέρει σημαντικά οφέλη καθώς δίνεται προοπτική τοποθέτησης φωτοβολταϊκών σε εμπορικά, βιομηχανικά και εκπαιδευτικά κτίρια. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να αντικαταστήσουν και να παίξουν τον ρόλο ορισμένων οικοδομικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε στέγες και τοίχους με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος τους. Επιπλέον, τα εμπορικά και τα βιομηχανικά κτίρια χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της ημέρας με αποτέλεσμα να φαίνεται χρήσιμη η ηλιακή ακτινοβολία. Η ισχύς που παράγεται μπορεί να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τις ανάγκες αγοράς ηλεκτρισμού από το δίκτυο επίσης, τα φωτοβολταϊκά υποκαθιστούν ηλεκτρισμό που θα χρεωνόταν με τιμή καταναλωτή και όχι τιμή που προσφέρεται σε ανεξάρτητο παραγωγό. Παράδειγμα αυτής της εφαρμογής αποτελεί η Ελβετία που υπάρχουν φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε στέγες και τοίχους και βρίσκονται σε σύνδεση με το δίκτυο. [6]

➤ Φωτοβολταϊκά συστήματα σε αναπτυσσόμενες χώρες

Στις αναπτυσσόμενες χώρες, και κυρίως στις αγροτικές περιοχές των χωρών αυτών, το ηλεκτρικό δίκτυο δεν έχει επεκταθεί με αποτέλεσμα όλες οι μορφές ενέργειας να είναι ακριβές. Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να είναι μια ανταγωνιστική λύση, κυρίως σε περιοχές

με υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Μπορούν να βρουν εφαρμογή στην άντληση νερού, άρδευση, παροχή πόσιμου νερού, ψύξη για συντήρηση εμβολίων σε κέντρα υγείας, σε συγκροτήματα κατοικιών για φωτισμό, για οδοφωτισμό.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναγνωρίσει τις δυνατότητες συνεισφοράς των φωτοβολταϊκών στην βελτίωση του βιοτικού επιπέδου 1,1 δις. ανθρώπων που βρίσκονται κάτω από το όριο της φτώχειας, σύμφωνα με την World Bank. Έχει προταθεί το σχέδιο Power for the World σύμφωνα με το οποίο θα εγκατασταθούν σε χωριά 10 W ανά άτομο με σκοπό την κάλυψη βασικών αναγκών σε θέματα υγείας, φωτισμού, μόρφωσης και επικοινωνίας, με την συνεργασία αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών. [6]

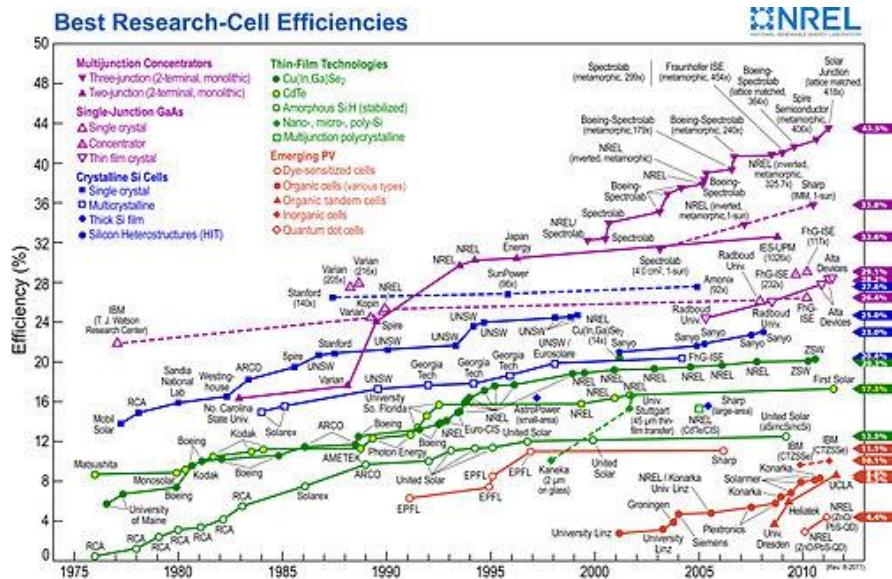
➤ Φωτοβολταϊκά συστήματα σε σύνδεση με το δίκτυο

Στις περισσότερες περιοχές των αναπτυγμένων χωρών, η πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι εύκολη και μπορεί να θεωρηθεί ως εφεδρική πηγή ενέργειας για τα φωτοβολταϊκά και άλλες ΑΠΕ. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, το ηλεκτρικό δίκτυο λειτουργεί ως ένας γιγαντιαίος συσσωρευτής. Η πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο και να διατεθεί σε άλλους καταναλωτές με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγωγή ηλεκτρισμού από τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Επίσης, σε περίπτωση που η παραγόμενη ενέργεια δεν επαρκεί, τότε προσφέρεται ενέργεια από το δίκτυο. Στα διασυνδεδεμένα συστήματα, υπάρχει ένας μετατροπέας συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα σε τάση και συχνότητα αποδεκτή από το δίκτυο. Χρησιμοποιούνται επίσης μετρητές χρέωσης και πίστωσης για τον προσδιορισμό της ενέργειας που αγοράστηκε και πουλήθηκε στην εκάστοτε εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής. [6]

8.4 Εφαρμογές οργανικών φωτοβολταϊκών

Το πεδίο εφαρμογών των οργανικών φωτοβολταϊκών είναι παρόμοιο με αυτό των συμβατικών φωτοβολταϊκών. Έχουν προαναφερθεί τέτοιου είδους παραδείγματα όπως τα φωτοβολταϊκά πάρκα, τα πάνελ στη στέγη και άλλα. Ωστόσο, αρχικός στόχος της έρευνας που διεξάγεται στον τομέα των φωτοβολταϊκών ήταν η μείωση του κόστους κατασκευής, η αύξηση της απόδοσης και η διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής τους. Έτσι, σήμερα τα οργανικά φωτοβολταϊκά δύνανται να εφαρμοσθούν σε τοίχους σπιτιών, παράθυρα, αμαξώματα αυτοκινήτων, κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές και κάθε συσκευή που καταναλώνει ενέργεια στο ύπαιθρο. Επιπλέον, βρίσκουν εφαρμογή στην κλωστοϋφαντουργία. Ενσωματώνονται σε κάθε τύπου υφάσματα και μπορούν να φορτίζουν συσκευές ή ακόμα και να διατηρούν υψηλή την θερμοκρασία του σώματος.

Στο πλαίσιο αυτής της πληθώρας εφαρμογών, το μεν άκαμπτο κρυσταλλικό πυρίτιο ή και οι ανόργανες φωτοβολταϊκές μεμβράνες θα καταλάβουν τη μεγάλη μερίδα της αγοράς ηλιακών πάρκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας, ενώ οι νέες και εξαιρετικά λεπτές και ευέλικτες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών θα κυριαρχήσουν στις αστικές και μικρής κλίμακας αγορές, όπως στα ενεργειακά αυτάρκη σπίτια, ενώ η διείσδυση τους στα μεγάλης κλίμακας συστήματα θα εξαρτηθεί από την επιτυχία της τεχνολογίας αυτής να επιδείξει διάρκεια ζωής και αποδοτικότητα παρόμοια με εκείνη των συμβατικών φωτοβολταϊκών.



Σχήμα 8.4.1: Αποδοτικότητα όλων των ειδών των φωτοβολταϊκών στοιχείων κατά το πέρασμα του χρόνου (χρονική περίοδος 1975-2011)

8.5 Οικονομικά συμπεράσματα

Τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν την ηλιακή ενέργεια είναι διαφορετικά από εκείνα του άνθρακα, του αερίου ή του πετρελαίου. Στις τελευταίες περιπτώσεις, το κόστος καθορίζεται κυρίως από την τιμή του καυσίμου (που προσδιορίζεται από την αγορά). Αντίθετα, το κόστος της ηλιακής ενέργειας καθορίζεται από το κόστος της αρχικής επένδυσης. Το «καύσιμο» σε αυτή την περίπτωση είναι δωρεάν. Έτσι, το κόστος καθορίζεται από το κόστος κατασκευής της παραγωγής των πάνελ, το κόστος εγκατάστασης, το κόστος συντήρησης, και τη διάρκεια ζωής κατά την οποία οι εν λόγω δαπάνες μπορούν να αποσβεστούν. Τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι μία λύση για να μειωθεί το κόστος της ηλιακής ενέργειας. Με την αντικατάσταση των κρυσταλλικών ημιαγωγών με κάποιο είδος οργανικού μορίου, το κόστος κατασκευής των ηλιακών κυττάρων ενδέχεται να μειωθεί στο ίδιο επίπεδο του κόστους κατασκευής φύλλων πλαστικού. Επί του παρόντος οι οργανικές ηλιακές κυψέλες είναι σημαντικά λιγότερο αποδοτικές από ό, τι τα περισσότερα ανόργανα ηλιακά κύτταρα (1-11% έναντι 15-40%), αλλά ίσως να έχει ακόμα νόημα να τα χρησιμοποιούμε ακόμη και με τη μισή δυνατότητα απόδοσης αφού μπορούν να παραχθούν στο ένα δέκατο της τιμής. [26]

8.6 Υβριδικά συστήματα

Η ανάγκη βελτίωσης των επιδόσεων των φωτοβολταϊκών και επομένως η μείωση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας οδήγησε στα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα θερμικών συστημάτων. Ένα συνηθισμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο μετατρέπει μέρος της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό (γύρω στο 10% - 14%), ενώ το ποσοστό ηλιακής ενέργειας που απομένει είτε ανανακλάται από την επιφάνεια του πλαισίου είτε συσσωρεύεται και εκλύεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας μιας κυψέλης μειώνει την απόδοσή της. Η αρχή λειτουργίας

των υβριδικών φωτοβολταϊκών συστημάτων στηρίζεται στην ψύξη των κυψελών, μεταφέροντας τη θερμική ενέργεια που απορροφούν σε ένα ρευστό (σε υγρή ή αέρια μορφή) που επιτρέπει την μετέπειτα χρήση της.

Όπως γίνεται με τα ηλιοθερμικά συστήματα, αυτή η μεταφορά μπορεί να γίνει κυρίως με μεταφορά θερμότητας που πραγματοποιείται στο εσωτερικό του θερμοσυσσωρευτή. Η βασική παράμετρος που χαρακτηρίζει τα υβριδικά συστήματα είναι το σύνολο της απόδοσης της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας, υπολογισμένο ως σχέση ανάμεσα στο άθροισμα της παραγόμενης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η τεχνολογία που υπάρχει οδηγεί σε δυο λύσεις: η πιο απλή, στρέφεται στην ανάκτηση της θερμικής ενέργειας μέσω φυσικού ή τεχνικού αερισμού των κυψελών. Η δεύτερη, βασίζεται στη χρήση υγρού για την μεταφορά θερμότητας σε υγρή μορφή.

Στα υβριδικά συστήματα με αέρα, το βασικό στοιχείο είναι ο συλλέκτης που είναι ενσωματωμένος στο φωτοβολταϊκό. Στο συσσωρευτή εισρέει ο αέρας, από το εξωτερικό περιβάλλον ή από ανακύκλωση, που ψύχει τις κυψέλες και μεταφέρει μέρος της θερμότητας που παράγουν στο εσωτερικό του κτιρίου (τυπική χρήση για εσωτερικό κλιματισμό) ή τη διασκορπίζει στο περιβάλλον. Τα υβριδικά συστήματα με αέρα έχουν απλή και οικονομική κατασκευή με εξαιρετικές δυνατότητες ενσωμάτωσης σε κτίρια.

Τα υβριδικά συστήματα με υγρό βασίζονται σε συλλέκτες όμοιους με εκείνους των ηλιοθερμικών συστημάτων με νερό. Το υγρό ρέει σε σωλήνες που εφάπτονται με τον απορροφητή, αφαιρώντας την θερμότητα η οποία μεταφέρεται στο φορτίο με ή χωρίς τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας. Θεωρητικά αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούνται συνεχώς για την παραγωγή ζεστού νερού. [34]

Βιβλιογραφία

- [1] *REN21.2010.Renewables 2010 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat).*
- [2] M. Zeman, *Introduction to Photovoltaic Solar Energy*, Delft: Delft University of Technology, 2012.
- [3] *Study at the Rheinisch-Westfalischen Institut fur Wirtschaftsforschung e.V. (RWI).*
- [4] Κ. Αντωνόπουλος, *Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα*, Αθήνα, 2007.
- [5] M. Zeman, *Solar Radiation*, Delft: Delft University of Technology, 2012.
- [6] Α. Ζερβός, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Αθήνα: Πολυτεχνειακές Εκδόσεις, 2005.
- [7] Κ. Καραγκάκης, *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 1992.
- [8] «Photon International,» March 2011. [Ηλεκτρονικό].
- [9] «www.ni.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/7229/en>.
- [10] «Φωτοβολταϊκά Συστήματα Ενσωματωμένα σε Κτίρια».
- [11] Α. Φραγκιουδάκη, *Οικιακό Φωτοβολταϊκό Σύστημα Συνδεδεμένο στο Δίκτυο*, Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2011.
- [12] Δ. Μανωλάκος, «<http://courseware.mech.ntua.gr>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D1_Hmiagogoi_1.pdf.
- [13] Η. D. Young, *Πανεπιστημιακή Φυσική Τόμος Β' Ηλεκτρομαγνητισμός, Οπτική, Σύγχρονη Φυσική*, Εκδόσεις Παπαζήση, 1994.
- [14] Δ. Μανωλάκος, «<http://courseware.mech.ntua.gr>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D2_Hmiagogoi_2.pdf.
- [15] «openwetware.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://openwetware.org/wiki/20.309:DiodePrimer>.
- [16] «www.helapco.gr,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.helapco.gr/ims/file/oikiaka/pv_guide_jan11.pdf.
- [17] «www.core-int.co.kr,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.core-int.co.kr>.
- [18] W.D.Sproul, «Control of Reactive Sputtering Processes,» 2005. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609005005389#1>.

- [19] Χ. Πιτσαλίδης, «Ανάπτυξη οργανικών, πολυμερικών και ανόργανων υλικών και μελέτη των δομικών ιδιοτήτων τους με τεχνικές ακτίνων Χ για εφαρμογές σε οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία,» Θεσσαλονίκη, 2008.
- [20] Ι. Κωνσταντίνου, «Οργανικά Ηλεκτρονικά Υλικά για Φωτοβολταϊκές Εφαρμογές,» Λεμεσός, 2011.
- [21] Ε. Σερπετζόγλου, «Ανάπτυξη και Χαρακτηρισμός Οργανικών Φωτοβολταϊκών με Laser,» Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.
- [22] «www.physics.ntua.gr/,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.physics.ntua.gr/~micronano/ERG%20TEXNIKES/thin_layer_deposition.pdf.
- [23] «www.selasenergy.gr/,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php.
- [24] C. J. Brabec, «www.sciencedirect.com/,» 2004. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702480400100X>.
- [25] Μ. Γαργανουράκης, «Ανάπτυξη Προηγμένων Transparent Conductive Oxides (TCOs) και Μελέτη των Διεπιφανειών τους με Οργανικούς Ημιαγωγούς και Εύκαμπτα Υποστρώματα,» Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2008.
- [26] S. Berkley, *The Fabrication and Characterization of Organic Solar Cells*, 2009.
- [27] G. Marsh, «www.sciencedirect.com/,» July-August 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471084608701367>.
- [28] Γ. Βισκαδούρος, «Ανάπτυξη Καινοτόμων Οπτοηλεκτρονικών Διατάξεων Πολυμερούς-Νανοδομών για Εφαρμογές σε Οργανικά Φωτοβολταϊκά και Εκπομπή Πεδίου,» Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2011.
- [29] Ν. Παλιάτσας, «Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών,» Πάτρα, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.
- [30] Σ. Κουρελή, «Παρασκευή Υμενίων Αγωγίμων Πολυμερών μέσω Ηλεκτροπολυμερισμού για Εφαρμογή τους σε Φωτοβολταϊκά Κελιά,» Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- [31] Π. Κουντουράκης, «Πλασμονικές Φωτοβολταϊκές Διατάξεις,» Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, 2012.
- [32] Π.- Μ. Παπασάββα, «Σύγχρονες Ηλεκτρονικές Διατάξεις με Οργανικά Ημιαγωγικά Υλικά,» Ηράκλειο, 2010.
- [33] S. I. R. G. Bhubaneswari Parida, «A Review of Solar Photovoltaic Technologies,» *Elsevier*,

pp. 1625-1636, 12 January 2011.

[34] *Τεχνικά Θέματα*, pp. 100-116, 2001.