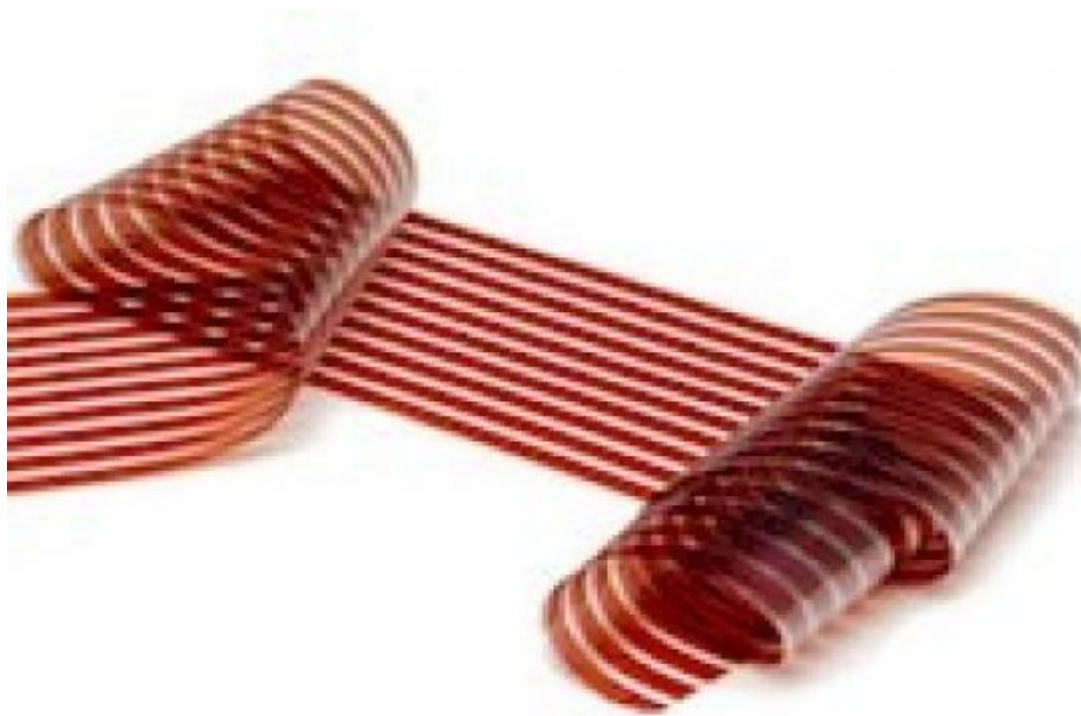


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

## **ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ :**

**ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**

**Δρ. ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ**

**Πάτρα 2014**

## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη, σε όσους στάθηκαν δίπλα μου με κάθε τρόπο και με βοήθησαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ξεκινώντας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον καθηγητή Δρ. Σταθάτο Ηλία επειδή μου ανέθεσε αυτήν την πτυχιακή εργασία, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής.

## Πρόλογος

Η ενέργεια είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιβίωση και διαμόρφωση των συνθηκών της ζωής του ανθρώπου. Επομένως, η παραγωγή και κατανάλωση της ενέργειας είναι μια από τις πιο αναγκαίες δραστηριότητες του. Η σημασία και η συμβολή της ενέργειας στην ανάπτυξη της οικονομίας και του πολιτισμού της σύγχρονης κοινωνίας γενικότερα είναι αυτονόητη και αποδεικνύεται από την ιστορική πορεία και εξέλιξη των κοινωνιών. Η διαθεσιμότητα ενεργειακών πόρων συνέβαλε καθοριστικά στην τεχνολογική και οικονομική τους ανάπτυξη.

Η ενέργεια είναι ένα ουσιαστικό μέρος της καθημερινής ζωής μας. Τίποτα δεν θα γινόταν χωρίς ενέργεια. Οι άνθρωποι εξαρτώνται από τις εκατοντάδες των διαφορετικών τρόπων με τους οποίους κάνει αισθητή η ενέργεια την παρουσία της, καθώς οι άνθρωποι χρειάζονται ενέργεια για να κινηθούν και οι μηχανές χρησιμοποιούν ενέργεια για να λειτουργήσουν. Η ενέργεια είναι αναμφίβολα μια υπηρεσία ζωτικής σημασίας για τον άνθρωπο αφού αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιβίωσή του, την ανάπτυξη της βιομηχανία και των υπηρεσιών, την ανάπτυξη της οικονομίας και του πολιτισμού.

Με την πάροδο των χρόνων οι επιστήμονες προσπάθησαν να εκμεταλλευτούν την οικονομικότερη ενέργεια που προσφέρεται απλόχερα στον πλανήτη Γη. Σκοπός τους είναι λοιπόν να εκμεταλλευτούν την ενέργεια του ήλιου και να την μετατρέψουν σε ηλεκτρικοί. Την λύση την δίνουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα φωτοβολταϊκά συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ενεργεία σε ηλεκτρική ενέργεια.

Πραγματοποιήθηκαν πολλές πειραματικές μελέτες για να δημιουργηθεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αρχικά δημιουργήθηκαν τα φωτοβολταϊκά με πυρίτιο, τα οποία ήταν μια ακριβή κατασκευή με αξιόλογη απόδοση. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμα και σήμερα για την μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Πειραματικές μελέτες πραγματοποιούνται στις μέρες μας με σκοπό την δημιουργία φωτοβολταϊκών με αξιόλογη απόδοση και μείωση του κόστους παραγωγής.

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι η νέα τεχνολογία που απάντα στην τεχνολογία πυριτίου. Τα πολυμερή χαρακτηρίζονται για το χαμηλό κόστος τους, ωστόσο η απόδοσή τους δεν είναι αξιόλογη. Οι επιστήμονες πειραματίζονται με νέες εφαρμογές για την δημιουργία νέων φτηνών φωτοβολταϊκών συστημάτων με αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης των οργανικών φωτοβολταϊκών.

## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μελετά τα οργανικά φωτοβολταϊκά και τα συγκρίνει με την τεχνολογία πυριτίου. Με τον γενικό όρο Φωτοβολταϊκά αναφερόμαστε στην βιομηχανική διάταξη πολλών φωτοβολταϊκών κυττάρων σε μία σειρά. Στην ουσία πρόκειται για τεχνητούς ημιαγωγούς που συνήθως ήταν από Πυρίτιο, οι οποίοι ενώνονται με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι ημιαγωγοί αυτοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν μια ηλεκτρική τάση. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Τα φωτοβολταϊκά ανήκουν στη κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ανανεώσιμες πηγές θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας. Η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί με τις ήπιες πηγές ενέργειας που είναι βασισμένες στην ηλιακή ακτινοβολία και είναι επιπλέον και ανανεώσιμες, μιας και δεν πρόκειται να εξαντληθούν όσο υπάρχει ο ήλιος, δηλαδή για μερικά ακόμα δεκατομμύρια χρόνια.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο αναλύονται οι όροι της ηλιακής ενέργειας και της ηλιακής ακτινοβολίας και αναφέρονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην συνέχεια ακολουθεί ιστορική αναδρομή των φωτοβολταϊκών στοιχείων και οι ανάλυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, του φωτοβολταϊκού στοιχείου και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Επίσης, εξηγείται τι είναι ημιαγωγός, ποία είναι η επαφή p-n, ποία η ορθή και ανάστροφη πόλωση της διόδου.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο αναλύεται η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου και οι συνδέσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στην συνέχεια αναφέρονται όλα τα είδη των φωτοβολταϊκών στοιχείων που υπάρχουν μέχρι σήμερα, γίνεται ανάλυση των τύπων φωτοβολταϊκών τα χαρακτηριστικά τους όπως η απόδοση που προσφέρει κάθε ένα από αυτά. Επίσης, γίνεται αναφορά στις νέες τεχνολογίες και πως είναι η δομή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο αναλύονται τα οργανικά φωτοβολταϊκά. Αρχικά γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή. Στην συνέχεια αναλύεται η αρχή λειτουργία τους και κάποιοι όροι που είναι σπουδαίοι για την κατανόηση της νέας τεχνολογίας. Ακολουθούν οι κατηγορίες των οργανικών φωτοβολταϊκών και τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στους πιθανούς τρόπους βελτίωσης τους.

Τέλος στο Κεφάλαιο Τέσσερα καταγράφονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής εργασία και γίνεται η σύγκρισή των οργανικών φωτοβολταϊκών και της τεχνολογία πυριτίου.

# Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b>Γενικά</b>	
1.1	Ηλιακή Ενέργεια	1
1.1.1	Ηλιακή ακτινοβολία	3
1.2	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	5
1.3	Ιστορική Αναδρομή Φωτοβολταϊκών στοιχείων	8
1.4	Φωτοβολταϊκά Συστήματα	10
1.4.1	Φωτοβολταϊκό στοιχείο	11
1.4.2	Ημιαγωγός	12
1.4.3	Επαφή p-n	15
1.4.4	Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της διόδου	17
1.5	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	19
<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b>Φωτοβολταϊκό πλαίσιο</b>	
2.1	Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου	21
2.2	Συνδέσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων	22
2.3	Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων	23
2.3.1	Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους	23
2.3.1.1	Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si )	23
2.3.1.2	Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)	24
2.3.1.3.	Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)	25
2.3.2	Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών υμενίων (THIN FILM)	25
2.3.2.1.	Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe <sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)	26
2.3.2.2	Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)	26
2.3.2.3	Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)	27
2.3.2.4	Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)	28

2.3.3	Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία	28
2.3.4	Άλλες τεχνολογίες	29
2.4	Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου	29
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>Οργανικά φωτοβολταϊκά</b>	
3.1	Εισαγωγή	31
3.1.1	Ιστορική Αναδρομή	32
3.2	Οργανικά Φωτοβολταϊκά	32
3.2.1	Αρχή λειτουργίας οργανικών φωτοβολταϊκών	33
3.2.1.1	Η έννοια των Εξιτονίων	34
3.2.2	Συζυγή Πολυμερή (Conjugated Polymers)	34
3.3	Ηλεκτρονικές Ιδιότητες των Συζυγών Πολυμερών	37
3.4	Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών	38
3.4.1	Μονοστρωματικές διατάξεις (Single Layer)	38
3.4.2.	Διστρωματικές διατάξεις	39
3.4.3	Διατάξεις διεσπαρμένης ετεροεπαφής	41
3.5	Ηλεκτρονικές Ιδιότητες των Συζυγών Πολυμερών	41
3.5.1	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα οργανικών πολυμερικών φωτοβολταϊκών διατάξεων	42
3.6.	Βελτιώσεις οργανικών φωτοβολταϊκών	43
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	
4.1.	Σύγκριση Οργανικών Φωτοβολταϊκών και Τεχνολογία Πυριτίου	44
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>		46

# Κεφάλαιο 1: Γενικά

## 1.1. Ηλιακή Ενέργεια

Ο ήλιος επηρεάζει το καθετί που βρίσκεται πάνω στην γη, αφού η σημασία του είναι καίρια για την διατήρηση της ζωής στην γη. Ο ήλιος είναι η βασική πηγή ενέργειας και με την θεμελιώδη διαδικασία της φωτοσύνθεσης προσφέρει την ενέργεια που χρειάζεται για την ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών. [2] Επίσης, ο ήλιος διατηρεί την θερμοκρασία της γη στα βιώσιμα επίπεδα και δημιουργεί τα μετεωρολογικά φαινόμενα. Ωστόσο, παράγει την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ξύλα και ορυκτά καύσιμα με αποτέλεσμα να αποτελεί κύρια πηγή της ενέργειας που χρησιμοποιούμε στον πλανήτη γη.

Ο ήλιος είναι απλανής αστέρας, έχει σχήμα σφαιρικό και το μέγεθος του είναι περίπου 109 φορές μεγαλύτερο από την γη, δηλαδή έχει διάμετρο 1,4 εκατομμύρια χιλιόμετρα. Η θερμοκρασία του κυμαίνεται σε μερικά εκατομμύρια βαθμών Κελσίου °C. [2] Τα άτομα των στοιχείων και τα μόρια που τον αποτελούν βρίσκονται σε κατάσταση πλάσματος, δηλαδή σε κατάσταση νέφους θετικών και αρνητικών ιόντων. Οι υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν μεγάλες ταχύτητες στους κινούμενους πυρήνες υδρογόνου που συσσωματώνονται, έχουν την δυνατότητα να υπερνικούν τις απωστικές ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις με αποτέλεσμα να δημιουργούνται οι πυρήνες του ήλιου. [1]

Η πυρηνική σύντηξη που δημιουργείται από την συνένωση των πυρήνων απελευθερώνει ενέργεια. Είναι δηλαδή μία εξώθερμη διαδικασία με τεράστιες παραγόμενες ποσότητες ενέργειας που προσφέρεται είτε με την μορφή κινητικής ενέργειας στα παραπροϊόντα (σωματίδια), είτε σε μορφή ακτινοβολίας που κατευθύνεται προς όλες τις διευθύνσεις. [2]

Ο πλανήτης γη έχει την δυνατότητα να προσλαμβάνει ένα δισεκατομμύριο της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην γη, στο χρονικό διάστημα των 7 ημερών, αξιολογείται ότι είναι ισοδύναμη στην συνολική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον πλανήτη από όλα τα καύσιμα. Αποτέλεσμα των ερευνών που δείχνουν τις δυνατότητες της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρέπει να γίνεται η εκμετάλλευση της στο μέγιστο βαθμό.

Η ηλιακή ακτινοβολία έχει την δυνατότητα να αξιοποιηθεί με της εξής εφαρμογές:

- Ø Θερμικές εφαρμογές: είναι οι εφαρμογές που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια για να παράγουν την θερμότητα κυρίως για θέρμανση νερού και την μετατροπή του νερού σε ατμό.
- Ø Φωτοβολταϊκές εφαρμογές: είναι οι εφαρμογές που μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό με την χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 μία νέα τεχνολογία εμφανίζεται στα διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ. Με την πάροδο του χρόνου η νέα τεχνολογία προσφέρει την ηλεκτρική ενέργεια με πολύ μικρό κόστος. Ωστόσο, η χαμηλή απόδοση και το συνεπαγόμενο υψηλό συνολικό κόστος κάνουν την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων να βρίσκει εφαρμογή σε μονάδες μικρής δυναμικότητας σε περιοχές απομακρυσμένες όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι πολύ ακριβή. [1]

Ο ήλιος έχει την δυνατότητα να ενεργεί ως την τέλεια πηγή ακτινοβολίας σε μεγάλες θερμοκρασίες. Η ενέργεια που προσπίπτει σε μία μονάδα επιφάνειας κάθετη προς την διεύθυνση της δέσμης έξω από την ατμόσφαιρα της γης είναι η ηλιακή σταθερά και ισούται με  $S=1367 \text{ W/m}^2$ . Η ένταση ακτινοβολίας είναι η ολική ισχύς από μία πηγή ακτινοβολίας που πέφτει στην μονάδα επιφάνειας. [3]

Η ατμόσφαιρα της γης μειώνει την ακτινοβολία λόγω των μηχανισμών ανάκλασης, απορρόφησης και σκέδασης. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια, η μονάδα μέτρησης είναι σε  $kWh/m^2$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ποσοστό ηλιακής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από την τοποθεσία που μετράται.

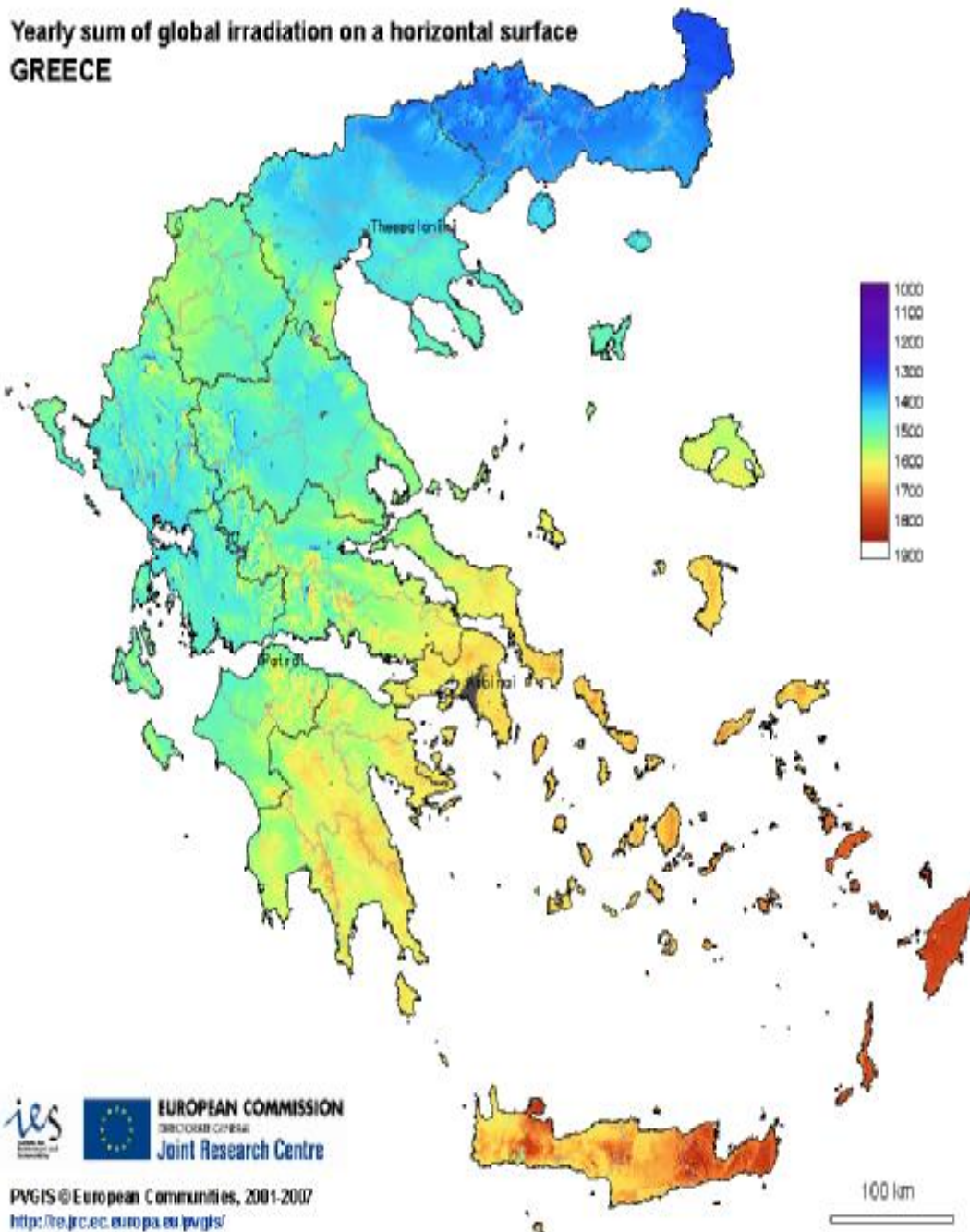
Όπως προαναφέραμε η ηλιακή ακτινοβολία κατευθύνεται προς όλες τις διευθύνσεις, αποτέλεσμα αυτού η γη να δέχεται ακτινοβολία σε όλη της την έκταση. Ωστόσο, η ποσότητα ακτινοβολίας που προσφέρεται σε κάθε τόπο εξαρτάται και από την γεωγραφική του θέση, την εποχή και την νεφοκάλυψη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η έρημος που έρευνές έχουν αποδείξει ότι δέχεται την διπλάσια ακτινοβολία σε σχέση με άλλες περιοχές.

Η Ελλάδα είναι μία χώρα με πλούσια ηλιοφάνεια στο μεγαλύτερο τμήμα της χώρας. Η ηλιοφάνεια διαρκεί περίπου 2700 ώρες τον χρόνο. Η Μακεδονία και η Ήπειρο είναι από τις περιοχές που δέχονται τις λιγότερες ώρες ηλιοφάνειας ετήσιος, κυμαίνονται από 2200 έως 2300. Αντίθετα με την Ρόδο και την Κρήτη που έχουν το πλεονέκτημα η ηλιοφάνεια τους να ξεπερνά τις 3100 ώρες ετησίως. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η Ελλάδα θα θεωρείται από τις καταλληλότερες περιοχές εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. [1]

Μοίρες	0°	30°	45°	60°	90°
<b>Αθήνα</b>	1581	1730	1680	1549	1090
<b>Θεσσαλονίκη</b>	1430	1544	1505	1395	1000
<b>Κόρινθος</b>	1526	1666	1617	1490	1050
<b>Πάρος</b>	1629	1751	1685	1538	1058
<b>Πάτρα</b>	1479	1611	1563	1441	1018
<b>Χανιά</b>	1306	1738	167	1517	1033

Πίνακας 1.1: Συνολική ετήσια ηλιακή ακτινοβολία ( $kWh/m^2$ ) σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, σε επίπεδα με κλίση 0°, 30°, 45°, 60° και 90° και προσανατολισμό προς το Νότο. [1]





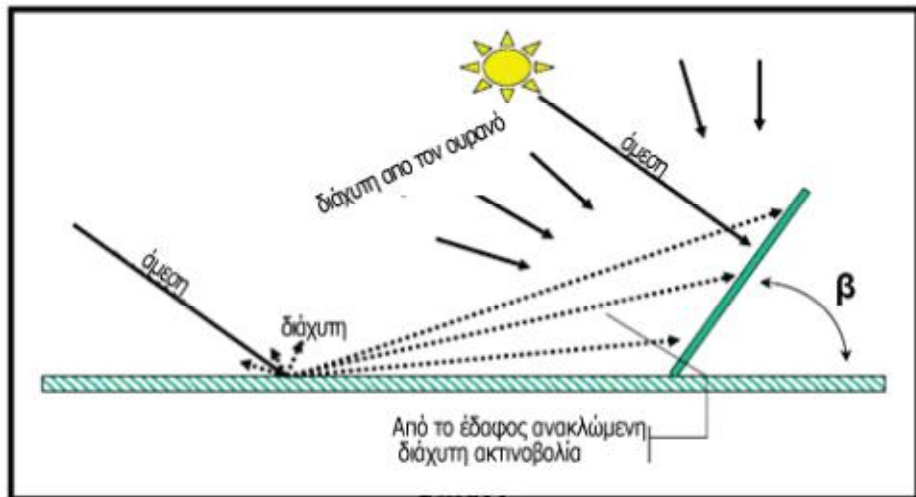
Εικόνα 1: Συνολική ετήσια ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο. [4]

### 1.1.1. Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία διακρίνεται τις εξής:

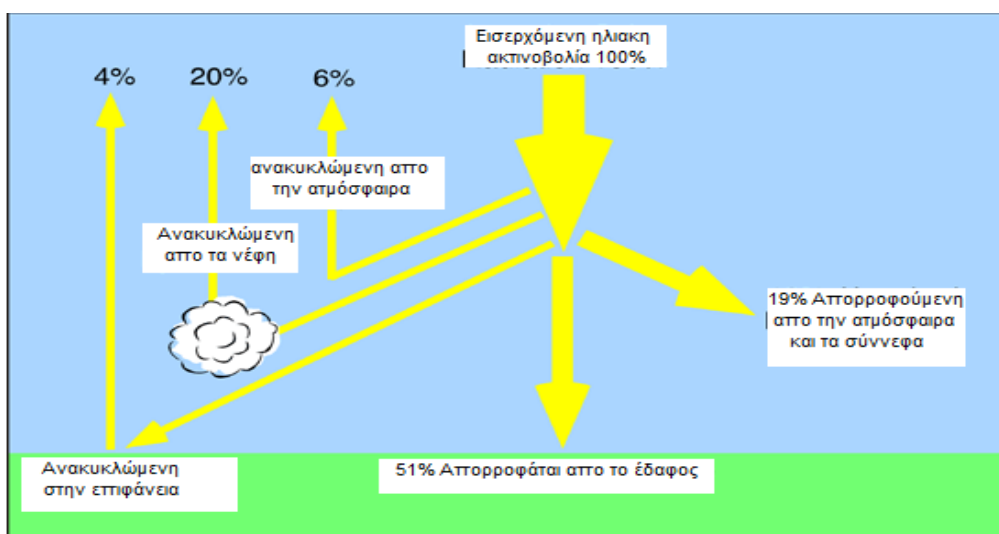
- Ø **Άμεση ακτινοβολία** (direct -deam): είναι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει απευθείας από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση από τον ήλιο.
- Ø **Διάχυτη ακτινοβολία** (diffuse): είναι η ηλιακή ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα

Ø **Συνολική Ακτινοβολία:** (total solar radiation): είναι το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια. Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας συνήθως αναφέρεται στο άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας και ονομάζεται κοσμική ακτινοβολία. [5]



Εικόνα 2: Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία [5]

Όπως προαναφέραμε στην επιφάνεια της γης η ακτινοβολία που συνιστάται είναι από ένα μέρος άμεσης και ένα μέρος διάχυτης ακτινοβολίας. Το 51% της ακτινοβολία απορροφάται άμεσα από το έδαφος, το 19% απορροφάται από την ατμόσφαιρα και τα σύννεφα και ένα ποσοστό της τάξης 30% ανακλάται από την ατμόσφαιρα και τα σύννεφα. Η συνιστώσα που προσδιορίζεται η άμεση ακτινοβολία καθορίζεται από την διεύθυνση του ήλιου σε αντίθεση με την διάχυτη που δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και σκεδάζεται από τον ουράνιο θόλο. [1]



Εικόνα 3: Ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα. [1]

Η ολική ακτινοβολία προκύπτει από το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας ως εξής:

$$I = I_d + I_b$$

Όπου:  $I$  η ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης.  
 $I_d$  η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.  
 $I_b$  η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.

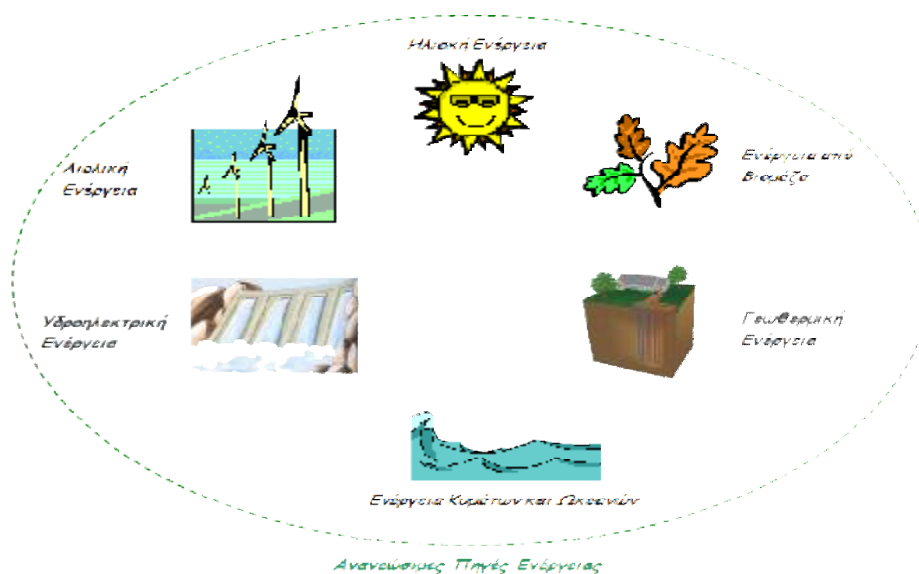
Στην περίπτωση που η επιφάνεια δεν είναι οριζόντια και βρίσκεται υπό γωνία δηλαδή είναι κεκλιμένη, τότε στον παραπάνω ορισμό προσθέτουμε την ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος:

$$I_T = I_{d,T} + I_{b,T} + I_{refl,T}$$

Όπου:  $I_T$  η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης  
 $I_{b,T}$  η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο  
 $I_{d,T}$  η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο  
 $I_{refl,T}$  η ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. [1]

## 1.2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες όπως ο άνεμος, ο ήλιος κτλ. Οι ΑΠΕ ονομάζονται και ήπιες μορφές ενέργειας για τον λόγο ότι δεν χρειάζεται κάποια ενεργειακή παρέμβαση παρά μόνο η εκμετάλλευση της είδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Επίσης, πρόκειται για καθαρές μορφές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον που δεν δημιουργούν απόβλητα με αποτέλεσμα να είναι μη ρυπογόνες. [2]



Εικόνα 4: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.[7]

Οι ΑΠΕ είναι όλες οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως ο άνεμος και ο ήλιος που αντικαθιστούν τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως είναι ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Οι ΑΠΕ είναι η λύση για το πρόβλημα της εξάντλησης των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων, δηλαδή των πηγών που δεν είναι ανανεώσιμες. Με την πάροδο του χρόνου οι περισσότερες χώρες στην Ευρωπαϊκή Ένωση χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κάτω από συγκεκριμένο νομοθετικό πλαίσιο. Ωστόσο, σκοπός τους είναι να εκμεταλλευτούν στο έπακρο την οικονομική ανάπτυξη που μπορούν να προσφέρουν και να επηρεάσουν το οικολογικό κίνημα. [2]

Οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από τα πλεονεκτήματα τους έχουν όμως και κάποια μειονεκτήματα, παρακάτω θα αναφερθούμε αναλυτικά και στα δύο.

### **Ø Πλεονεκτήματα**

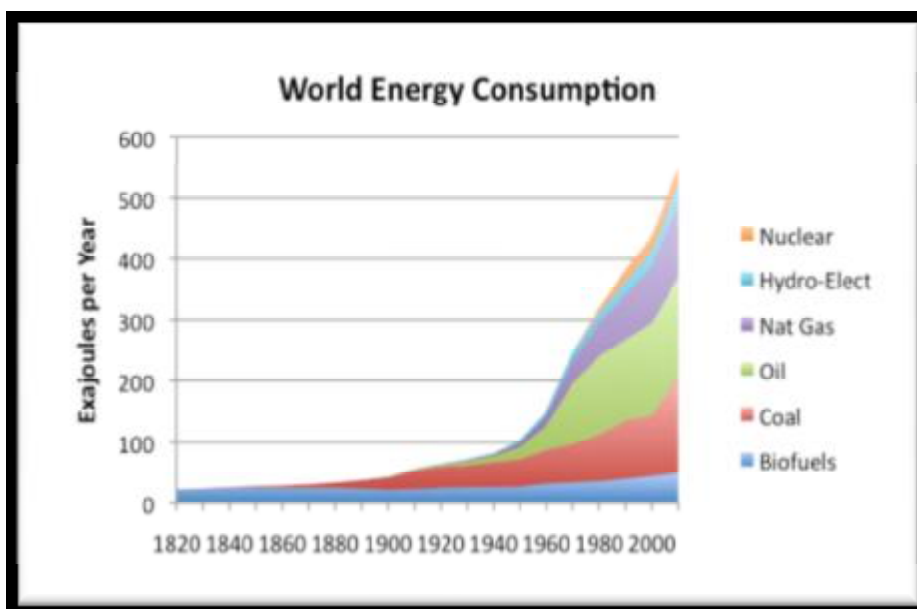
- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

### **Ø Μειονεκτήματα**

- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης.
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών.

- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω απ' το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. [2]

Χαρακτηριστικό των ΑΠΕ είναι η συνεχή ροή ενέργειας, θεωρούνται ανεξάντλητη πηγή ο ήλιος και ο άνεμος δίνουν την δυνατότητα να μην σταματά ποτέ η παραγωγή ενέργειας. [6]

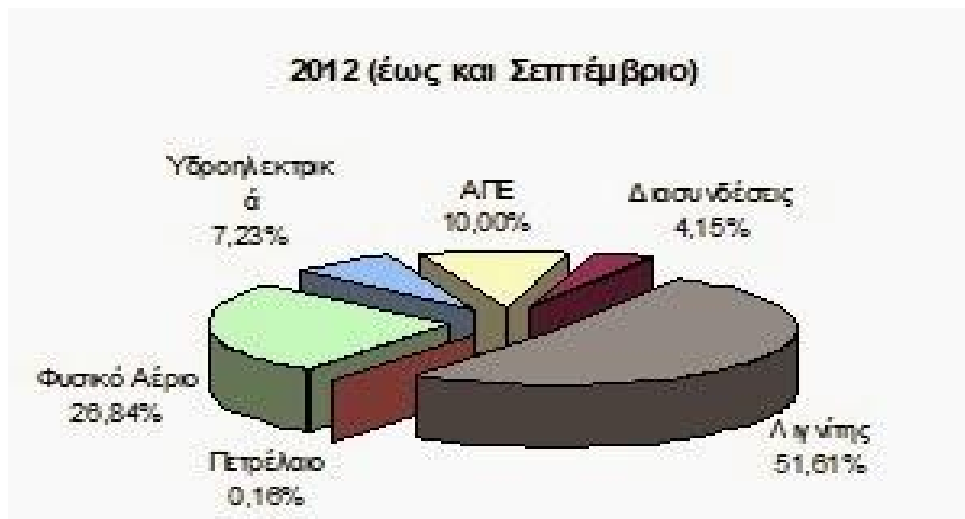


Διάγραμμα 1: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει του χρόνου και το είδος του καυσίμου. [6]

Η ηλιακή ακτινοβολία όπως προαναφέραμε αντιπροσωπεύει μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας για τη γη. Ο ήλιος έχει δυνατότητα απόδοσης  $1,7 \cdot 10^{14} \text{ kW}$  ενέργειας στην γη. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μορφές. Η άμεση αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιεί την ενέργεια είτε για φωτισμό είτε για θερμότητα.

Το φως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παράγωγή ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων, με αποτέλεσμα την άμεση μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμότητα χρησιμοποιείται για την θέρμανση νερού με την βοήθεια των ηλιακών συλλεκτών. Η αιολική, η κυματική και η υδραυλική ενέργεια είναι έμμεσες ενέργειες της ηλιακής ακτινοβολίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τον άνεμο, το παλιρροϊκό κύμα μετατρέπεται σε υδροηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση των γεννητριών.

Η βιομάζα δημιουργείται με την διαδικασία της φωτοσύνθεσης, χρησιμοποιείται στην παραγωγή της αιθανόλης ή για την παραγωγή βιοαερίου των οργανικών οικιακών αποβλήτων. Επίσης, παράδειγμα της γεωθερμικής ενέργειας είναι η χρήση του ατμού και του ζεστού νερού για εφαρμογές θέρμανσης. [6]



Εικόνα 5: Ενεργειακό ισοζύγιο ενεργειών. [8]

### 1.3. Ιστορική Αναδρομή Φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν μία προσέγγιση υψηλής τεχνολογίας για την άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλιακή ενέργεια, είναι γνωστά ως φωτοβολταϊκά ή Φ/Β. Η λέξη φωτοβολταϊκό αποτελείται από τους όρους φώτο και βόλτ, ο πρώτος όρος προέρχεται από την λέξη φως και ο δεύτερος από τον πρωτοπόρο στην μελέτη του ηλεκτρισμού τον Ιταλό Alessandro Volta (1745-1827), ο οποίος ήταν και ο εφευρέτης της μπαταρίας.

Ο Γάλλος φυσικός A.E. Becquerel (1820-1891), θεωρείται ότι ανακάλυψε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το 1893 ο A.E. Becquerel δημοσίευσε μία πειραματική του εργασία που περιέγραφε πως σε μία μπαταρία υγρού αυξανόταν η τάση του συσσωρευτή στις πλάκες κατά την έκθεση της στο ηλιακό φως. Συμπέρασμα αυτού, ένα φωτοβολταϊκό φαινόμενο σημαίνει φωτοηλεκτρικό. Αν απλοποιήσουμε ένα φωτοβολταϊκό φαινόμενο θα διαπιστώσουμε ότι είναι μία μπαταρία. Έχει την δυνατότητα να τροφοδοτείται από τον ήλιο και το μόνο αναλώσιμο του είναι το ίδιο το φως. Επίσης, δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη και είναι φιλική προς το περιβάλλον.

Οι ερευνητές Adams και Day το 1871 περιέγραψαν τις μεταβολές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του σεληνίου όταν αυτό εκτίθεται στο φώς. Το σελήνιο κατατάσσεται στην κατηγορία των μη μεταλλικών στοιχείων και εμφανίζει πολλά κοινά με το θείο. Το 1883 ο ηλεκτρολόγος Charles Edgar Fritz δημιούργησε ένα ηλιακό στοιχείο κατασκευασμένο από σελήνιο το οποίο αποτελούνταν από λεπτά στρώματα σεληνίου με κάλυψη λεπτών ημιδιάφανων χρυσών συρμάτων και ένα φύλο γυαλιού για προστασία. Ο βαθμός απόδοσης του ήταν αρκετά μικρός. Ωστόσο, παρουσίαζε πολλά κοινά στοιχεία με τα σημερινά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου.

Οι ερευνητές Bardeen και Brattain το 1948 κατασκεύασαν μια συσκευή με ημιαγωγούς. Η κατασκευή θεωρήθηκε επαναστατική, ωστόσο χρησιμοποιήθηκε ευρέως. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα που ήταν εξοπλισμένα με φωτοβολταϊκά ηλιακά όπως οι τεχνικοί δορυφόροι, διαστημικά οχήματα κτλ. [6]

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι πια γεγονός, κάνουν την εμφάνιση τους στην αγορά. Ωστόσο, το υψηλό κόστος παραγωγής τους τα κάνει να χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Με την πάροδο του χρόνου τα φωτοβολταϊκά βελτιώνονται αισθητά, καθημερινά η απόδοσή τους έχει ανοδική πορεία.

Η NASA είναι ο κυριότερος πελάτης των φωτοβολταϊκών για δεκαετίες. Το υψηλό κόστος τους κάνει την αγορά να δυσανασχετεί, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ο απαραίτητος ενθουσιασμός για αυτή την μεγάλη ανακάλυψη. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διακυμάνσεις των τιμών σύμφωνα με την χρονολογία. [6]

<b>Χρονολογία</b>	<b>Τιμή /Watt</b>
1956	500\$/Watt.
1970	100\$/Watt.
1973	50\$/Watt

Πίνακας 1.2: Ενδεικτικές τιμές φωτοβολταϊκών στοιχείων σύμφωνα με την χρονολογία κατασκευής τους. [6]

Η πρώτη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών έγινε στην Καλιφόρνια το 1980 από την ARCO Solar, η οποία χρησιμοποίησε και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου σε 2 άξονες. Η εγκατάσταση κυμαινόταν στα επίπεδα του 1 MW. Στα επόμενα 3 χρόνια τα φωτοβολταϊκά έχουν ταχύτατη εξέλιξη. Το 1983 γίνεται παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών μεγέθους 22MW με συνολικό κέρδος 250.000.000\$.

Με την πάροδο των χρόνων η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών είναι θεαματική. 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%. Επίσης, την ίδια χρονία καταγράφεται το ρεκόρ απόδοσης των Thin Films στο 18.8%. Η παραγωγή όλων των τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών πλαισίων φτάνει συνολικά τα 200 MW.

Το 2004 είναι η αφετηρία της εισόδου των εταιριών στην μαζική παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Η Ιαπωνία και η Γερμανία είναι οι πρωτοπόρες στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων, όλες οι χώρες προσπαθούν με κάθε τρόπο να υιοθετήσουν τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών. Η συνολική παραγωγή το 2004 έφτασε τα 1.200 MW ενώ ο τζίρος της ίδιας χρονιάς άγγιξε τα 6.500.000.000\$.

Πολλές χώρες επενδύουν τεράστια κονδύλια στην εκμετάλλευση της τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Ο ήλιος είναι διαθέσιμος και δωρεάν με αποτέλεσμα οι φωτοβολταϊκές διατάξεις έχουν πολλά οφέλη. Τα φωτοβολταϊκά έχουν την δυνατότητα να προσαρμοστούν σε πολλές εφαρμογές από καταναλωτικές χρήσεις χαμηλής ισχύος όπως ένας υπολογιστής χειρός, έως και εφαρμογές μεγάλων ενεργειακών απαιτήσεων όπως ηλεκτροπαραγωγή σε κεντρικούς σταθμούς των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού. [6]

## 1.4. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας έχει την δυνατότητα χρησιμοποιηθεί ως εξής:

- Άμεση μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια με ηλιακές κυψέλες.
- Συσσώρευση θερμότητας σε ηλιακούς συλλέκτες.

Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Όπως έχουμε προαναφέρει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο βασίζεται στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (photovoltaic) ανακαλύφθηκαν το 1839 από τον A.E. Becquerel και χρησιμοποιήθηκαν για πρακτικούς σκοπούς στο τέλος της δεκαετίας του '50 σε διαστημικές εφαρμογές.

Η φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια αναμένεται να γίνει η κύρια πηγή ενέργειας μετά τα ορυκτά καύσιμα. Η φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια θεωρείται μία καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας με αποτέλεσμα να κρίνεται η κατάλληλη για την κύρια ενέργεια του πλανήτη. Ο ήλιος δεν παρέχει δηλαδή μονό την ενέργεια που χρειάζεται ο πλανήτης για την ζωή αλλά παρέχει και την ενέργεια για την άνεση και ευημερία των ανθρώπων παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. [6]

Τα φωτοβολταϊκά χαρακτηρίζονται για τα πλεονεκτήματά τους. Ωστόσο, έχουν και κάποια μειονεκτήματα, παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά.

### ∅ Πλεονεκτήματα:

- Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
- Ικανοποιητική απόδοση μετατροπής.
- Σχετικά εύκολη μέθοδος κατασκευής των ηλιακών κυττάρων από πρώτες ύλες.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής των στοιχείων (25 έτη)
- Η φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι φιλική προς τα περιβάλλον δεν προκαλεί ρύπανση, θόρυβο, απόβλητα ή άχρηστα παραπροϊόντα.
- Υπάρχει αφθονία πρώτων υλών για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Τα ηλιακά στοιχεία δεν έχουν κινούμενα μέρη και είναι σχεδόν απαλλαγμένα από την ανάγκη επίβλεψης και συντήρησης.
- Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν με όσο μικρή ισχύ ζητηθεί.
- Δυνατότητα ανεξαρτησίας από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής
- Λογικό κόστος παροχής ενέργειας σε εγκαταστάσεις απομακρυσμένες από δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.



- Η αναλογία της παραγόμενης ισχύος προς το βάρος της διάταξης είναι αρκετά μεγάλη, περίπου 100W/kg.
- Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγικών υλικών και η συνεχής μείωση του κόστους παραγωγής τους, οδηγούν σε σταδιακή μείωση και του κόστους των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

#### Ø Μειονεκτήματα:

- Τα φωτοβολταϊκά δεν μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς φως.
- Η τροφοδοσία τους από την ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι καθόλου σταθερή.
- 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.
- Απαραίτητες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. [6]

### 1.4.1. Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες είναι τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών είναι δηλαδή η καρδιά του φωτοβολταϊκού συστήματος που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγοί σε μορφή δίσκου και δέχονται στην επιφάνεια τους ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης, η διπλή τους όψη (εμπρός – πίσω) εκδηλώνουν μία διαφορά δυναμικού.

Σύμφωνα με μελέτες τα χαρακτηριστικά που μπορεί να προσλάβει και να αποδώσει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο εξαρτάται από το υλικό κατασκευής και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Πειράματα έχουν αποδείξει ότι ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει 0.5-1.0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA/cm<sup>2</sup> της επιφάνειάς του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων επιλέγεται με κύριο κριτήριο την τιμή του ενεργειακού διακένου του, η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου.

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια. Πειραματικές μελέτες έχουν αποδώσει ως μέγιστη θεωρητική απόδοση μετατροπής ηλιακής ακτινοβολίας 25% και πραγματοποιούνται με φωτοβολταϊκά στοιχεία ημιαγωγών με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5eV . [10]

Η ενέργεια που έχει ένα φωτόνιο είναι ανάλογη με την συχνότητα του φωτός που συνδέεται με αυτό. Τα φωτόνια μεγάλου κύματος παρουσιάζουν μικρότερη ενέργεια σε σχέση με τα φωτόνια μικρού κύματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητος ο συνδυασμός της ενεργειακής διαφοράς των ζωνών του υλικού που είναι κατασκευασμένο το φωτοβολταϊκό στοιχείο με το φάσμα του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια του. Οι ημιαγωγοί με ενεργειακή διαφορά από 1,0 eV έως 1,5 eV είναι κατάλληλοι για φωτοβολταϊκά στοιχεία. [10]

Ένα από τα βασικότερα υλικά κατασκευής ηλιακών κυττάρων είναι το πυρίτιο, θεωρείται 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 τις βελτιώσεις της τεχνολογίας του πυριτίου η απόδοση των ηλιακών στοιχείων παρουσιάζει αύξηση της απόδοσης πλησιάζοντας τα ποσοστά της θεωρητικής τιμής τους. Επιπλέον, το κόστος των ηλιακών στοιχείων με την πάροδο των χρόνων έχει παρουσιάσει σημαντική μείωση, αυτό παρατηρείται και σε προηγούμενο υποκεφάλαιο που αναφέρουμε ενδεικτικά κάποιες τιμές. [9]

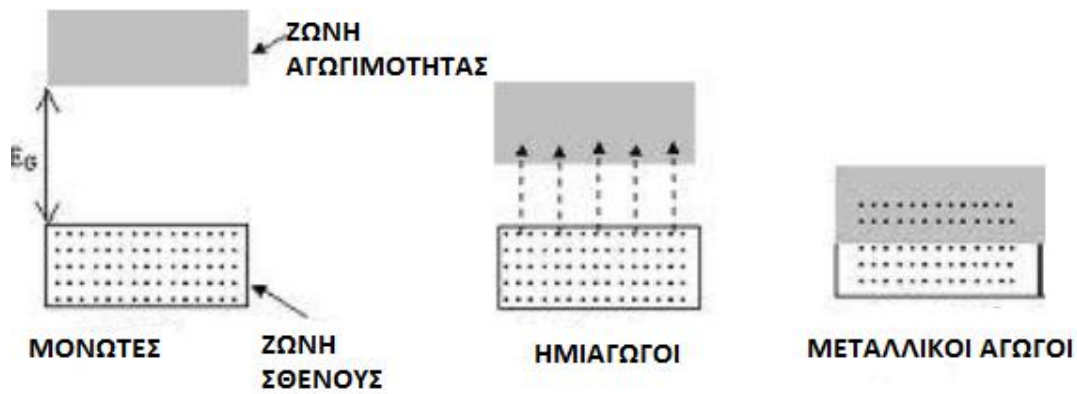
## 1.4.2. Ημιαγωγός

Ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται η ευκολία ενός στερεού υλικού να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η αγωγιμότητα των υλικών εξηγείται μέσω της κβαντομηχανικής. Όταν ένα άτομο είναι μονωμένο έχουμε κβαντισμένες καταστάσεις, δηλαδή τα ηλεκτρόνια κατέχουν διακριτές ενεργειακές στάθμες. Στην περίπτωση που τα άτομα αυξηθούν αρκετά και η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρή τότε δημιουργείται το κρυσταλλικό πλέγμα. Συμβαίνει επικάλυψη των κυματοσυναρτήσεων των εξωτερικών ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαπλατυσμένες ενεργειακές ζώνες.

Οι ενεργειακές ζώνες που δημιουργούνται είναι η ζώνη αγωγιμότητας η οποία είναι κενή. Ωστόσο, υπάρχει και η ζώνη σθένους που είναι πλήρως κατειλημμένη αφού επιτρέπεται μόνο ένα ηλεκτρόνιο ανά ενεργειακή στάθμη. Η απαγορευμένη ζώνη κυμαίνεται σε ένα εύρος  $E_G$ , το οποίο εξαρτάται από την φύση του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των στοιχείων. Σύμφωνα με την τιμή  $E_G$  τα υλικά διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

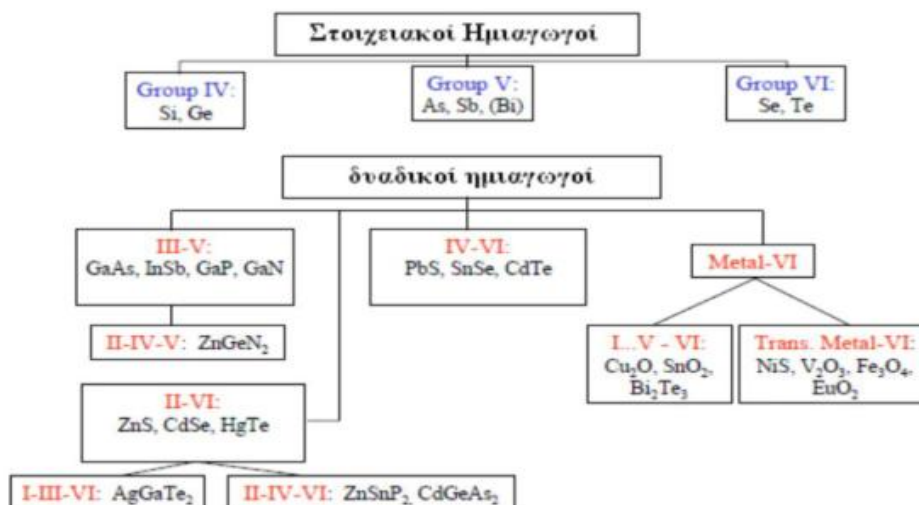
- Μονωτές
- Ημιαγωγοί
- Μεταλλικοί αγωγοί

Ωστόσο, τα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την βάση και τον τρόπο μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την θερμοκρασία. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγωγούς που είναι σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα. Παρακάτω γίνεται ανάλυση των βασικών κατηγοριών.[6]



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση μονωτών, ημιαγωγών, μεταλλικών αγωγών. [6]

- ∅ **Μονωτές (insulators):** το εύρος της ζώνης είναι πολύ μεγάλο κυμαίνεται στα  $5\text{ eV}$  και με 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  $1\text{ eV}$  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 και ηλεκτρονίων με συνέπεια συνεχώς δημιουργούνται και να 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, υπάρχει μικρή προσφορά ενέργειας αφού 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. [6]



Διάγραμμα 2: Στοιχειώδεις ημιαγωγοί και ενώσεις ημιαγωγών. [6]

Με την χρήση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων υπάρχει δυνατότητα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων βασίζονται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή στην άμεση μετατροπή την ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κατασκευάζονται από ημιαγωγία υλικά, όπως το πυρίτιο που είναι το συνηθέστερο. [1]

Ο δημοφιλέστερος ημιαγωγός από το 1950 είναι το πυρίτιο. Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία στηρίζονται σε αυτό. Ωστόσο, και το 90% της σημερινή παραγωγής των φωτοβολταϊκών εξαρτάται από αυτό. Το πυρίτιο είναι το δεύτερο στοιχείο σε αφθονία πάνω στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Επίσης χαρακτηρίζεται από την τετραεδρική κρυσταλλική δομή του. [6]

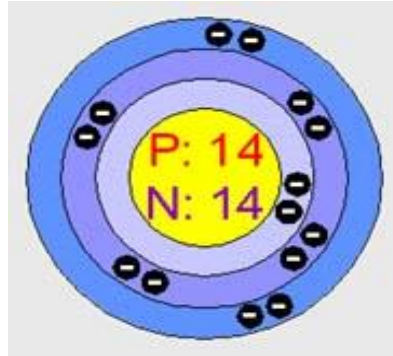
Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, ένα μέρος της ακτινοβολίας επηρεάζει τα ηλεκτρόνια και τους δίνει την δυνατότητα να κινούνται ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Ωστόσο, το ηλεκτρικό πεδίο κατευθύνει τα ηλεκτρόνια που κινούνται σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα να παράγουν ρεύμα, το οποίο έχει καθορισμένη ισχύ αφού εξαρτάται από την ροή των ηλεκτρονίων και την τάση του φωτοβολταϊκού κυττάρου.

Για υπάρξει αυξημένη κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων προστίθενται στο καθαρό πυρίτιο διαφορές προσμίξεις όπως είναι το φώσφορο και το βόριο. Κάθε ένα από τα άτομα του πυριτίου αποτελείται από 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι δύο αποτελούνται από 2 και 8 άτομα αντίστοιχα. Η εξωτερική στοιβάδα αποτελείται από τα υπόλοιπα 4 ηλεκτρόνια. Τα εξωτερικά ηλεκτρόνια συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα του πυριτίου δημιουργώντας κρυσταλλική πυραμιδική δομή.

Όπως προαναφέραμε το πυρίτιο είναι κακός αγωγός ηλεκτρισμού, αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα κινούμε ηλεκτρόνια. Με την διοχέτευση της ενέργειας στο κρυσταλλικό πυρίτιο κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται με αποτέλεσμα να χαλούν την αρχιτεκτονική δομή τους, να πλησιάζουν τα γειτονικά άτομα, με αποτέλεσμα να δημιουργούν ανοικτές θετικές φορτισμένες οπές στην δομή του υλικού. Οι οπές που δημιουργούνται καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων δημιουργώντας έτσι μια ροή ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό.

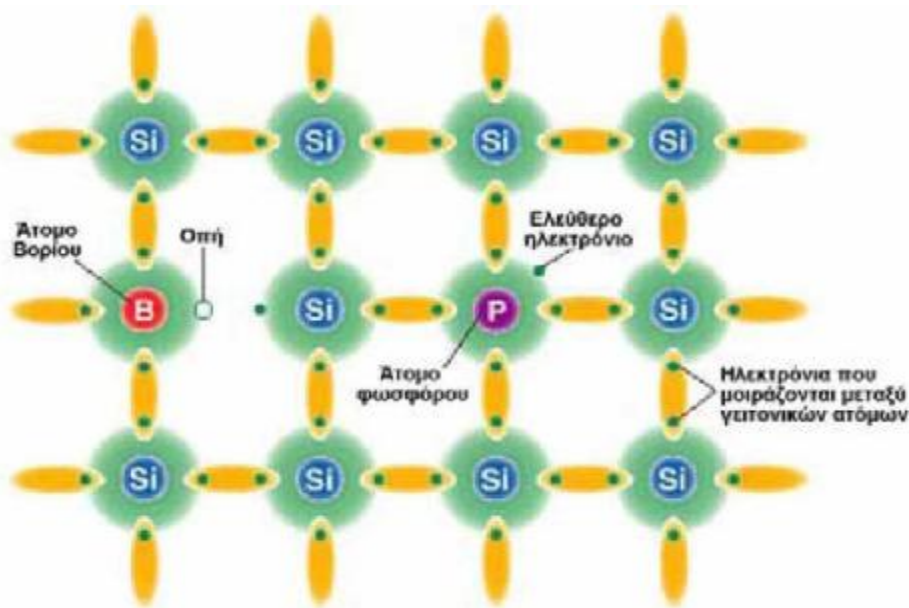
Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που κινείται είναι αρκετά περιορισμός ώστε να είναι χρήσιμος στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται κατανοητός ο λόγος που προστίθενται προσμίξεις όπως ο φώσφορος. Η εξωτερική στοιβάδα του φωσφόρου έχει 5 ηλεκτρόνια εκ των οποίων τα 4 συμμετέχουν σε γειτονικά άτομα πυριτίου και το πέμπτο συγκρατείται ηλεκτροστατικά από τα πρωτόνια του πυρήνα. Το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο απαιτεί σημαντικά χαμηλότερη ενέργεια ενεργοποίησης για να κινηθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος που είναι περισσότερα από του κρυσταλλικού πυριτίου. Οι προσμίξεις που γίνονται μεταξύ του πυριτίου και του φωσφόρου δημιουργούν ημιαγωγούς τύπου n. [1]



Εικόνα 6: Άτομο πυριτίου. [1]

Στην περίπτωση που η πρόσμιξη του πυριτίου γίνει με βόριο οι ημιαγωγοί που προκύπτουν είναι τύπου p. Η εξωτερική στοιβάδα του βορίου έχει 3 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν στους δεσμούς με άτομα του πυριτίου. Σε κάθε άτομο απαιτούνται 8 ηλεκτρόνια για την συμπλήρωση της εξωτερικής στοιβάδας. Στην εξωτερική στοιβάδα του βορίου υπάρχουν 2 κενές θέσεις ηλεκτρονίων με συνέπεια να δημιουργούνται 2 θετικά φορτισμένες οπές στην δομή του υλικού. Η κατάληψη των οπών από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων δίνει την δυνατότητα μεταφοράς θετικών φορτίων στην κρυσταλλική δομή του ημιαγωγού. [1]



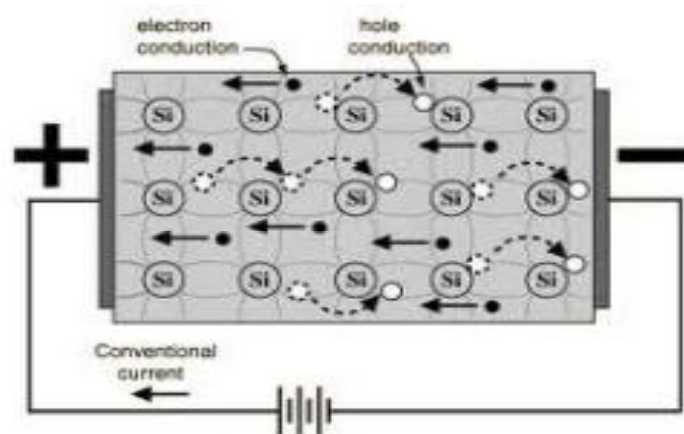
Εικόνα 7: Κρυσταλλικός δεσμός πυριτίου (Si), φωσφόρου (P) και βορίου (B). [1]

### 1.4.3. Επαφή p-n

- Ø **Επαφή p-n ή ένωση p-n:** δημιουργείται στην επιφάνεια επαφής ενός ημιαγωγού - p με έναν ημιαγωγό - n.
- Ø **Δίοδος p-n ή κρυσταλλοδίοδος:** είναι το ηλεκτρονικό εξάρτημα που προκύπτει από την ένωση ενός ημιαγωγού - p με έναν ημιαγωγό - n.

Η κρυσταλλοδίοδος υλοποιείται, επεμβαίνοντας κατάλληλα με ειδικές μεθόδους στα άκρα ημιαγωγίου μονοκρυστάλλου, για να αποφεύγονται οι δυσάρεστες συνέπειες από την ένωση των δύο διαφορετικών ημιαγωγών, οι οποίες εντοπίζονται κυρίως στα όρια των κόκκων. [11]

Οι ιδιότητες των κρυσταλλικών ημιαγωγών εξαρτώνται από την καθαρότητα τους και από το κρυσταλλικό τους πλέγμα. Δεν θα πρέπει να υπάρχουν διαταραχές στην δομή για να δίνουν το καλύτερο αποτέλεσμα. Τα άτομα των ημιαγωγικών υλικών, συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς, όπου είναι και οι πιο ισχυροί, οι οποίοι μπορούν να σπάσουν υπό την επίδραση της ακτινοβολίας ή θερμότητας. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι απελευθέρωση ηλεκτρονίων (αρνητικοί φορείς n), αφήνοντας κενές θέσεις, τις οπές (θετικοί φορείς p).

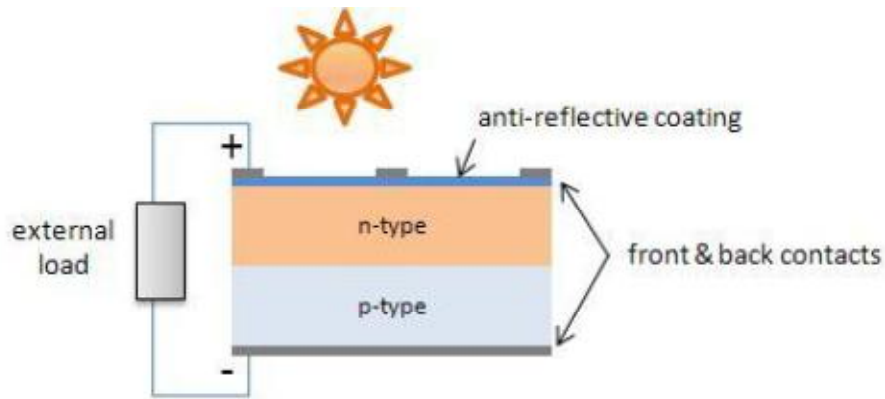


Σχήμα 2: Επαφή p-n. [1]

Οι δύο περιοχές παρουσιάζουν ασυμμετρία ηλεκτρονίων και οπών με αποτέλεσμα στην περιοχή επαφής να ενεργοποιείται το φαινόμενο της διάχυσης. Τα ηλεκτρόνια από την περιοχή n (περίσσεια) μεταφέρονται προς την περιοχή p με συνέπεια να δημιουργείται στον ημιαγωγό n μια περιοχή κοντά στην διεπαφή p-n με αυξημένο το θετικό φορτίο.

Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στις οπές στην περιοχή p (περίσσεια) με αποτέλεσμα να μεταφέρονται στην περιοχή n. Συνέπεια αυτού είναι σε ένα τμήμα του ημιαγωγού p κοντά στην διεπαφή p-n να επικρατεί το αρνητικό φορτίο. Όλα αυτά δημιουργούν μια δυναμική ισορροπία συγκέντρωσης φορτίων ηλεκτρονίων και οπών γύρω από την διεπαφή p-n. Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτή γίνεται χωρίς την επίδραση του φωτός, ακόμα και στην περίπτωση που οι δύο ημιαγωγοί p και n συνδεθούν με έναν αγωγό δεν θα έχουμε την εμφάνιση ρεύματος.

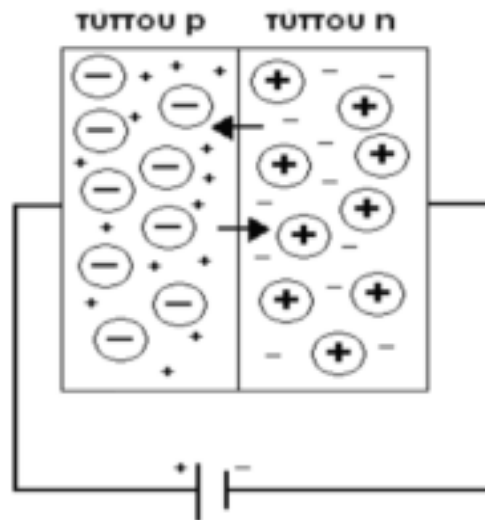
Αποτέλεσμα τον παραπάνω είναι ότι στη διεπαφή p-n αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Η κατεύθυνση του είναι από την περιοχή n στην περιοχή p. Ωστόσο, λόγω της ανάπτυξης του ηλεκτρικού πεδίου το φαινόμενο της διάχυσης δεν έχει την δυνατότητα να συνεχιστεί αφού τα ηλεκτρόνια κινούνται αντίθετα με την φορά του πεδίου και τα θετικά φορτία προς την κατεύθυνση του φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Επίσης, η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται δίοδος. [1]



Εικόνα 8: Διατομή του ηλιακού κυττάρου ενός φωτοβολταϊκού. [6]

#### 1.4.4. Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της διόδου

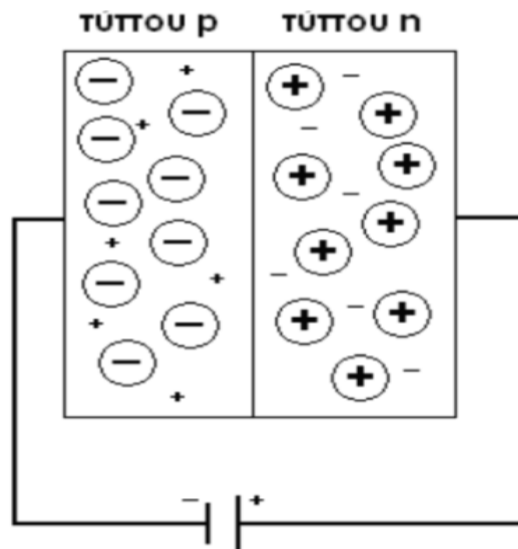
Όταν επιβληθεί ορθή πόλωση στην διόδο p-n παρατηρείται ότι αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου n της διόδου και ο θετικός πόλος με το τμήμα p της διόδου. Συνέπεια είναι τα ηλεκτρόνια να ρέουν χωρίς εμπόδια από την πηγή, διαμέσου του τμήματος τύπου n προς την περιοχή που γίνεται η ένωση όπου επανασυνδέονται με τις οπές, οι οποίες δημιουργούνται με την απομάκρυνση των ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής διαμέσου του τμήματος p.



Σχήμα 3: Συνδεσμολογία ορθής πόλωσης. [6]

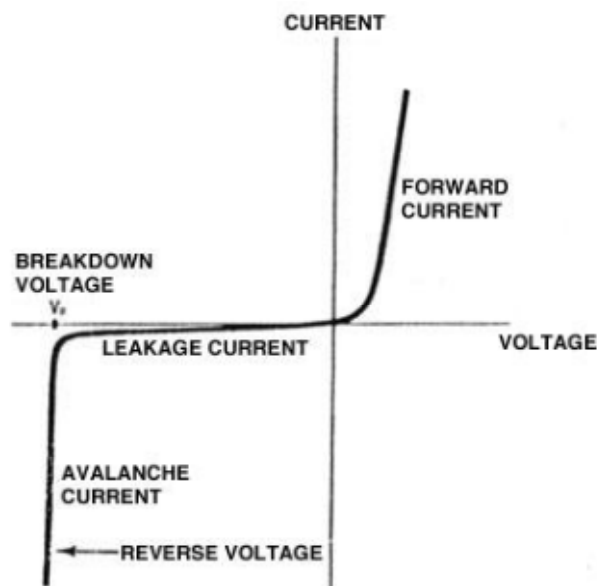
Στην περίπτωση που ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου p και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου n, τότε έχουμε αντίστροφη πόλωση. Με αποτέλεσμα οι οπές του τμήματος pn επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από το τμήμα τύπου n και κατευθύνονται προς τον θετικό πόλο της πηγής. [1]

Συνέπεια αυτού είναι η αυξημένη μείωση των συγκεντρώσεων. Το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνεται και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή. Το αποτέλεσμα είναι η μεγάλη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα που προβάλλει η διόδος. Για παράδειγμα, έστω μία διόδος με ορθή πόλωση έχει αντίσταση  $10\Omega$  στην περίπτωση που γίνει αντίστροφη πόλωση θα έχει αντίσταση  $100M\Omega$ , δηλαδή γίνεται δέκα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη. [1]



Σχήμα 4: Συνδεσμολογία αναστροφής πόλωσης [6]

Στο διάγραμμα που ακολουθεί θα παρατηρήσουμε την ιδιόμορφη μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια διόδο ένωσης p-n, σε συνάρτηση με την τιμή της τάσης και το είδος της πόλωσης που εφαρμόζεται. [1]



Διάγραμμα 3: Χαρακτηριστική I-V Διόδου [12]

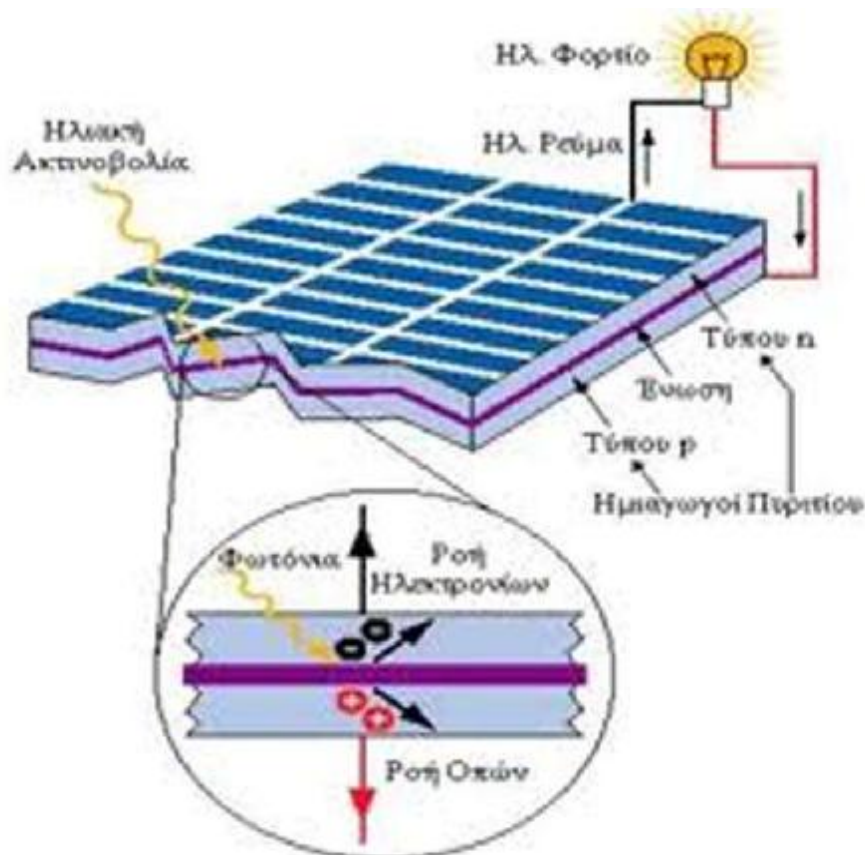


## 1.5. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται όταν οι ημιαγωγοί τύπου p και n έρχονται σε επαφή. Τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου n κινούνται προς τις κενές θέσεις του πυριτίου τύπου p για να τις καλύψουν. Ανάμεσα στις δύο πλευρές δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο και στην ένωση των δύο υλικών υπάρχει ισορροπία. Το ηλεκτρικό πεδίο έχει την ιδιότητα του ηλεκτροδίου, δηλαδή επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να περάσουν από την περιοχή p στην περιοχή n. Όμως αυτό δεν μπορεί να συμβεί αντίστροφα.

Τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας έχοντας το κατάλληλο μήκος κύματος και αφού πέσουν πάνω σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο έχουν την δυνατότητα να διεγείρουν και να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια δημιουργώντας και τις αντίστοιχες οπές. Κάθε φωτόνιο με ενέργεια θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο και μια οπή θα βρεθεί κοντά στην ένωση p-n ημιαγωγών, στην συνέχεια το πεδίο θα εξαναγκάσει ένα ηλεκτρόνιο να κατευθυνθεί στον ημιαγωγό n και θα οδηγηθεί στην οπή p.

Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεγάλη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μια εξωτερική αγωγική οδός τότε τα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να επανέλθουν στην αρχική τους θέση όπου και το ηλεκτρικό πεδίο τα απομάκρυνε. Η ροή αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί την τάση του ρεύματος. [1]

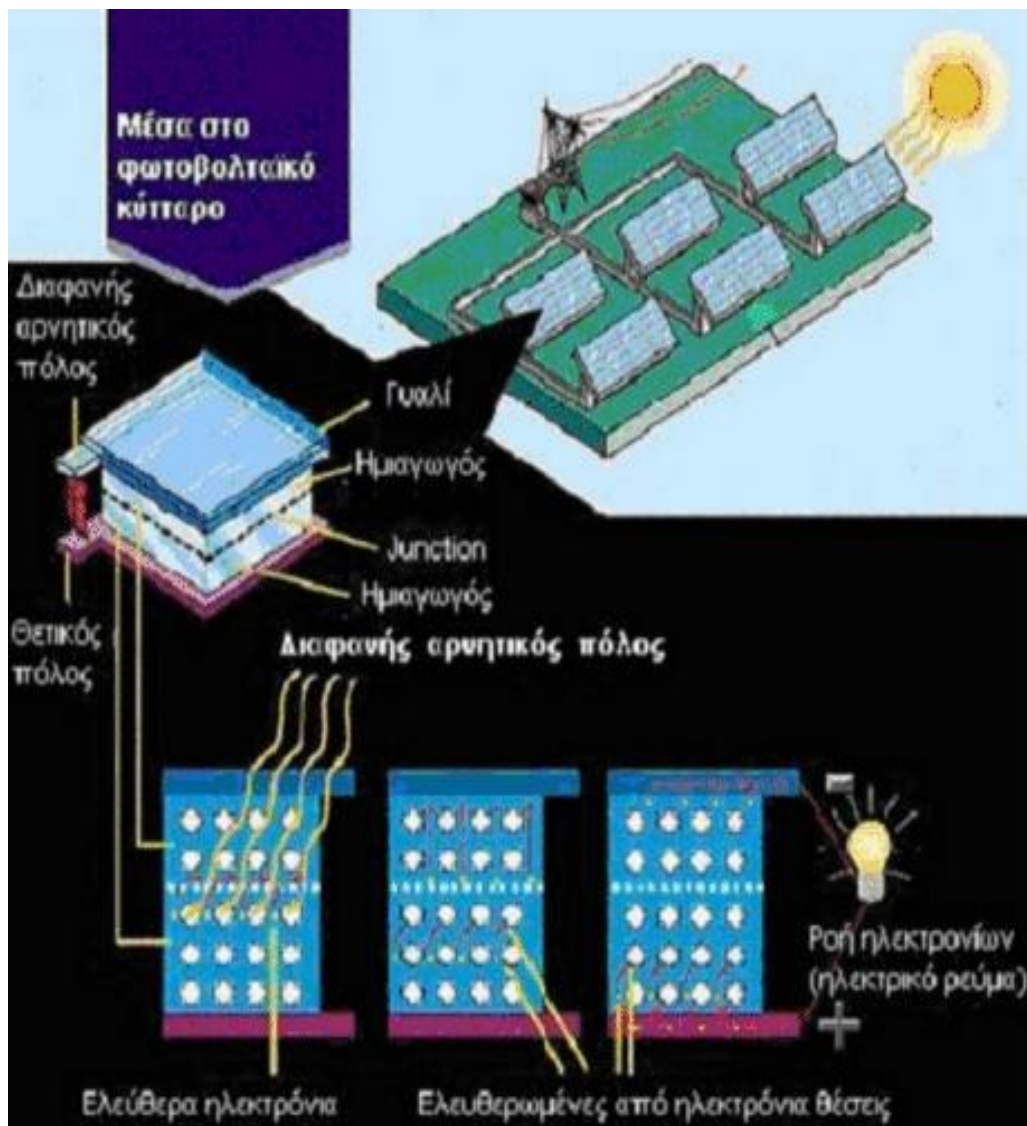


Εικόνα 9: Λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. [1]

Κάθε φωτοβολταϊκό κύτταρο έχει την δυνατότητα να απορροφήσει συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, θεωρητικά αυτό κυμαίνεται στο 25%. Ωστόσο, η μέχρι τώρα χρήση τους δείχνει ότι αποδίδουν περίπου το 15%. Η ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από ένα φάσμα διαφορετικών μηκών κυμάτων με αποτέλεσμα τα φωτόνια να έχουν διαφορετικά επίπεδα ενέργειας.

Στην περίπτωση που τα φωτόνια έχουν χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο δεν έχουν την δυνατότητα να διεγείρουν τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού, ωστόσο διέρχονται μέσα από το φωτοβολταϊκό κύτταρο. Στην περίπτωση όμως που τα φωτόνια μεταφέρουν μεγαλύτερη ή ίση ενέργεια από ένα συγκεκριμένο ποσό που εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κύτταρο (ενεργειακό διάκενο) έχουν την δυνατότητα να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια.

Με την τεχνολογία των ημιαγωγικών υλικών καταφέραμε να γίνει αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολία και να υπάρξει η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρισμού. Η χρήση των αγωγικών υλικών, όπως μέταλλα, θα οδηγούσε σε μεγαλύτερη ροή ηλεκτρονίων αλλά παράλληλα θα παρουσίαζε και χαμηλή τάση πεδίου. [1]



Εικόνα 10: Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. [13]

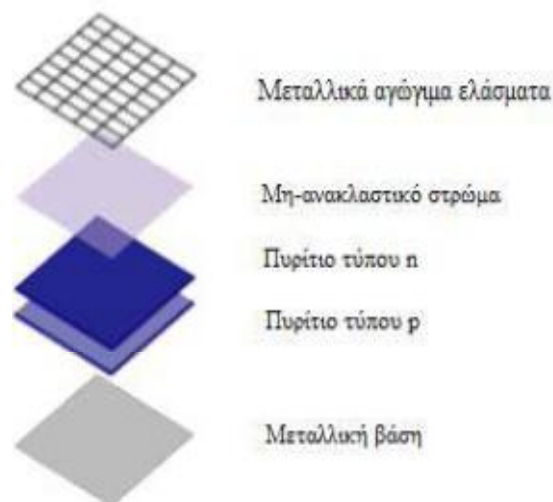
## Κεφάλαιο 2: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

### 2.1. Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η δομή ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μελετημένη έτσι ώστε να έχει συγκεκριμένη μηχανική αντοχή. Για αυτό τον λόγο τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμά τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου. Επίσης, είναι κλεισμένα σε ένα ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό γιατί πρέπει να υπάρχει η κατάλληλη προστασία, να είναι αεροστεγή και υδατοστεγή.

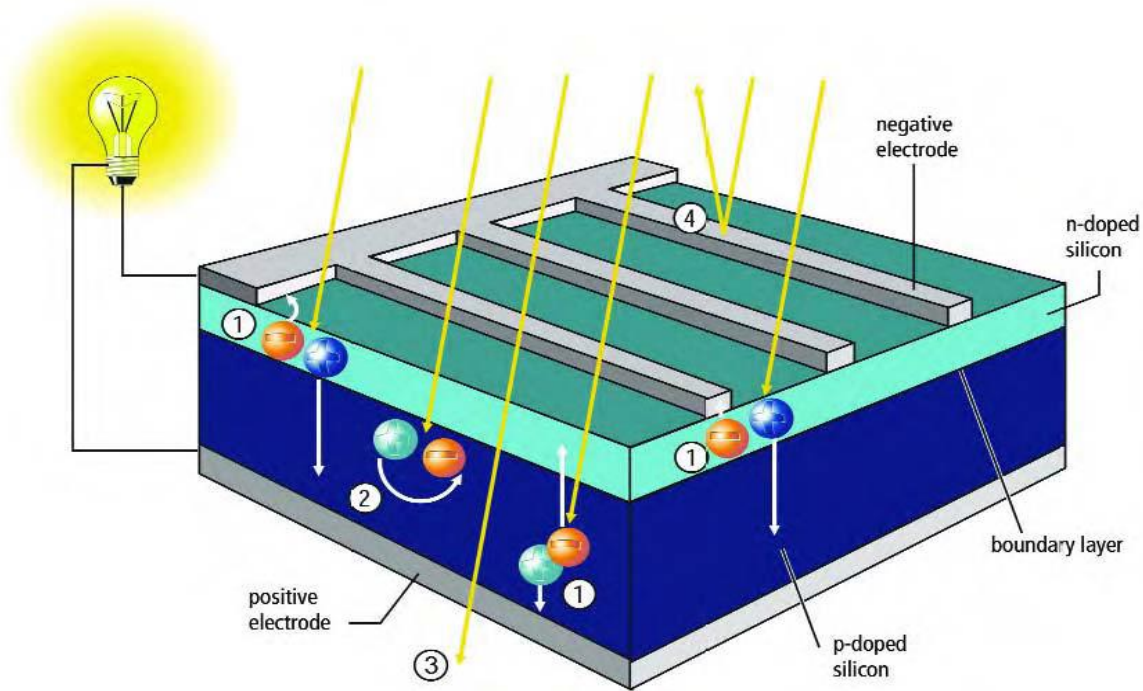
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από:

- Μεταλλική βάση
- Πυρίτιο τύπου P
- Πυρίτιο τύπου N
- Μη ανακλαστικό στρώμα
- Μεταλλικά αγωγικά ελάσματα.



Εικόνα 11: Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου. [14]

Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από πολλά λεπτά οριζόντια και κάθετα ελάσματα. Τα οριζόντια ελάσματα είναι περισσότερα στον αριθμό γιατί αυτά τα στοιχεία συγκεντρώνουν τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται και τα οποία προκαλούν την παραγωγή ρεύματος. Τα ηλεκτρόνια διοχετεύονται στα κάθετα παχιά ελάσματα τα οποία ονομάζονται busbars ή ζυγοί. Οι ζυγοί των στοιχείων μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να έχουμε συνδεδεμένα πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία και την δημιουργία φωτοβολταϊκού πλαισίου. Κάθε πλαίσιο έχει δύο ακροδέκτες τον θετικό και τον αρνητικό πόλο. [1]



Εικόνα 12: 1.Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού στοιχείου όπου:

1. Διαχωρισμός φορτίου
2. Επανασύνδεση
3. Αχρησιμοποίητη φωτεινή ενέργεια
4. Αγωγή ελάσματα [14]

## 2.2. Συνδέσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με τους εξής τρόπους:

- Σε μια απλή σειρά όπου συνδέουμε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μεταξύ τους σε σειρά.
- Σε απλές παράλληλες σειρές ( Series – Parallel, SP ) όπου συνδέουμε φωτοβολταϊκά στοιχεία μεταξύ τους σε σειρά και αυτή τη σειρά τη συνδέουμε παράλληλα με άλλες σειρές. Συνήθως κάθε σειρά αποτελείται από 9 στοιχεία και κάθε πλαίσιο από 4 σειρές.
- Σε διατάξεις αθροιστικές σταυρωτού δεσμού ( Total – Crossed – Tied, TCT), που προκύπτει από την SP διάταξη συνδέοντας τα ηλεκτρικά συστήματα σταυρωτά σε κάθε σειρά του σημείου συνάντησης.
- Σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (bridge – linked) στην οποία όλα τα στοιχεία αλληλοσυνδέονται με γεφυρωτή σύνδεση).
- Σε διάταξη κυψέλης (honeycomb). [1]



## 2.3. Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες ανάλογα με:

- Το υλικό παρασκευής
- Τη δομή του βασικού υλικού
- Τον τρόπο παρασκευής.

Στην συνέχεια της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα αναλύσουμε τις συγκεκριμένες κατηγορίες και τα είδη των φωτοβολταϊκών στοιχείων που υπάρχουν. [1]



Εικόνα 13: Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων. [6]

### 2.3.1. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους

Οι τύποι των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους είναι:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si )
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon). [15]

#### 2.3.1.1. Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si )

Το πάχος στα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si ) κυμαίνεται στα  $0,3mm$  και η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 έως 18% για το πλαίσιο. Όμως, πειραματικές μελέτες έχουν επιτευχθεί με αποδόσεις της τάξης του 24,7%. Το χαρακτηριστικό των μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι και το πλεονέκτημα τους, το οποίο είναι η καλύτερη σχέση απόδοσης. Ωστόσο, μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με άλλες τεχνολογίες.

Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου και είναι οι εξής:

- Η CZ (Czochralski)
- Η FZ (float zone)

Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό έχουν την υψηλότερη απόδοση στο σημερινό εμπόριο. Η απόδοσή πλαισίου φτάνει και το 18,5% . Έχει μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πλαισίου αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία. [15]



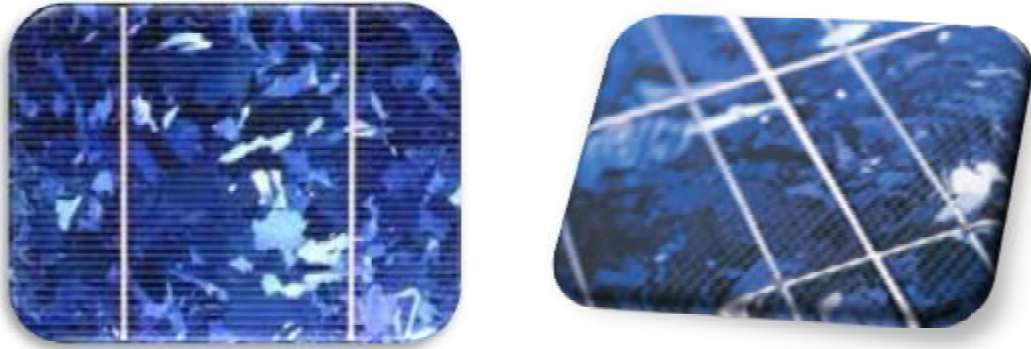
Εικόνα 14: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [15]

### **2.3.1.2. Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)**

Το πάχος στα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si) κυμαίνεται στα 0,3mm. Πειραματικές μελέτες έχουν επιτευχθεί με αποδόσεις της τάξης του 20%. Ωστόσο, οι αποδόσεις του εμπορίου κυμαίνονται από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ). Το κόστος παραγωγής τους είναι μικρότερο σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά για αυτό και η τιμή πώλησης τους είναι χαμηλότερη. Όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της μονοκρυσταλλικής περιοχής τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. [15]

Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι οι εξής:

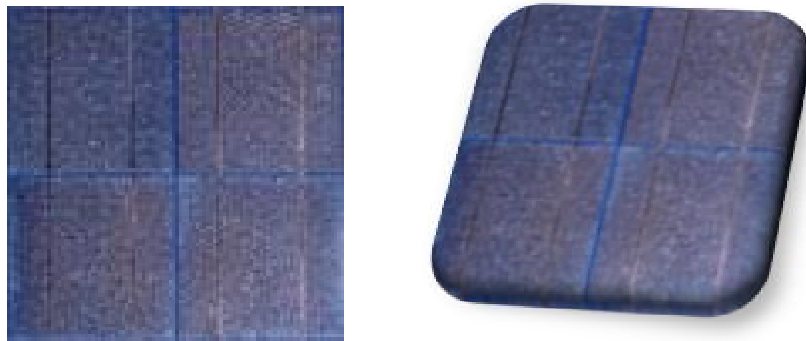
- Η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification)
- Η μέθοδος ανάπτυξης λιωμένου πυριτίου ("χύτευση")
- Η μέθοδος ηλεκτρομαγνητικής χύτευσης EMC. [1]



Εικόνα 15: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου. [15]

### 2.3.1.3. Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινία πυριτίου (Ribbon Silicon) ανήκουν στην νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το πάχος τους κυμαίνεται στα  $0,3mm$  και η απόδοση τους φτάνει πλέον στο 12 έως 13%. Τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά μειώνουν την χρήση του πυριτίου έως και 50% σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής των μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου. Πειραματικές μελέτες έχουν επιτευχθεί με αποδόσεις της τάξης του 18%. [15]



Εικόνα 15: Φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου. [15]

### 2.3.2. Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών υμενίων (THIN FILM)

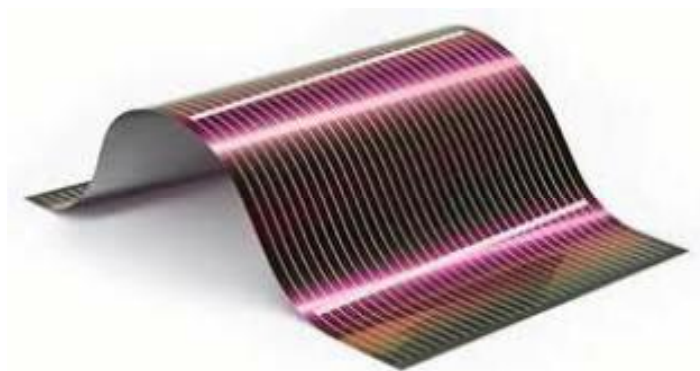
Οι τύποι των φωτοβολταϊκών υλικών λεπτών υμενίων (Thin Film) είναι οι εξής:

- Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)
- Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)
- Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

### 2.3.2.1. Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός χαρακτηρίζεται για την εξαιρετική του απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως. Ωστόσο, η απόδοση του σε σχέση με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται γύρω στο 11%. Πειραματικές μελέτες έχουν επιτευχθεί με αποδόσεις της τάξης του 18,8%, όπου είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως.

Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοση του έχει την δυνατότητα να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Όμως, στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο. [15]



Εικόνα 16 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου CIS. [15]

### 2.3.2.2. Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si) έχουν πολύ χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Τα φωτοβολταϊκά αυτά είναι ταινίες λεπτών επιστρώσεων και παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού, γίνεται πάνω σε υποστρώματα υποστήριξης χαμηλού κόστους όπως το γυαλί ή αλουμίνιο. Η ποσότητα του πυριτίου που διαθέτουν είναι μικρή με αποτέλεσμα και το κόστος τους να μειώνεται αρκετά.

Το όνομα του άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 mm ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 mm. Οι αποδόσεις τους κυμαίνονται από 6 έως 8% και οι εργαστηριακές μελέτες έχουν επιτευχθεί με αποδόσεις ακόμα και 14%. Ένα από τα πλεονεκτήματα του φωτοβολταϊκού στοιχείου a-Si είναι ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Ωστόσο, το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα. Αυτό σημαίνει ότι για να παράγουν την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν



διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επιπλέον, δεν έχουμε ενδείξεις για την διάρκεια ζωής τους για είναι σχετικά νέες τεχνολογίες. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. [15]



Εικόνα 17 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου. [15]

### 2.3.2.3. Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το τελουριούχο κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα, αυτό είναι και από τα βασικά πλεονεκτήματα αφού έχει την δυνατότητα να απορροφά 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ωστόσο, οι σύγχρονες τεχνικές μας δίνουν μια απόδοση που κυμαίνεται από 6 έως 8%. Πειραματικές μελέτες έχουν επιτευχθεί με αποδόσεις τις τάξεις του 16%.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κάδμιο θεωρείται ότι είναι καρκινογόνο, έχουν γίνει αρκετές μελέτες για το ενδεχόμενο η χρήση του να είναι τόσο εκτεταμένη. Επίσης, προβληματίζει και η έλλειψη του τελούριου. Σημαντικότερη χρήση του είναι η ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό, κατάλληλο για ενσωμάτωση στα κτίρια (BIPV Building Integrated Photovoltaic) [15].



Εικόνα 18 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο CdTe [15]

#### 2.3.2.4. Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης διαφόρων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και το ψευδάργυρο. Θεωρείται ότι είναι πιο σπάνιο και από το χρυσό. Ωστόσο, το αρσενικό δεν είναι σπάνιο αλλά δηλητηριώδες, για αυτό και η χρήση του χρειάζεται προσοχή. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα και αγγίζει το 29%.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, επιπλέον έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν την πολύ υψηλή τους απόδοση με συνέπεια να θεωρούνται κατάλληλα για διαστημικές εφαρμογές. Όμως, το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος τα κάνουν να μειονεκτούν σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. [15].



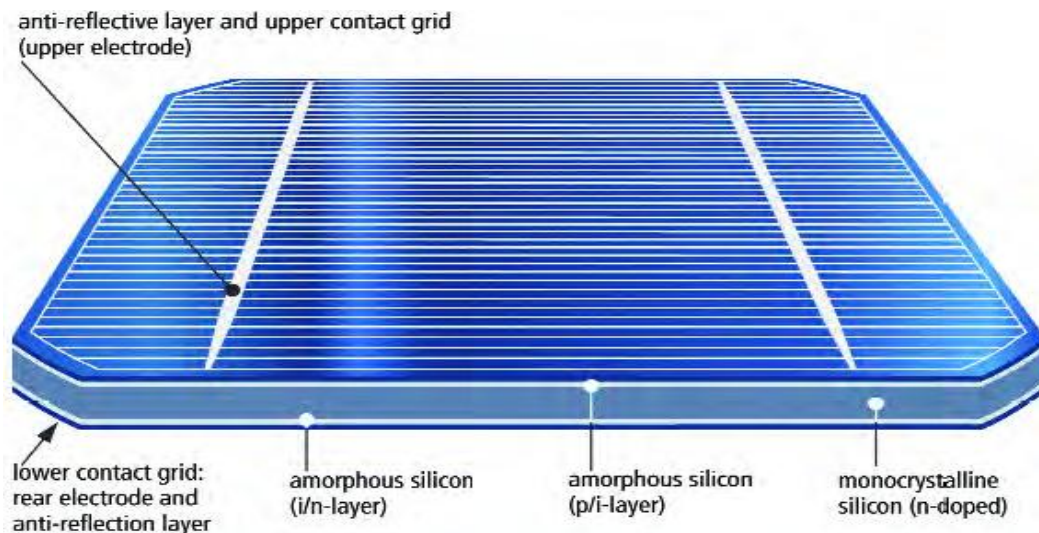
Εικόνα 19 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο Αρσενικού Γαλλίου [15]

#### 2.3.3. Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Μία διαφορετική κατηγορία των φωτοβολταϊκών είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που αποτελούνται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών HIT (Heterojunction with Intrinsic Thinlayer – Ετεροενώσεις με ενδογενή λεπτά στρώματα). Τα πιο δημοφιλή στο εμπόριο είναι τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου ενώ ενδιάμεσα τους υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η υψηλή απόδοση του πλαισίου που κυμαίνεται περίπου στο 17,2% , με συνέπεια να χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%.

Ωστόσο, έχουν και άλλα πλεονεκτήματα τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, όπως η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού τα φωτοβολταϊκά αυτά έχουν τα παραπάνω πλεονεκτήματα, είναι ακριβότερα σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια [15].



Εικόνα 20 : Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο [ 15 ]

### 2.3.4. Άλλες τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών θεωρείται ότι είναι από τις πιο εξελιγμένες στις μέρες μας. Οι ρυθμοί που εξελίσσεται είναι ραγδαίοι και επιστήμονες δημιουργούν καθημερινά νέες πατέντες για καταφέρουν να έχουν βελτιωμένα αποτελέσματα. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι τα νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si) και τα Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία, τα οποία θα αναλύσουμε και στην παρούσα πτυχιακή εργασία. [15].

## 2.4. Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

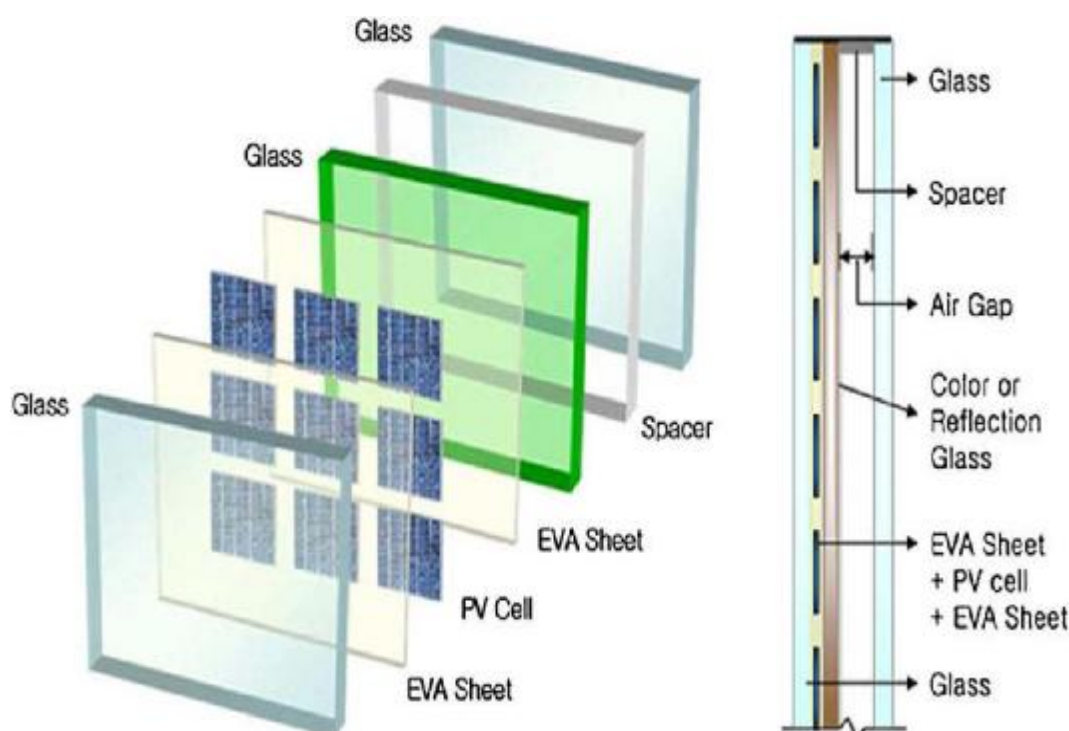
Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για να λειτουργήσει το πλαίσιο τα στοιχεία θα πρέπει να προστατεύονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πλαισίων και εξαρτώνται από το είδος των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και την εφαρμογή τους.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, τα οποία είναι:

- Ειδικό γυαλί
- Συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό (Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Sheet) για την ενθυλάκωση των στοιχείων
- Ηλιακά στοιχεία

- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
- Ειδικό γυαλί
- Κενό αέρος
- Ειδικό γυαλί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περιβάλλονται από δύο κομμάτια γυαλιού ή από ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικό. Υπάρχουν περιπτώσεις που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν την θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό είναι EVA, το οποίο εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. [1]



Εικόνα 21: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου. [1]

Όπως προαναφέραμε, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμούς προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να είναι όμοια, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε μερικές περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας άρα και τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. [1]

## Κεφάλαιο 3: Οργανικά φωτοβολταϊκά

### 3.1. Εισαγωγή

Τα φωτοβολταϊκά είναι η μόνη φορητή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που είναι διαθέσιμη σήμερα. Το κόστος κατασκευής τους είναι μεγάλο σε σχέση με άλλες εναλλακτικές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ο παράγοντας που δημιουργεί το ουσιαστικό κόστος στην παραγωγή φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι η δαπανηρή επένδυση σε τεχνολογίες επεξεργασίας ημιαγωγών. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων 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 των παραπάνω απαιτήσεων, υψηλές τεχνολογίες παραγωγής με μεγάλο όγκο επιφάνειας πρέπει να πραγματοποιούνται με υλικά χαμηλού κόστους. Οι ημιαγωγοί οργανικών και ανόργανων υλικών, έχουν την δυνατότητα 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.

Τα ηλιακά κύτταρα που βασίζονται σε οργανικά υλικά έχουν κάνει αισθητή την παρουσία τους τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια, αυτό οφείλεται στην ραγδαία ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής αγοράς. Η ανάπτυξη αυτή έχει κάνει τους επιστήμονες να μελετούν πιο μακροπρόθεσμες και καινοτόμες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες. Τα οργανικά ηλεκτρονικών υλικών και οι εφαρμογές επίδειξης είναι μια από τις πιο ενδιαφέρουσες τεχνολογίες. Η πρόοδος στα οπτικοηλεκτρονικά μοριακά υλικά εισάγει νέες τεχνολογίες στον τομέα των φωτοβολταϊκών υλικών. Οι οργανικές φωτοβολταϊκές διατάξεις (OPVs) είναι ημιαγωγικές διατάξεις οι οποίες αποτελούνται από ένα ή περισσότερα πολυμερικά στρώματα-ταινίες (polymeric films).

Οι συμβατικές τεχνολογίες, αν και εφαρμόζονται περισσότερα χρόνια, δεν κατάφεραν να επιτύχουν τα ποσοστά κόστους των οργανικών φωτοβολταϊκών. Η τεχνολογία των οργανικών φωτοβολταϊκών έχει την δυνατότητα να θεωρηθεί ιδανική, αφού παρέχει ισότιμες κοστολογίες του δικτύου. Ωστόσο, μειονέκτημα της είναι η χαμηλή μετατροπή της ενέργειας, αφού αγωνίζεται για να προσφέρει απόδοση 5% κάνοντας την συγκρίσιμη με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου που έχουν την ψηλότερη απόδοση αφού κυμαίνεται στο 20%.

Αν τα OPV υποσχεθούν το χαμηλό κόστος και μπορεί υπάρξει η δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσής τους, τότε θα είναι εμπορικά βιώσιμα. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχουν και άλλα εμπόδια για την πραγματοποίηση της χρήσης των οργανικών φωτοβολταϊκών αφού παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία στο οξυγόνο. Οι πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι και σήμερα, είναι σε εργαστηριακούς χώρους χωρίς την έκθεση τους στον αέρα και στην υγρασία. Οι τεχνικές ενθυλάκωσης έχουν την δυνατότητα να προστατέψουν μέχρι ένα βαθμό την έκθεσή τους στο αέρα, όμως είναι ένα επιπλέον κόστος για την παραγωγή τους.

Ακόμα, και αν τα κατάρα δεν καταστραφούν από τον ατμοσφαιρικό αέρα η διάρκεια ζωής τους είναι μικρή επειδή υποβαθμίζονται με την έκθεσή τους στο φως. Επίσης, το

μέγεθος των κυττάρων που κατασκευάζονται είναι της τάξεως του  $1 \text{ mm}^2$ . Για να μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να κατασκευάζονται για περιοχές της τάξης των 10 ή  $100 \text{ cm}^2$ . Όπως έχουμε προαναφέρει τα κύτταρα θα πρέπει να είναι σε θέση να συναρμολογηθούν σε μεγαλύτερα πάνελ για περιοχές της τάξεως  $\text{m}^2$ . [6]

### 3.1.1. Ιστορική Αναδρομή

Τα OPV εντοπίστηκαν για πρώτη φορά 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 Μάρμπαρα, Καλιφόρνια, και 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 για παράδειγμα, με το συμβατικό πυρίτιο ή τα βαρέα μέταλλα η ένωση μπορεί να δημιουργήσει ημιαγωγούς.

Δημιουργώντας ειδικούς συνδυασμούς υλικών, όπου ένα υλικό ενώνεται με ένα δεύτερο έχουν την δυνατότητα δημιουργίας κόμβων 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.

Οι διασταυρώσεις αυτές έχουν ιδιαίτερη σημασία 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. [6]

## 3.2. Οργανικά Φωτοβολταϊκά

Στα ηλεκτροχημικά ή οργανικά στοιχεία η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιείται σε οργανικά συστήματα. Τα πολυμερή ηλιακά κύτταρα είναι ένας τύπος των οργανικών φωτοβολταϊκών. Είναι πλαστικά ηλιακά κύτταρα τα οποία εμφανίζονται με την μορφή λεπτού φιλμ. Η αρχική τους μορφή ήταν υγρή και στην πορεία των ερευνών έφτασε σε πηκτή, παχύρρευστη μορφή.

Σκοπός των ερευνητών είναι να δημιουργήσουν και να κατασκευάσουν στερεά οργανικά στοιχεία, ώστε να σχηματίσουν τα πάνελ. Τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν ευκαμψία, αυτό συμβαίνει γιατί η πρώτη ύλη είναι υγρό διάλυμα. Ωστόσο, ένα ακόμα χαρακτηριστικό τους είναι η πολυχρωμία λόγω των χρωστικών ουσιών στο διάλυμα. Η απόδοση των πολυμερών οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει φτάσει σήμερα στο 2,5%.

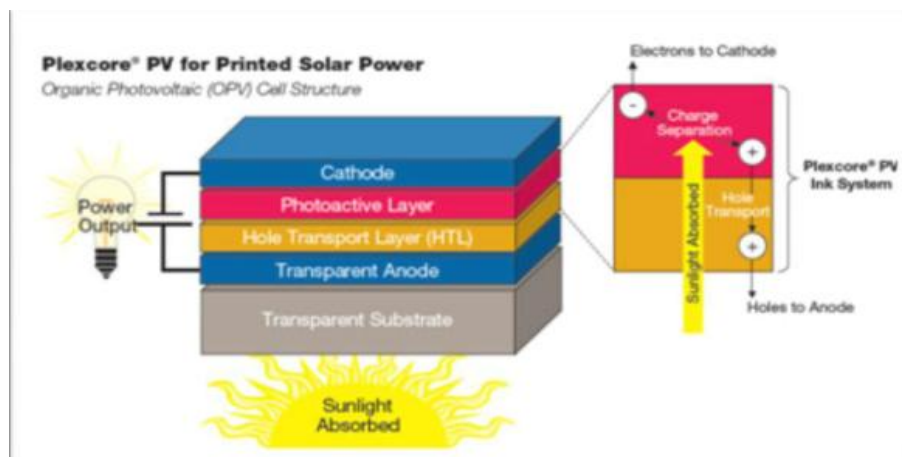


Τα πολυμερή οργανικά φωτοβολταϊκά έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, με μία γρήγορη μάτια παρατηρούμε ότι το βασικό πλεονέκτημα τους είναι το χαμηλό τους κόστος. Ωστόσο, ο μικρός χρόνος ζωής και το χαμηλό ποσοστό απόδοσης είναι τα μειονεκτήματα που πρέπει να βελτιωθούν για να μπορέσει η νέα τεχνολογία να εμπορευματοποιηθεί.

### 3.2.1. Αρχή λειτουργίας οργανικών φωτοβολταϊκών

Η αρχή λειτουργίας των οργανικών ηλιακών κελιών βασίζεται στην ίδια θεωρία των ηλιακών κελιών του πυριτίου. Σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από το φως του ήλιου. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού δύο λειτουργιών που λαμβάνουν χώρα στον ημιαγωγό όταν προσπίπτει το ηλιακό φως πάνω του και είναι οι εξής:

- ∅ Πρώτη λειτουργία: η παραγωγή μέσω φωτός ηλεκτρικών φορτίων (ηλεκτρόνια ή οπές) σε ένα ελαφρύ απορροφητικό υλικό
- ∅ Δεύτερη λειτουργία: ο διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στην αγώγιμη επαφή η οποία θα μετατρέψει το διαχωρισμό αυτό σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 22: Παραγωγή ενέργειας στα οργανικά φωτοβολταϊκά. [6]

Οι οργανικές και ανόργανες διατάξεις έχουν μια βασική διαφορά, η απορρόφηση φωτός δεν δημιουργεί ελεύθερους φορείς φορτίου αλλά δεσμευμένους. Το δεσμευμένο ζευγάρι θετικού κα αρνητικού φορτίου ονομάζεται εξιτόνιο. Μεταξύ δύο ηλεκτρονίων τοποθετείται το φωτοενερό υλικό το οποίο είναι μείγμα πολυμερούς με κάποια νανοδομή. Η μία πλευρά είναι διαφανή στη οποία έχει την δυνατότητα να περνά και να εισέρχεται το ηλιακό φως και η άλλη πλευρά είναι μεταλλική.

Όταν το φωτοενεργό υλικό φωτιστεί, τότε το φως που απορροφάται διεγείρει τα ηλεκτρόνια του πολυμερούς, αποτέλεσμα αυτού είναι η απομάκρυνση των ηλεκτρονίων από τον πυρήνα. Το πολυμερές σχηματίζεται από θετικό και αρνητικό φορτίο. Ο συνδυασμός των δύο αντίθετων φορτίων είναι το εξιτόνιο, το οποίο μπορεί να διαχωριστεί σε ελεύθερα φορτία μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου. [6]

### 3.2.1.1. Η έννοια των Εξιτονίων

Εξιτόνιο ορίζεται ένα ζευγάρι ηλεκτρονίων - οπών συνδεδεμένο από την δύναμη Coulomb (exciton Wannier, είναι ηλεκτρικά ουδέτερο με μια μόνο διπολική στιγμή. Τα εξιτόνια υπάρχουν στα εξής:

- Ημιαγωγούς
- Μοριακούς κρυστάλλους
- Πολυμερή

Όταν ένα ημιαγωγίμο υλικό απορροφά ένα φωτόνιο, τότε δημιουργείται το εξιτόνιο. Αποτέλεσμα αυτού, η διέγερση ενός ηλεκτρονίου από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας. Η κατάσταση που επικρατεί με την απουσία ηλεκτρονίου είναι μια θετικά φορτισμένη οπή συγκεκριμένης θέσης. Στην συνέχεια το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στην θέση αγωγιμότητας δέχεται ελκτική δύναμη Coulomb από την αντίστοιχη οπή.

Ως εξιτόνιο Frenkel μπορεί να θεωρηθεί ένα εξιτόνιο εάν το ζευγάρι είναι περιορισμένο σε μια μοριακή μονάδα ή ως Wannier-Mott εάν επεκτείνεται πέρα από πολλές μοριακές μονάδες. Στην περίπτωση που εντοπίζεται σε μερικές παρακείμενες μοριακές μονάδες ονομάζεται φορέας φορτίου (charge transfer). Η έννοια του εξιτονίου δημιουργήθηκε για να περιγραφεί η διέγερση των ατόμων σε μία κυψελωτή δομή μονωτών, αυτή η διεγερμένη κατάσταση έχει την δυνατότητα να ταξιδέψει σε μορφή σωματιδίου μέσα από τη δικτυωτή δομή χωρίς την απόλυτη μεταφορά φορτίου.

Ο διαχωρισμός των εξιτονίων μπορεί να επιτευχθεί από το εσωτερικό πεδίο που δημιουργεί το διαφορετικό δυναμικό ιονισμού των δύο ηλεκτροδίων. Ωστόσο, τα ελεύθερα φορτία που δημιουργούνται έχουν την δυνατότητα να επανασυνδεθούν μετά από τη μετακίνηση τους κατά μερικές δεκάδες nm (10-9 nm), απόσταση πολύ μικρότερη από τη διαδρομή που πρέπει να διανύσουν μέχρι τα ηλεκτρόδια.

Για την ενίσχυση του διαχωρισμού των εξιτονίων και για την μείωση των φορέων του φορτίου ενσωματώνεται μέσα στο πολυμερές ένα ανόργανο ή οργανικό υλικό. Σκοπός του υλικού είναι να υποδέχεται και να μεταφέρει τα ηλεκτρόνια. Αποτέλεσμα αυτού, η ανάμιξη των δύο υλικών δημιουργεί την ανάπτυξη της διεπιφάνειας αφού το πολυμερές αποδίδει ηλεκτρόνια και το ανόργανο υλικό τα υποδέχεται. Στο εσωτερικό αναπτύσσεται ηλεκτρικό πεδίο με συνέπεια να προκαλεί διαχωρισμό των εξιτονίων.

Το πολυμερές είναι ο δότης και ο δέκτης των ηλεκτρονίων που μεταφέρουν τα θετικά και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόδια αντίστοιχα. Μια πυκνή κατανομή των διεπιφανειών μέσα στο σύνθετο υλικό εγγυάται μία αποδοτική δημιουργία και μετακίνηση των φορέων φορτίου.[6]

### 3.2.2. Συζυγή Πολυμερή (Conjugated Polymers)

Τα πολυμερή αποτελούνται από μακρομόρια τα οποία είναι μεγάλων διαστάσεων, δηλαδή, μεγάλου μοριακού βάρους αποτελούμενο από μικρές χημικές δομικές μονάδες που ονομάζονται μονομερή. Τα μακρομόρια είναι αλυσίδες οι οποίες έχουν για κρίκους τα μονομερή. [17] Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των πολυμερών είναι ότι έχουν την



δυνατότητα να λειτουργούν σαν μονωτές του ηλεκτρικού ρεύματος, με συνέπεια να χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια τα πολυμερή υλικά χρησιμοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδυάζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών ή των μετάλλων με άλλες ιδιότητες. Οι επιστήμονες ανοίγουν ένα νέο κεφάλαιο στην έρευνα με σκοπό την εκμετάλλευση των πολυμερών σε νέες εφαρμογές και την βιομηχανία. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες που έχουν τα πολυμερή τα κάνουν να ξεχωρίζουν βάση των πλεονεκτημάτων τους όπως, το χαμηλό κόστος, χαμηλή τοξικότητα και ευκολία εναπόθεσης σε μεγάλα εύκαμπτα υποστρώματα χαμηλού βάρους.[16]

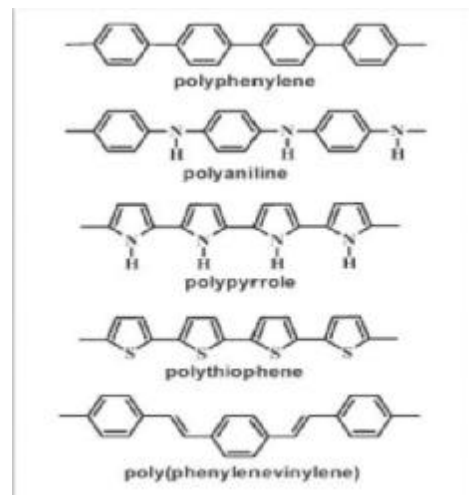
Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

- ∅ Πολυμερείς ηλεκτρολύτες ή ιοντικά πολυμερή: η μεταφορά φορτίου γίνεται με ιοντικό
- ∅ Αγώγιμα πολυμερή: ο μηχανισμός μεταφοράς φορτίου είναι κυρίως ηλεκτρονιακής φύσης. [18]

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολούμαστε με τα αγώγιμα πολυμερή, αφού τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. 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:

- Polyphenylene
- Polyaniline
- Polythiophene
- Poly(phenylenevinylene)



Εικόνα 23: Παραδείγματα αγώγιμων οργανικών πολυμερών. [6]

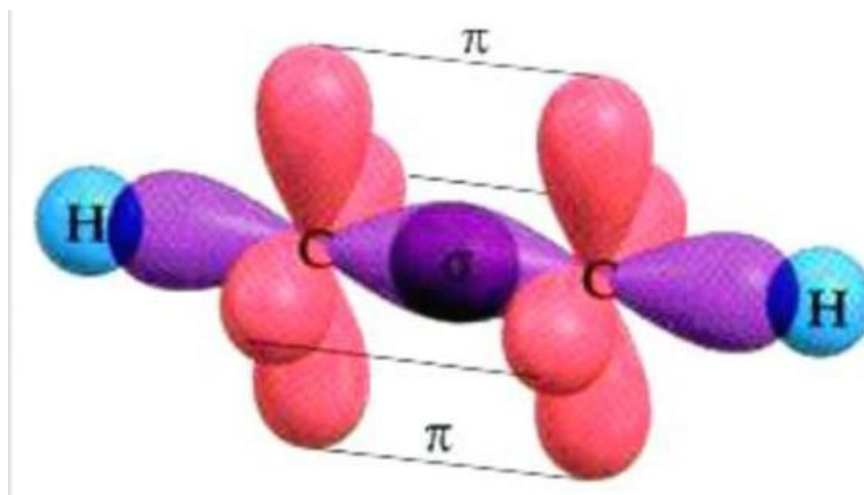
Άρα συμπέρασμα όλων αυτών είναι ότι τα πολυμερή συμπεριφέρονται σαν μονωτές ή ημιαγωγοί, επίσης μετά από νόθευση (doping), γίνονται αγωγοί. Ο άνθρακας, είναι το βασικό στοιχείο ενός οργανικού μορίου. Τα άτομα άνθρακα συνδέονται μαζί με ομοιοπολικούς δεσμούς, όπου είναι και πιο ισχυροί δεσμοί και δημιουργούν μια πολυμερή αλυσίδα η οποία

αποτελείται από μικρές μονάδες, επαναλαμβανόμενες σε όλη την αλυσίδα. Οι μονάδες αυτές ονομάζονται μονομερή και είναι οι δομικές μονάδες του πολυμερούς. [16]

Η ιδιότητα των συζυγών πολυμερών είναι η παρουσία συζυγών διπλών δεσμών κατά μήκος της κύριας στήλης του πολυμερούς το οποίο έχει με συνέπεια τα υλικά να έχουν υψηλή ανισοτροπία στην αγωγιμότητά τους, η οποία είναι υψηλότερη κατά μήκος της αλυσίδας. Η ηλεκτρονιακή δομή των συζυγών πολυμερών έχει την δυνατότητα να τροποποιηθεί με χημικές ή ηλεκτροχημικές διεργασίες ντοπαρίσματος. Η χημική αντίδραση που πραγματοποιείται είναι οξείδωση ή αναγωγή αυτών των συζυγών πολυμερών από δέκτες ή δότες ηλεκτρονίων αντίστοιχα. Η οξείδωση του μακρομορίου αντιστοιχεί σε ντοπάρισμα p τύπου ενώ η αναγωγή σε ντοπάρισμα n-τύπου. [18]

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 έχουν συμπεριφορά χημικού δεσμού. 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.

Σύμφωνα με τον τρόπο που υβριδοποιούν τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους στον άνθρακα, ένας έχει την  $sp^3$ , την  $sp^2$  ή την υβριδοποίηση  $sp$ . Στα συζυγή πολυμερή τα τρία από τα ηλεκτρόνια, έχουν ως εξής δύο με 2p ( $2p_x$  και  $2p_y$ ) και ένα με 2s με συνέπεια να 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 s- 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. [16]



Εικόνα 23: Απλή μοριακή τροχιακή αντιπροσώπευση με δεσμούς τύπου – σ και Τύπου - π. [6]

### 3.3. Ηλεκτρονικές Ιδιότητες των Συζυγών Πολυμερών

Τα συζυγή πολυμερή είναι ηλεκτρικοί μονωτές ή ημιαγωγοί. Η δομή τους είναι παρόμοια με των ανόργανων υλικών και οι ενεργειακές τους ζώνες παρουσιάζουν πανομοιότυπη συμπεριφορά. Η ημιαγωγική συμπεριφορά των συζυγών πολυμερών συσχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των δεσμών τύπου π-. Οι δεσμοί αυτοί είναι διασκορπισμένοι σε όλο το μόριο και η κβαντομηχανική επικάλυψη των τροχιακών pz- σε δύο άτομα του άνθρακα χωρίζει τον εκφυλισμό τους και παράγει δύο τροχιακούς, μια συνδετική και μια μη συνδετική τροχιά π-

Οι ενεργειακές ζώνες που διαμορφώνονται έχουν ως εξής, το τροχιακό π- με την χαμηλότερη ενέργεια παράγει την ζώνη σθένους, σε αντίθεση με το τροχιακό π\*- που έχει την υψηλότερη ενέργεια και παράγει την ζώνη αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόδια που βρίσκονται σε μία πολυμερή αλυσίδα συμμετέχουν στο σύστημα π- και οι συνδεμένες και μη συνδεμένες τροχιές εκφυλίζονται περαιτέρω.

Σύμφωνα με την ζώνη σθένους και την αγωγιμότητα 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 pz και του αριθμού ηλεκτρονίων συμμετέχουν στις αυξήσεις συστημάτων π, τα πλάτη των ενεργειακών ζωνών γίνονται ευρύτερα, αποτέλεσμα αυτού είναι το κενό ενέργειας μεταξύ τους μειώνεται.

Το ενεργειακό διάκενο που δημιουργείται είναι το χάσμα των ζωνών, δηλαδή η διαφορά ενέργειας μεταξύ του HOMO και του LUMO. Οι διαφορά αυτή κυμαίνεται από 1.5 σε 3.5 eV. Παρατηρούμε λοιπόν ότι τα περισσότερα πολυμερή είναι ενεργά στην περιοχή του ορατού μήκους κύματος. Κατά την διέγερση ενός ηλεκτρονίου από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας παρουσιάζεται δυναμικό ισοδύναμο με τη μεταφορά ηλεκτρονίου από ένα δεσμικό τροχιακό σε ένα αντί-δεσμικό τροχιακό. Η ενέργεια που παρέχεται είναι μεγαλύτερη από το χάσμα ζώνης.

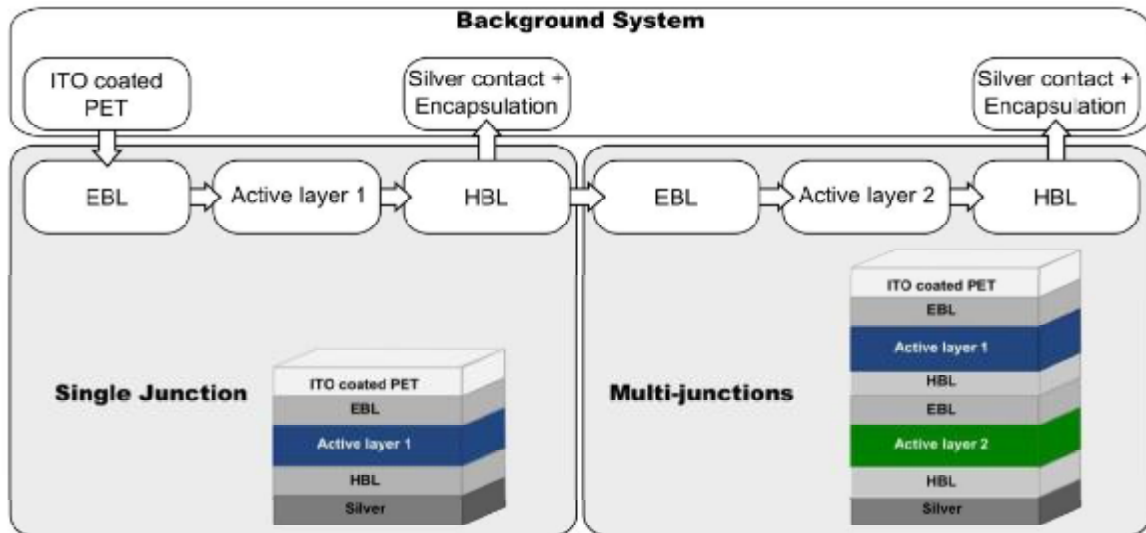
Η συζυγία μίας πολυμερής αλυσίδας δεν έχει την δυνατότητα να επεκταθεί σε όλο το μήκος της. Σε μία αλυσίδα παρουσιάζονται αρκετές ατέλειες και ελαττώματα με αποτέλεσμα να διακόπτεται η τροχιακή επικάλυψη. Άρα η αλυσίδα θα διαχωριστεί σε τμήματα που θα χαρακτηρίζονται από διαφορετικό αριθμό επανάληψης μονάδων και διαφορετικό ενεργειακό χάσμα. Τα μεγάλα τμήματα θα έχουν στενό ενεργειακό διάκενο σε αντίθεση με τα μικρά τμήματα που το ενεργειακό τους διάκενο τους θα είναι ευρύ.

Τα πολυμερή αποτελούνται από μία στήλη ατόμων άνθρακα η οποία είναι μακριά, συνέπεια αυτού είναι ότι τα πολυμερή παρουσιάζονται σε μονοδιάστατα συστήματα. Οι δεσμοί που δημιουργούνται είναι ισχυροί με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μεγάλη αλληλεπίδραση από τις γειτονικές αλυσίδες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ένωση μεταξύ των διεγέρσεων των ηλεκτρονίων και της τοπικής διαμόρφωσης της πολυμερούς αλυσίδας είναι πολύ ισχυρή. Δημιουργείται δηλαδή μια οικογένεια διεγερμένων καταστάσεων όπως είναι τα εξιτόνια. αντιπροσωπεύουν τις ηλεκτρονικές διεγέρσεις του πολυμερούς σώματος συνδυασμένες με τις σχετικές στρεβλώσεις του δικτυωτού πλέγματος τους. [18][22]

### 3.4. Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά διακρίνονται στα εξής:

- Μονοστρωματικές διατάξεις
- Πολυστρωματικές διατάξεις.



Εικόνα 23: Μονοστρωματικές, πολυστρωματικές διατάξεις. [6]

#### 3.4.1. Μονοστρωματικές διατάξεις (Single Layer)

Η πρώτες πειραματικές μελέτες για την δημιουργία οργανικών φωτοβολταϊκών έγινε με τις μονοστρωματικές διατάξεις. Οι διατάξεις αυτές έχουν ένα ενεργό στρώμα που αποτελείται από ένα οργανικό υλικό, το οποίο βρίσκεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με διαφορά δυναμικού. Επίσης, ένα από τα δύο είναι διαφανή να μπορεί να το διαπεράσει η ηλιακή ακτινοβολία και να φτάσει στο φωτοευαίσθητο στρώμα.

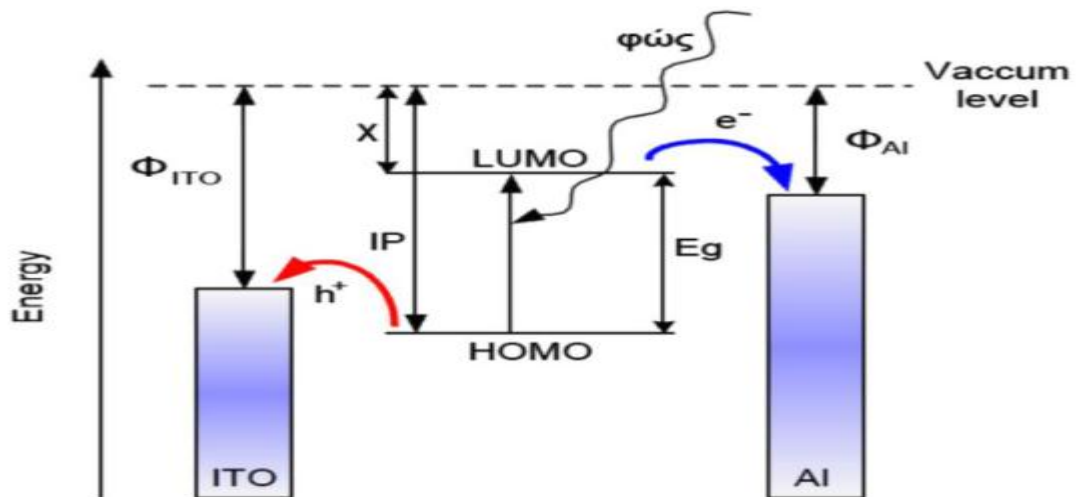
Η λειτουργία στηρίζεται στο οργανικό υλικό της διάταξης αφού σε αυτό γίνεται η απορρόφηση του φωτός, η δημιουργία των εξιτονίων, αλλά και η διάσπαση τους σε ξεχωριστούς φορείς. Στην συνέχεια οι φορείς που έχουν δημιουργηθεί κατευθύνονται στα ηλεκτρόδια, αυτό συμβαίνει γιατί λόγω της διαφοράς δυναμικού των ηλεκτροδίων έχει δημιουργηθεί ηλεκτρικό πεδίο.

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. 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 έχει την λιγότερη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας. Για κάποιους οργανικούς ημιαγωγούς το πάχος του υμενίου θα πρέπει να είναι της τάξης των 100 nm, ώστε η απορροφητικότητάς τους να κυμαίνεται σε αξιόλογα επίπεδα. Η αύξηση του

πάχους του υμενίου οδηγεί σε καλύτερη απορροφητικότητα του φωτός. Ωστόσο, μόνο μερικά αποτα δημιουργούμενα εξιτόνια θα φτάσουν στη διεπιφάνεια και να διαχωριστούν.

Βάσκο μειονέκτημα 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. [21]



Εικόνα 24: Ενεργειακό διάγραμμα μονοστρωματικής διάταξης.[6]

### 3.4.2. Διστρωματικές διατάξεις

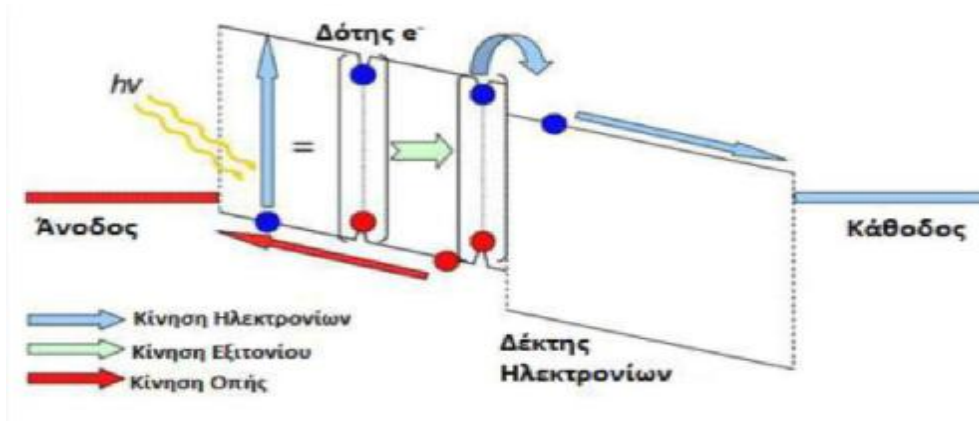
Οι μονοστρωματικές διατάξεις παρουσίαζαν διαφορές δυσλειτουργίες με αποτέλεσμα οι επιστήμονες να αναζητήσουν και να παρασκευάζουν νέα ενεργά υλικά τα οποία αποτελούνται από μία διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών. Τα υλικά αυτά συμπεριφέρονται σαν δότης ηλεκτρονίων και το άλλο σαν δέκτης. Οι πρώτες πειραματικές μελέτες πραγματοποιήθηκαν σε ενεργό υλικό αποτελούμενο από δύο διαφορετικές χρωστικές, αποτέλεσμα των πειραμάτων ήταν η αύξηση της απόδοσης.

Στις μονοστρωματικές διατάξεις όσο και στις διστρωματικές διατάξεις, 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 ( $\chi$ ) και το δυναμικό ιονισμού (IP) μεταξύ των δύο υλικών.

Το ηλεκτρικό πεδίο που θα δημιουργηθεί για να ευνοήσει το διαχωρισμό των φορτίων, θα πρέπει να έχει δυναμικό ιονισμού και ηλεκτρονική συγγένεια μεγαλύτερα στον δότη ή στον δέκτη, με συνέπεια 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

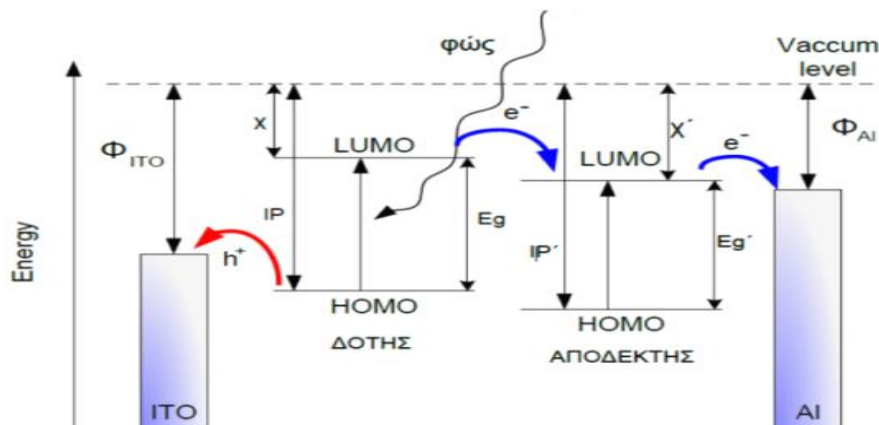
διαφορά στα τροχιακά LUMO μεταξύ του δότη και του δέκτη, οπότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταφερθεί. Βασικό πλεονέκτημα των διατάξεων αυτών είναι ότι η δημιουργία και η διάσπαση των εξιτονίων γίνεται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών που συνθέτουν το ενεργό υλικό και στη συνέχεια οι φορείς που δημιουργούνται, μεταφέρονται σε διαφορετικά υλικά.



Εικόνα 25: Bi-layer δομή οργανικών φωτοβολταϊκών.[6]

Η μορφή της διεπιφάνειας των δύο υλικών παίζει σημαντικό ρόλο στην κατασκευή αποδοτικών διατάξεων. Με την χρήση δύο διαφορετικών ημιαγωγών γίνεται καλύτερη ρύθμιση του ενεργειακού χάσματος (band gap) και βελτιστοποίηση της απορρόφησης του φωτός. Τα υλικά της διεπιφάνειας 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 που γίνεται επαφή με 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. Ο δέκτης ηλεκτρονίων είναι το φουλερένιο και ο δότης το πολυμερές. Η καλή αγωγιμότητα στη μεταφορά οπών ή ηλεκτρονίων είναι βασικό χαρακτηριστικό για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις αυτές. Ωστόσο, σημαντικό ρόλο στην κατασκευή αποδοτικών διατάξεων παίζει ο καλός έλεγχος της διεπιφάνειας μεταξύ δότη και δέκτη. [21]



Εικόνα 26: Ενεργειακό διάγραμμα διστρωματικής διάταξης.[6]



### 3.4.3. 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. Το 1995 επιστήμονες έδωσαν την έννοια των bulk heterojunction οργανικών φωτοβολταϊκών για να περιγράψουν 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), εμφανίζονται δηλαδή σαν μίγμα.

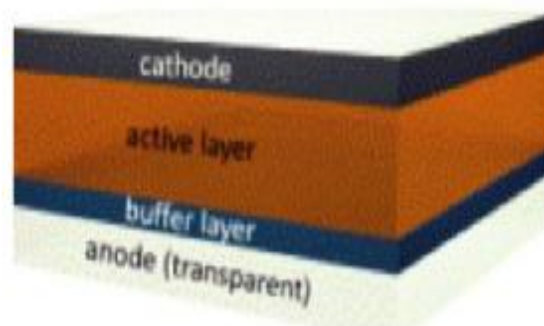
Πειραματικές μελέτες απέδειξαν ότι με την χρήση συγκεκριμένης δομής μπορεί να επιτευχτεί μια βελτίωση στην συλλογή φορτίων. Ωστόσο, τα bi-layer OPV's συλλέγουν μια πολύ μικρή ποσότητα φωτονίων λόγω του περιορισμένου πάχους της ενεργής περιοχής, τα bulk heterojunction OPV's λόγω της ανάμιξης του δότη/δέκτη ηλεκτρονίων σε ένα στρώμα έχουν μεγαλύτερες διεπιφάνειες διάσπασης εξιτονίων με συνέπεια να υπάρχει η δυνατότητα μεγαλύτερου πάχους της φωτοενεργής περιοχής και μεγαλύτερη απορρόφηση φωτονίων.

Στην D/A διεπιφάνεια, τα δυναμικά που προκύπτουν είναι ισχυρά και ευνοούν τη διάσπαση των εξιτονίων. Το ηλεκτρόνιο συλλέγεται από το υλικό με τη μεγαλύτερη ηλεκτροσυγγένεια και η οπή από το υλικό με το χαμηλότερο δυναμικό ιονισμού. για να υπάρχει η δυνατότητα αυτή θα πρέπει 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. [19]

### 3.5. 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 οπές.
- ∅ 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 P<sub>3</sub>OT, 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.



Εικόνα 27: Τυπική δομή OPV.[6]



### 3.5.1. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα οργανικών πολυμερικών φωτοβολταϊκών διατάξεων

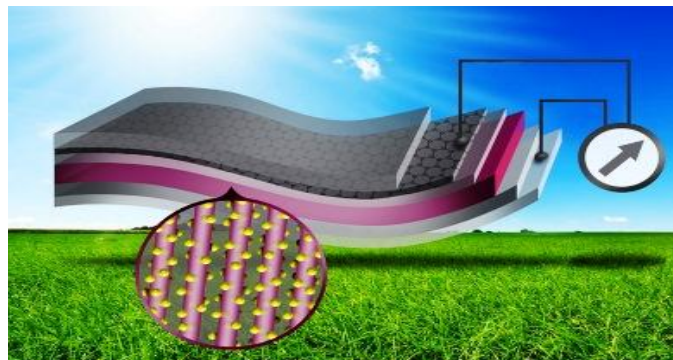
Μέχρι στιγμής αρκετά είναι τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα όσον αφορά την περαιτέρω ανάπτυξη των οργανικών πολυμερικών φωτοβολταϊκών διατάξεων.

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.
- Δυνατότητα / προοπτική (potential) για σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής ή και παραγωγής σε μαζική κλίμακα.
- Επεξεργάζονται πολύ εύκολα με διάφορες τεχνικές:
  - Spin coating
  - Doctor Blade techniques (wet processing)
  - Evaporation (dry processing)
  - Printing

Ωστόσο, μερικά από τα προβλήματα που παρουσιάζουν τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι:

- Η παρουσία ισχυρής 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%. [20]
- Προβλήματα σταθερότητας των διατάξεων (ευαισθητα στο οξυγόνο και την υγρασία)
- Δεν υπάρχουν ακόμη στην αγορά, ωστόσο παρατηρείται έντονη ερευνητική δραστηριότητα (σε ακαδημαϊκά ιδρύματα, ερευνητικά κέντρα και εταιρείες).[6]



Εικόνα 28: Πολυμερή φωτοβολταϊκά φθηνά, ελαφρά και εύκαμπτα. [23]

### 3.6. Βελτιώσεις οργανικών φωτοβολταϊκών

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά μειονεκτούν πολύ στον βαθμό απόδοσης τους. Πειραματικές μελέτες πραγματοποιούνται για την βελτίωση της επαναστατικής αυτής τεχνολογίας. Μελέτες απέδειξαν ότι με τη λειτουργία δύο στοιβαγμένων κυττάρων παράλληλα, τα επίπεδα αποδοτικότητας μπορούν να αυξηθούν περισσότερο.

Το 2007 παρουσιάστηκε ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο με την 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 polymerfullerine σύνθετο και ένα πολυθειοφένιο σύνθετο ήταν τα κύρια οργανικά συστατικά. Η πειραματική αυτή μελέτη έγινε από τους Alan Heeger, Lee και τους συνεργάτες τους και βραβεύτηκε με το Νόμπελ.

Ωστόσο, ο Olle Inganäs δηλώνει ότι τα ανώτατα όρια για μια φωτοβολταϊκή κυψέλη με βάση  $P_3HT$  αναμεμιγμένο με ένα παράγωγο fullerene θα μπορούσαν να είναι περίπου 9%. Δηλαδή καλύτερη απόδοση από την αρχικό πείραμα. Επιπλέον ανέφερε ότι οι υψηλότερες προσμείξεις μπορεί να απαιτήσουν τελικά πιο πολύπλοκες συσκευές.

Το εντυπωσιακά λεπτό υλικό που μπορεί να επιτευχθεί από υμένιο οργανικών φωτοβολταϊκών 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%.

Αναμφισβήτητο 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 όριο που απαιτείται για την ισοτιμία του δικτύου. Οι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι το κόστος για τις τεχνολογίες πυριτίου θα παραμείνουν στα ίδια ποσοστά για τα επόμενα δέκα χρόνια.

Η σκέψη λοιπόν ότι τα οργανικά φωτοβολταϊκά μπορούν να παρέχουν αυτό το οικονομικό όφελος κάνει τους επιστήμονες να θέλουν να βελτιώσουν την νέα τεχνολογία με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Σύμφωνα με εκπρόσωπο της εταιρείας Plextronics, η τεχνολογία OPV υπόσχεται κόστος φωτοβολταϊκών τέσσερις ή πέντε φορές χαμηλότερο από αυτό των συστημάτων κρυσταλλικού πυριτίου. [6]

## Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα

### 4.1. Σύγκρισή Οργανικών Φωτοβολταϊκών και Τεχνολογία Πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπως προαναφέραμε αποτελούν μια από τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με τεράστιο ενδιαφέρον για όλο τον κόσμο και ιδιαίτερα για την Ελλάδα. Εκμεταλλευόμενο το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια, αυτό είναι και το βασικό τους πλεονέκτημα. αφού ο ήλιος είναι μία αστείρευτή πηγή ενέργειας. Με την πάροδο του χρόνου οι επιστήμονες βελτιώνουν διαρκώς τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων με σκοπό την καλύτερη απόδοση, την μεγάλη διάρκεια ζωής και το χαμηλό κόστος.

Η πρώτη τεχνολογία που αναπτύχθηκε ήταν του πυριτίου. Το πυρίτιο βρίσκεται σε αφθονία στην γη με αποτέλεσμα να είναι ικανό μέσο για να καλύψει το συμφέρον εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Ο πρώτος στόχος της τεχνολογίας αυτής δεν ήταν μόνο η εκμετάλλευση του ήλιου αλλά και η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πυρίτιο είναι ένα εύθραυστο και άκαμπτο υλικό με αποτέλεσμα τα στοιχεία που δημιουργούνται να έχουν μεγάλο πάχος. Επίσης, για την σωστή λειτουργία των συστημάτων το υλικό θα πρέπει να παρουσιάζει καθαρότητα και δομική τελειότητα.

Επίσης, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που είναι από πυρίτιο παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Η συμπεριφορά τους στις ακραίες θερμοκρασίες είναι αξιόλογη αφού δεν φθείρονται και δεν χαλούν εύκολα. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που μέλλεται για τα φωτοβολταϊκά είναι ο βαθμός απόδοσης τους. Τα φωτοβολταϊκά πυριτίου έχουν μέχρι στιγμής την υψηλότερη απόδοση που έχει δοθεί. Στο δεύτερο κεφάλαιο έχει αναπτυχθεί πλήρως τι απόδοση δίνει κάθε είδος φωτοβολταϊκού.

Οι επιστήμονες δεν κατάφεραν να μετριάσουν το κόστος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, αφού κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Η εμπορευματοποίηση των φωτοβολταϊκών για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών γίνεται ολοένα και πιο αισθητή. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αναζήτηση νέας πρώτης ύλης που θα πλεονεκτεί σε ότι μειονεκτεί η τεχνολογία πυριτίου.

Πειραματικές μελέτες γίνονται με ανόργανα φωτοβολταϊκα, τα οποία αποτελούνται από πολυμερή υλικά. Τα υλικά αυτά είναι εύκαμπτα δεν είναι εύθραυστα και έχουν την δυνατότητα να μορφοποιούνται, μπορούν δηλαδή να τοποθετηθούν τόσο σε άκαμπτες όσο και σε εύκαμπτες επιφάνειες. Επίσης, είναι ελαφριά και έχουν την δυνατότητα να τυλίγονται και να μεταφέρονται όπου αυτό είναι απαραίτητο.

Τα οργανικά υλικά μπορούν να εναποτεθούν σε πολύ λεπτές στιβάδες που έχουν υψηλή διαφάνεια, έτσι ώστε οργανικά φωτοβολταϊκά να μπορούν να ενσωματωθούν σε παράθυρα και ημιδιαφανείς προσόψεις. Επίσης, τα οργανικά φωτοβολταϊκά τείνουν να είναι φωτοενεργά σε ένα ευρύτερο φάσμα του προσπίπτοντος φωτός από ότι τα συμβατικά φωτοβολταϊκά, 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 υπέρυθη ακτινοβολία (θερμότητα). Ωστόσο, ο μικρός χρόνος ζωής του και η ευαισθησία που παρουσιάζουν στις υψηλές θερμοκρασίες και την υγρασία τα κάνει να μειονεκτούν κατά πολύ σε σχέση με την τεχνολογία πυριτίου. Σοβαρό πρόβλημα είναι η διάρκεια ζωής τους, αφού τα

πλαστικά φωτοβολταϊκά πρέπει να προστατεύονται από το οξυγόνο και τη φυσική φθορά ενώ οι επανακρυσταλλώσεις και οι μεταβολές της θερμοκρασίας μπορούν να προκαλέσουν μείωση της απόδοσης τους με το χρόνο.

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά 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 οργανικά φωτοβολταϊκά είναι οι πλέον υποσχόμενες διατάξεις για την επόμενη γενιά των φωτοβολταϊκών διατάξεων.

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά πρέπει να πληρούν κάποιες απαιτήσεις για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Όπως προαναφέραμε στην αγορά ενέργειας η ανταγωνιστική θέση της κάθε τεχνολογίας καθορίζεται την αποδοτικότητα, την 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. [6]

<b>Συμβατικά φωτοβολταϊκά</b>	<b>Οργανικά φωτοβολταϊκά</b>
Κακές μηχανικές ιδιότητες <ul style="list-style-type: none"> <li>• Εύθραυστο</li> <li>• Άκαμπτο</li> </ul>	Καλές μηχανικές ιδιότητες <ul style="list-style-type: none"> <li>• Πλαστικό</li> <li>• Εύκαμπτο</li> </ul>
Μεγάλος πάχος στα στοιχεία	Λεπτά στοιχεία
Λειτουργία μόνο με το ηλιακό φως	Λειτουργία και σε χαμηλό φωτισμό και σε υπέρυθη ακτινοβολία
Μεγάλο κόστος παραγωγής	Μικρό κόστος παραγωγής
Μεγάλη απόδοση	Μικρή απόδοση
Μεγάλη διάρκεια ζωής	Μικρή διάρκεια ζωής
Καλή αντοχή σε θερμοκρασίες και οξυγόνο	Κακή αντοχή σε θερμοκρασίες και οξυγόνο

Πίνακας 4.1.: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων συμβατικών και οργανικών φωτοβολταϊκών

Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα είτε είναι συμβατικά είτε είναι οργανικά δε παύουν να είναι τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον, να είναι αθόρυβες και να εκμεταλλεύονται το ηλιακό φως για να το μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι μια από τις σπουδαιότερες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των τελευταίων χρόνων, οι επιστήμονες βελτιώνουν διαρκώς τα συστήματα με σκοπό την δημιουργία φωτοβολταϊκών με χαμηλό κόστος μεγάλη απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σ. Τετελένης, 2011, Διπλωματική εργασία, *Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
2. <http://el.wikipedia.org/wiki>
3. Tomas Markvart, 2003, *Ηλεκτρισμός από ηλιακή ενέργεια*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
4. [http://www.tga.gr/energeia/iliakos\\_xartis.php](http://www.tga.gr/energeia/iliakos_xartis.php)
5. Π. Κεραμίτζης, 2010, Διπλωματική εργασία, *Διαχείριση Δεδομένων Μέτρησης της Ηλιακής Ακτινοβολίας*, Αθήνα.
6. Μ-Δ. Πελέκη, 2013, Διπλωματική εργασία, *Οργανικά φωτοβολταϊκά*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
7. <http://www.cie.org.cy/sxoliko1.html#menu1-2-1>
8. [http://energiakoiergazomenoidei.blogspot.gr/2013/11/blog-post\\_5092.html](http://energiakoiergazomenoidei.blogspot.gr/2013/11/blog-post_5092.html)
9. M. Zeman, 2012, *Introduction to Photovoltaic Solar Energy*, Delft University of Technology, Delft.
10. Α. Ζερβός, 2005, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Πολυτεχνειακές Εκδόσεις, Αθήνα
11. [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D2\\_Hmiagogoi\\_2.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D2_Hmiagogoi_2.pdf)
12. <http://openwetware.org/wiki/20.309:DiodePrimer>
13. <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi321.html>
14. [http://www.selasenergy.gr/fv\\_panels.php](http://www.selasenergy.gr/fv_panels.php)
15. <http://www.energotechniki.gr/site/xpage.asp?sid=96&page=services2>
16. Γ. Βισκαδούρος, 2011, *Ανάπτυξη Καινοτόμων Οπτοηλεκτρονικών Διατάξεων Πολυμερούς- Νανοδομών για Εφαρμογές σε Οργανικά Φωτοβολταϊκά και Εκπομπή Πεδίου*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
17. Ν. Παλιάτσας, 2008, *Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
18. Σ. Κουρελή, 2011, *Παρασκευή Υμενίων Αγώγιμων Πολυμερών μέσω Ηλεκτροπολυμερισμού για Εφαρμογή τους σε Φωτοβολταϊκά Κελιά*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

19. Ι. Κωνσταντίνου, «Οργανικά Ηλεκτρονικά Υλικά για Φωτοβολταϊκές Εφαρμογές,» Λεμεσός, 2011.
20. Π.Μ. Παπασάββα, «Σύγχρονες Ηλεκτρονικές Διατάξεις με Οργανικά Ημιαγώγιμα Υλικά,» Ηράκλειο, 2010.
21. Π. Κουντουράκης, «Πλασμονικές Φωτοβολταϊκές Διατάξεις,» Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, 2012.
22. Ε. Σερπετζόγλου, 2012, «*Ανάπτυξη και χαρακτηρισμός οργανικών φωτοβολταϊκών με laser*», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
23. <http://www.econews.gr/2013/01/07/eukampta-fotovoltaika-ktiria-mit-94175/>
24. <http://www.econews.gr/2012/06/19/organika-fotovoltaika-idtechex/>