

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Η.Μ.Ε & ΠΡΟ.ΠΕ.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : “ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ -ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ & ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ”

Φοιτητής : ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΤΣΙΧΛΗΣ

ΑΜ: 39292

Επιβλέπων : Δρ ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2019

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Η.Μ.Ε & ΠΡΟ.ΠΕ.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : “ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ -ΣΥΓΚΡΙΣΗ
ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ & ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ
ΛΥΣΕΩΝ ”**

Φοιτητής : ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΤΣΙΧΛΗΣ

ΑΜ: 39292

Επιβλέπων : Δρ ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2019

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	6
1.1 Εισαγωγή στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας.....	6
1.2 Πρωτογενείς πηγές ενέργειας	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	11
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Ο Ήλιος.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	21
4.1 Εισαγωγή	21
4.2 Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	24
4.3 Φωτοβολταϊκό Σύστημα (PVSystem).....	25
4.4 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ : ΔΟΜΗ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	33
5.1 Ημιαγωγοί.....	33
5.2 Ημιαγωγοί και Προσμίξεις.....	37
5.3 Επαφή p-n	39
5.3.1 Δίοδος /Επαφή p-n χωρίς πόλωση	39
5.3.2 Η επαφή p-n με ορθή πόλωση.....	40
5.3.3 Η επαφή p-n με ανάστροφη πόλωση	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	43
6.1 Κρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία	43
6.1.1 φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου	43
6.1.2 φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου	44
6.1.3 φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας (ribbonsilicon).....	45
6.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων (thin film).....	45
6.2.1 φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous thin films silicon)	46
6.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων	47
6.3.1 Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (CuInSe ₂ ή CIS).....	47
6.3.2 Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe).....	48
6.3.3 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs).....	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ	50
7.1 Εισαγωγή στα Οργανικά Φωτοβολταϊκά.....	50
7.2 Αρχή λειτουργίας των Οργανικών Φωτοβολταϊκών.....	51
7.2.1 Στοιχεία θεωρίας εξιτονίων.....	52
7.2.2 Συζυγή Πολυμερή (Conjugated Polymers).....	53
7.2.3 Ηλεκτρικές Ιδιότητες των Συζυγών Πολυμερών	55
7.3 Κατηγορίες Οργανικών Φωτοβολταϊκών	56
7.3.1 Οργανικά Φωτοβολταϊκά Μονοστρωματικής Διάταξης (Single Layer).....	56
7.3.2 Οργανικά Φωτοβολταϊκά Διστρωματικής Διάταξης (BiLayer).....	57
7.3.3 Οργανικά Φωτοβολταϊκά Διάταξης Διεσπαρμένης Ετεροεπαφής (Bulk Heterojunction)	59
7.4 Τυπική Δομή Οργανικών Φωτοβολταϊκών (OPV)	60
7.5 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Οργανικών Φωτοβολταϊκών (OPV).....	61
7.6 Βελτιώσεις Οργανικών Φωτοβολταϊκών (OPV)	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ & ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ).....	65
8.1 Εφαρμογές συμβατικών φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	65
8.2 Εφαρμογές οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων(OPV)	66
8.3 Οικονομικά Συμπεράσματα	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΦΙΑ	68

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση των σύγχρονων φωτοβολταϊκών συστημάτων και συγκεκριμένα, η ιστορική ανασκόπηση των συμβατικών φωτοβολταϊκών τεχνολογιών αλλά και η σύγκριση τους με τη νέα τεχνολογία των οργανικών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αρχικά, γίνεται αναφορά τόσο για την παραγωγή όσο και για την κατανάλωση ενέργειας καθώς και για τις διάφορες πηγές ενέργειας με επίκεντρο τις ανανεώσιμες. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στοιχεία για τον ήλιο και την ηλιακή ακτινοβολία ως κύρια πηγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Σε επόμενο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα φωτοβολταϊκά συστήματα καθώς και στα πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα τους. Έπειτα, παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή των ηλιακών κυττάρων, η λειτουργία και χρήση των ημιαγωγικών υλικών, η μέθοδος λειτουργίας της διόδου p-n αλλά και ο τρόπος λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στα είδη των φωτοβολταϊκών και σε ακόλουθο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας των οργανικών φωτοβολταϊκών, τα στοιχεία που τα αποτελούν, οι κατηγορίες τους αλλά και τα πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα τους. Τέλος, γίνεται μια συνοπτική σύγκριση ανάμεσα στις αναφερθείσες τεχνολογίες, παραθέτονται παραδείγματα εφαρμογών καθώς και ορισμένα οικονομικά συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: Ήλιος, φωτοβολταϊκό, ημιαγωγός, οργανικό φωτοβολταϊκό, διάδος p-n, ηλιακά κύτταρα, συζυγή πολυμερή, φωτοβολταϊκές συστοιχίες.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to present the modern photovoltaic systems, in particular the historical overview of conventional photovoltaic technologies and to compare them with the new technology of organic photovoltaic systems. Initially, reference is made to both energy generation and consumption as well as to the various renewable energy sources. The following are data on the sun and solar radiation as a major source of energy for photovoltaic systems. In the next chapter, there is extensive reference to photovoltaic systems and their advantages and disadvantages. Next, the structure of solar cells, the operation and use of semiconductor materials, the method of operation of the p-n diode and the mode of operation of the photovoltaic cell are presented in detail. There is extensive reference to the types of photovoltaics and the following section describes how organic photovoltaics operate, their components, their categories and also their advantages/disadvantages. Finally, a brief comparison is made between the technologies mentioned, examples of applications as well as some economic conclusions.

Key words: Sun, photovoltaic, semiconductor, organic photovoltaic, diode p-n, solar cells, polymers, photovoltaic arrays.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Εισαγωγή στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας

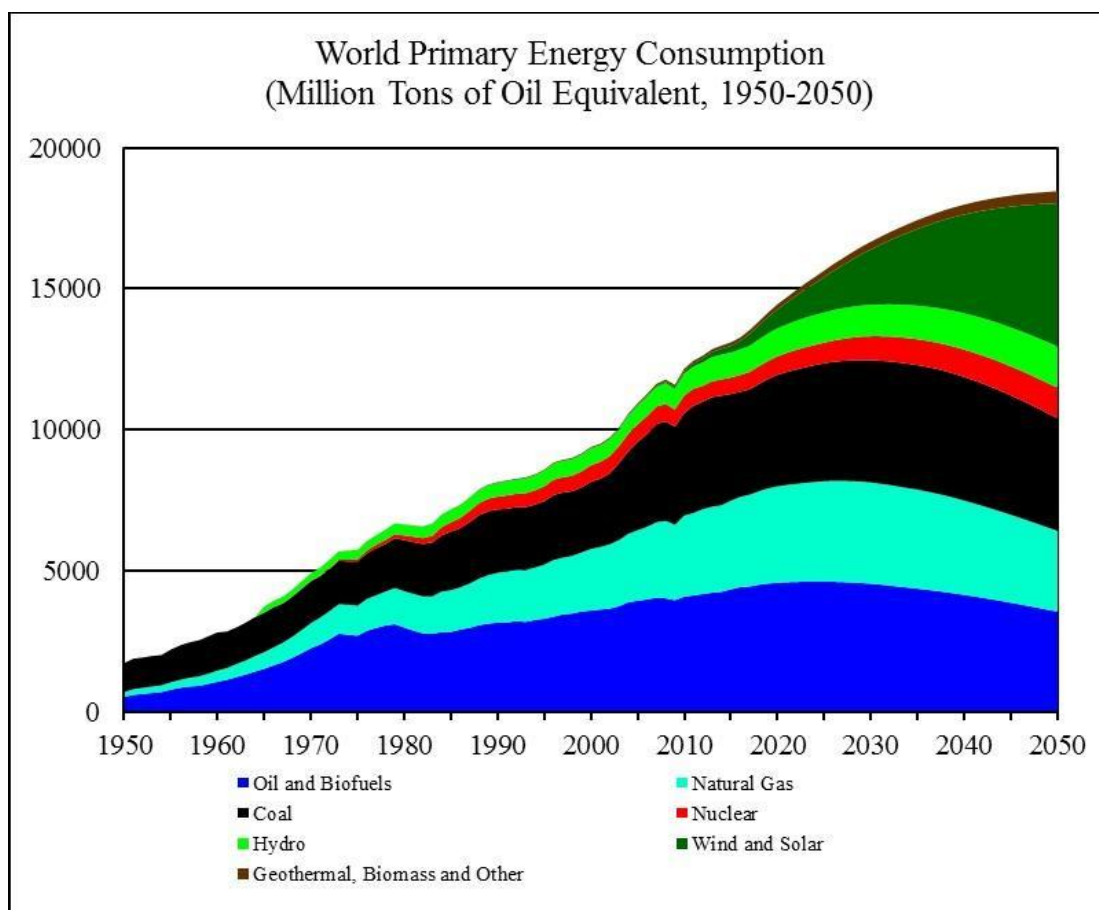
Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει ή/και αποθηκεύει μία ποσότητα που ονομάζεται *ενέργεια*. Δεν υπάρχει ακριβής ορισμός που να περιγράφει συγκεκριμένα το τι είναι η ενέργεια, παρ' όλα αυτά, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι η ικανότητα που διαθέτει ένα βιολογικό ή ένα φυσικό σύστημα για κίνηση ή αλλαγή της κατάστασης του. Στην καθημερινότητα μας συναντάμε πολλές μορφές ενέργειας: μηχανική, ηλεκτρική, χημική, θερμική οι οποίες συχνά συνδέονται άρρηκτα μεταξύ τους και έχουν ως αποτέλεσμα διαφόρων ειδών αλλαγές όπως θέρμανση, χημικές μεταβολές, κίνηση κλπ. Ο ίδιος ο άνθρωπος είναι πρωταθλητής στην κατανάλωση ενέργειας, τόσο για τις εσωτερικές λειτουργίες του σώματος του όσο και για τις δραστηριότητες που αποτελούν σημαντικό μέρος της καθημερινής του ζωής. Ένας μέσος ενήλικος άνδρας καταναλώνει ημερησίως για την κάλυψη των αναγκών του περί τις 2.500 kcal (2,9 kWh). Αυτόματα, συνειδητοποιούμε ότι χρειάζεται περίπου 1.060 kWh για τις ετήσιες ενεργειακές του απαιτήσεις. Πρόσφατες μετρήσεις απέδειξαν ότι ο άνθρωπος εκτός από πρωταθλητής είναι ταυτόχρονα και ένας άπληστος καταναλωτής ενέργειας κι αυτό γιατί τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ένας μέσος άνθρωπος στις μέρες μας καταναλώνει περίπου 19.000 kWh ετησίως. Σύμφωνα με αυτές τις καταγραφές παρατηρούμε ότι η κατανάλωση ενέργειας, είναι 19 φορές περισσότερη από όση χρειάζεται κανονικά για τη φυσιολογική, καθημερινή ζωή και υγεία του.

Η κατανάλωση της ενέργειας, (όπως και η ίδια η ενέργεια) συνεχώς μεταβάλλεται ειδικά από τη στιγμή που οι ανθρώπινες ανάγκες πληθαίνουν διαρκώς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μεταβολή στην κατανάλωση τα τελευταία 100 χρόνια. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο είναι το διάστημα από το 1890 έως το 1980. Παρατηρούμε ότι τα ποσά ενέργειας που καταναλώνονταν ετησίως σε αυτό το διάστημα αυξήθηκαν ραγδαία από 5.800 kWh σε 20200 kWh για να φτάσει στις μέρες μας στο ποσό που αναφέρθηκε προηγουμένως (19000kWh). Η συγκεκριμένη αύξηση δικαιολογείται διότι ουσιαστικά είναι ο 19^{ος} αιώνας, όπου η τεχνολογία έκανε εμφανώς την επανάσταση της.

Το όραμα αυτής της τεχνολογικής επανάστασης και κατά συνέπεια της συνεχούς αυξανόμενης κατανάλωσης ενέργειας είχε ήδη αρχίσει να παίρνει μορφή κατά τη διάρκεια του Διαφωτισμού (18^{ος} αιώνας). Τη συγκεκριμένη περίοδο ο άνθρωπος εξερευνά το περιβάλλον γύρω του είτε μικροσκοπικά είτε μακροσκοπικά προκειμένου να το 'εκμεταλλευτεί' όσο το δυνατόν περισσότερο για να διευκολύνει την καθημερινή του ζωή. Νέες έννοιες προστίθενται στη ρουτίνα των ατόμων τόσο στο οικιακό τους περιβάλλον όσο και στο εργασιακό. Έννοιες όπως γραμμή παραγωγής, παγκοσμιοποίηση, βιομηχανοποίηση γίνονται γρήγορα αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής των ανθρώπων σε πολλές μεριές του πλανήτη.

Αυτές οι έννοιες για να λειτουργήσουν χρειάζονται ενέργεια και διασχίζοντας περίπου έναν αιώνα μετά (τέλη 19^{ου} αιώνα), συναντούμε μια αξιόλογη πηγή ενέργειας, τον άνθρακα. Ο άνθρακας ήταν η κύρια πηγή ενέργειας για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή έως ότου κάνει την εμφάνιση του το μεγαλοπρεπές και πρωτόγνωρο ηλεκτρικό ρεύμα. Η είδηση τόσο για την άφιξη

του όσο και την εφαρμογή του στις βιομηχανίες και γενικά όπου απαιτείται μαζική παραγωγή πήρε άμεσα μεγάλη έκταση. Τόσο άμεσα ώστε μέχρι τα μισά του 20^{ου} αιώνα να κάνουν την εμφάνισή τους τα πρώτα εργοστάσια που παρήγαγαν ηλεκτρικό ρεύμα με τη χρήση και βοήθεια νερού, τα λεγόμενα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Το συγκεκριμένο επίτευγμα της τεχνολογίας αποτέλεσε ‘σταθμό’ στην ιστορία του ανθρώπου και επιπλέον κατέστησε το ηλεκτρικό ρεύμα την κύρια πηγή ενέργειας τόσο για τον 20^ο αιώνα όσο και για τα χρόνια που ακολούθησαν.



Σχήμα 1.1.1: Διαγραμματική απεικόνιση κατανάλωσης ενέργειας παγκοσμίως.

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι στο πέρασμα των χρόνων είχαμε την εμφάνιση καθώς και την ανάπτυξη πολλών και διαφορετικών πηγών ενέργειας. Ξεκινώντας με τον άνθρακα, συνεχίζοντας με το ηλεκτρικό ρεύμα και καταλήγοντας στις μέρες μας με το πετρέλαιο αλλά και με την όλο και αυξανόμενη χρήση του φυσικού αερίου οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι ο πλανήτης είναι πλούσιος σε **ορυκτά καύσιμα**, όπως όλα αυτά (εκτός από το ηλεκτρικό ρεύμα) αποκαλούνται. Εξ' ίσου σημαντική είναι η εμφάνιση, η ανάπτυξη και ταυτόχρονα η ένταξη της πυρηνικής ενέργειας στη βιομηχανία, την παραγωγή και γενικότερα στο περιβάλλον που περικλείει τα ανθρώπινα όντα.

Όπως κάθε υλικός πλούτος, έτσι και τα ορυκτά καύσιμα (σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας) ολοένα και μειώνονται μέρα με τη μέρα. Επιπλέον, η αέναη κατανάλωση ενέργειας με τη χρήση ορυκτών καυσίμων εξουθενώνει με αρκετά γρήγορους ρυθμούς το φυσικό περιβάλλον. Γι' αυτό και στα τέλη του 20^{ου} αιώνα παρατηρείται μια έξαρση στην αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας τόσο από πλευράς αποθεμάτων, όσο και από πλευράς προστασίας του περιβάλλοντος. Οι αποκαλούμενες **ανανεώσιμες πηγές ενέργειας** είναι το κλειδί του μέλλοντος και θα μας απασχολήσουν για αρκετά χρόνια ακόμη εξ' αιτίας της βιωσιμότητας τους, των ποσοτήτων που υπάρχουν στον πλανήτη Γη, αλλά και το φιλικό προφίλ τους σε σχέση με το περιβάλλον που ζούμε.

Εάν θα μπορούσαμε να εκφράσουμε όλα τα παραπάνω με δύο μόνο λέξεις αυτές θα ήταν, **ενεργειακό σύστημα**. Ένα ενεργειακό σύστημα αποτελείται από συγκεκριμένα στοιχεία, τα οποία με τη σειρά τους διαμορφώνουν την υπόσταση του. Αυτά τα στοιχεία είναι ο αριθμός των ανθρώπων που κατοικούν στον πλανήτη (πληθυσμός), τα συνολικά ποσά ενέργειας που καταναλώνει ο εκάστοτε υπάρχων πληθυσμός και τέλος οι κάθε είδους πηγές αλλά και μορφές ενέργειας που αξιοποιούνται από τον παρόντα αριθμό ανθρώπων στη Γη. Συγκεκριμένα τον 21^ο αιώνα, στον αιώνα που διανύουμε αυτή τη στιγμή δηλαδή και με πληθυσμό που ξεπερνά τα 7 δισεκατομμύρια ανθρώπους η κατανάλωση ενέργειας αγγίζει τα 1.5×10^{10} kW.

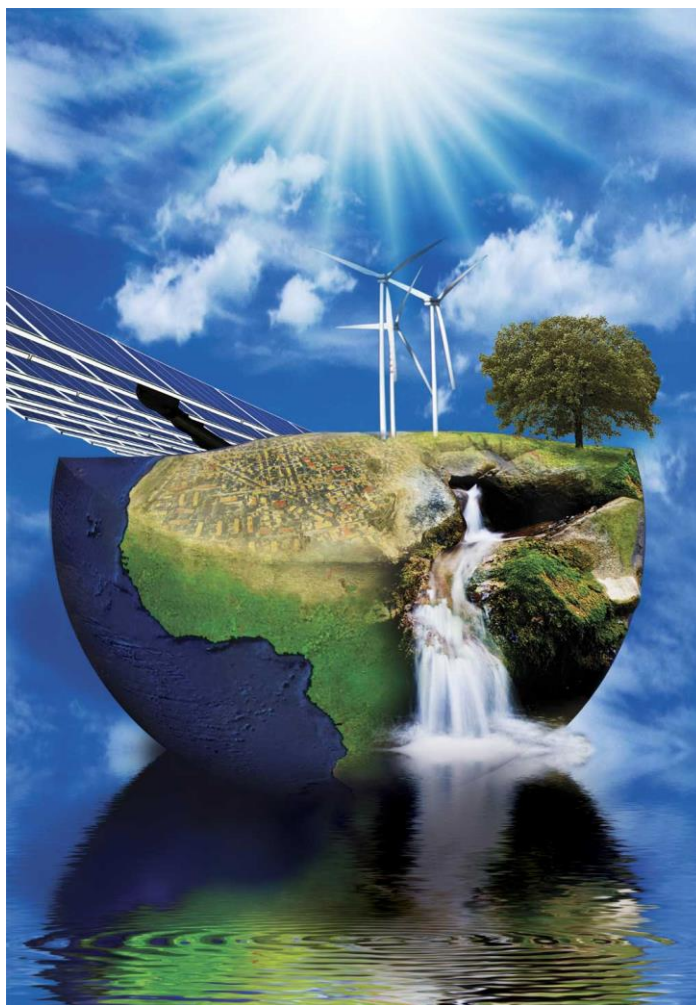
1.2 Πρωτογενείς πηγές ενέργειας

Δύο είναι οι κατηγορίες όπου μπορούμε να εντάξουμε τις πρωτογενείς πηγές ενέργειας.

Η πρώτη από αυτές αφορά τις πηγές ενέργειας οι οποίες, έπειτα από χρόνια και εκτεταμένη χρήση θα πάψουν να υπάρχουν και να είναι διαθέσιμες. Σε αυτή την κατηγορία τα πρωτεία έχουν η πυρηνική ενέργεια καθώς και όλα τα ορυκτά καύσιμα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το ενεργειακό μας σύστημα έχει τόσο μεγάλες απαιτήσεις για παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας το οποίο, έχει ως αποτέλεσμα τα ορυκτά καύσιμα και η πυρηνική ενέργεια να αποτελούν τις κύριες πηγές ενέργειας καλύπτοντας περίπου το 75-80% αυτών των απαιτήσεων. Η ανθρωπότητα σε συνδυασμό με την τεχνολογία όσο προοδεύουν και αναπτύσσονται τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτούν. Εάν συνεχιστεί αυτή η πρόοδος με τους συγκεκριμένους ρυθμούς αυτό θα έχει ως συνέπεια την εξαφάνιση των ορυκτών καυσίμων σε περίπου 300 χρόνια όπως αντίστοιχα και της πυρηνικής ενέργειας σε περίπου 250 χρόνια. Αριθμητικά ίσως φαίνεται τεράστιο διάστημα και αρκετά ικανοποιητικό για να καλύψουμε πολλές ανάγκες μας και να κάνουμε βήματα σαν ανθρώπινο σύνολο. Αν παρατηρήσουμε όμως καλύτερα θα δούμε ότι αυτά τα χρόνια σε σχέση με τα χρόνια που υφίσταται ο πλανήτης Γη καθώς και ολόκληρος ο ανθρώπινος πολιτισμός πάνω σε αυτόν, είναι ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Πρέπει λοιπόν να συνειδητοποιήσουμε ότι απαιτείται η χρήση περισσότερων πηγών ενέργειας και όχι μόνο των γνωστών ορυκτών και της πυρηνικής.

Στη δεύτερη κατηγορία πρωτογενών πηγών ενέργειας κατατάσσονται οι λεγόμενες **ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**. Πρόκειται για πηγές οι οποίες είναι πολύ περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα και την πυρηνική ενέργεια και τα αποθέματά τους είναι θεωρητικά

ανεξάντλητα. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν περί το 20-25% των ενεργειακών απαιτήσεων του πλανήτη μας αυτή τη στιγμή. Όπως άλλωστε ορίζει και η ονομασία τους αυτές οι ανανεώσιμες πηγές χαρακτηρίζονται από τη συνεχή ροή ενέργειας για την οποία υπεύθυνο είναι το περιβάλλον που ζούμε. Συγκεκριμένα ο ήλιος, το νερό, ο άνεμος καθώς και η βιομάζα (όπου παρατηρείται ευρεία αξιοποίηση της τα τελευταία χρόνια) είναι



Σχήμα 1.2.1: Μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

στοιχεία τα οποία ευθύνονται για την ύπαρξη της ηλιακής ενέργειας, της ενέργειας που προέρχεται μέσω της επεξεργασίας βιομάζας καθώς και της ενέργειας που παράγεται από τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια (υδροηλεκτρική).

Με αφορμή την αναφορά σε υδροηλεκτρική-ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να τονίσουμε ότι η ηλεκτρική ενέργεια καταλαμβάνει κατά μέσο όρο το 15-20% όλης της ενέργειας που καταναλώνεται σε παγκόσμιο επίπεδο. Η φήμη της εξαπλώνεται με ιλιγγιώδη ταχύτητα και η χρήση της τόσο για την κάλυψη οικιακών αναγκών όσο και βιομηχανικής παραγωγής ολοένα και αυξάνεται.

Ένα ακόμη εξ' ίσου σημαντικό στοιχείο που μας απασχολεί είναι τα αποθέματα πρωτογενών πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα αυτά των ορυκτών καυσίμων. Όπως είναι ευρέως διαδεδομένο και γνωστό δεν έχουν όλες οι χώρες από την μία άκρη του πλανήτη στην άλλη τα ίδια ποσοστά ορυκτών καυσίμων. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οποιαδήποτε χώρα κυριαρχεί στα αποθέματα αυτής της πρωτογενούς πηγής ενέργειας μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο στην οικονομία ολόκληρου του πλανήτη. Αυτό απεικονίζεται ξεκάθαρα μέσω της τιμής των καυσίμων που ορίζεται από τις χώρες με τα μεγαλύτερα ποσοστά αποθεμάτων καθώς και μέσα από την παραγωγή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα όπως όλοι γνωρίζουμε κάτι λιγότερο από τον μισό πληθυσμό της Γης καταναλώνει το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας και κατ' επέκταση πρωτογενών πηγών. Για παράδειγμα στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής το ποσό ενέργειας που απαιτείται για να καλυφθούν οι ανάγκες ενός ανθρώπινου οργανισμού είναι περίπου 10kW (αξιοποιώντας διάφορα ορυκτά καύσιμα). Την ίδια ώρα ένας άνθρωπος ο οποίος κατοικεί στην Αφρική απαιτεί σχεδόν το 1/100 της ενέργειας που απαιτεί ένας Αμερικάνος για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών τούτο οποίο αναφέρεται σε ενέργεια παραγόμενη κατά κύριο βαθμό από την καύση και την επεξεργασία του ξύλου. Παρατηρούμε μια αρκετά μεγάλη απόκλιση των δυο ποσοστών και θα παρατηρήσουμε ακόμα μεγαλύτερη αν επικεντρωθούμε στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας η οποία, ενώ θα έπρεπε να είναι διαθέσιμη ακόμα και στην πιο απομακρυσμένη γωνιά του πλανήτη, δεν υφίσταται καν σε πολλές αγροτικές περιοχές οι οποίες ανήκουν σε εξελισσόμενες χώρες.

Σε προηγούμενη παράγραφο έγινε λόγος για αξιοποίηση πηγών ενέργειας, φιλικών προς το περιβάλλον. Αυτή η αναζήτηση σηματοδοτείται από την παραγωγή τοξικών αερίων για την ατμόσφαιρα και το περιβάλλον μας όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οξειδία του αζώτου (NO_x) καθώς και οξειδία του θείου (SO_x). Το σύνολο αυτών των αερίων και η συνεχής απελευθέρωση τους στο φυσικό μας περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία οικολογικών καταστροφών μέσα από φαινόμενα όπως η όξινη βροχή και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα το διοξείδιο του άνθρακα οφείλεται κατά κύριο λόγο για την έξαρση του φαινομένου του θερμοκηπίου καθότι τον τελευταίο αιώνα παρατηρείται δραματική αύξηση της συγκέντρωσης του στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες σε περίπου 20-30 χρόνια προβλέπεται αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 4-5°C. Κρίνεται σαφώς απαραίτητος ο περιορισμός της απελευθέρωσης αερίων στο περιβάλλον με σκοπό την αποφυγή οικολογικών καταστροφών συμπεριλαμβανομένης και της κλιματικής (θερμοκρασιακής) αλλαγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Ο **Ήλιος** αποτελεί ένα από τα άστρα του ηλιακού μας συστήματος και χαρακτηρίζεται ως το λαμπρότερο σώμα του ουρανού. Το σχήμα του μοιάζει με μια τέλεια σφαίρα η οποία έχει διάμετρο περί τα 1,4 εκατομμύρια χιλιόμετρα (109 φορές περισσότερο από τη Γη), και η μάζα του (2×10^{30} κιλά) αποτελεί το 99.86% της μάζας του ηλιακού συστήματος. Ο ήλιος προσφέρει τεράστια ποσά ενέργειας απαραίτητα για την διατήρηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μας σε ικανοποιητικά επίπεδα για την επιβίωση των ανθρώπων καθώς και για την ανάπτυξη όλων των ζωντανών οργανισμών.

Εκτός από τους ζωντανούς οργανισμούς η ενέργεια που μεταδίδεται από τον ήλιο σε μορφή ακτινοβολίας απορροφάται και από τα υλικά. Όταν ένα υλικό το οποίο συμπεριφέρεται ως ημιαγωγός απορροφά μέρος της ορατής είτε οποιασδήποτε άλλης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Αυτή η διαδικασία είναι η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και κατ' επέκταση είναι μια από τις βασικές λειτουργίες του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από δύο 'συστάσεις' την **κυματική** αλλά και την **σωματιδιακή**. Για να περιγράψουμε κυματικά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χρησιμοποιούμε τους όρους συχνότητα (f) και μήκος κύματος (λ), τα δύο βασικά χαρακτηριστικά των κυμάτων. Αντιθέτως για την περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ως διακριτό σωματίδιο απευθυνόμαστε στην ενέργεια ($h\nu$) και συγκεκριμένα στην έκφραση της ως ηλεκτρονιοβόλτ (eV). Σύμφωνα με την κβαντομηχανική τα σωματίδια ενέργειας με τα οποία εκφράζεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποκαλούνται **φωτόνια**. Τα φωτόνια είναι ένα σύνολο κυμάτων το οποίο είτε εμφανίζεται σαν ένα μεμονωμένο κύμα είτε εμφανίζεται συγκεντρωμένο σε ορισμένο χωροταξικό επίπεδο όπου και αποκαλείται διακριτό σωματίδιο. Αυτή η διπλή υπόσταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αποκαλείται χάρη στην κβαντομηχανική '**δυναμικότητα σωματιδίου-κύματος**'. Οι ποσότητες που χρησιμοποιούμε συνήθως για την περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καθώς και ο συσχετισμός αυτών περιγράφεται από τις παρακάτω τυπολογικές σχέσεις:

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

$$h\nu = \frac{1}{q} \cdot \frac{hc}{\lambda}$$

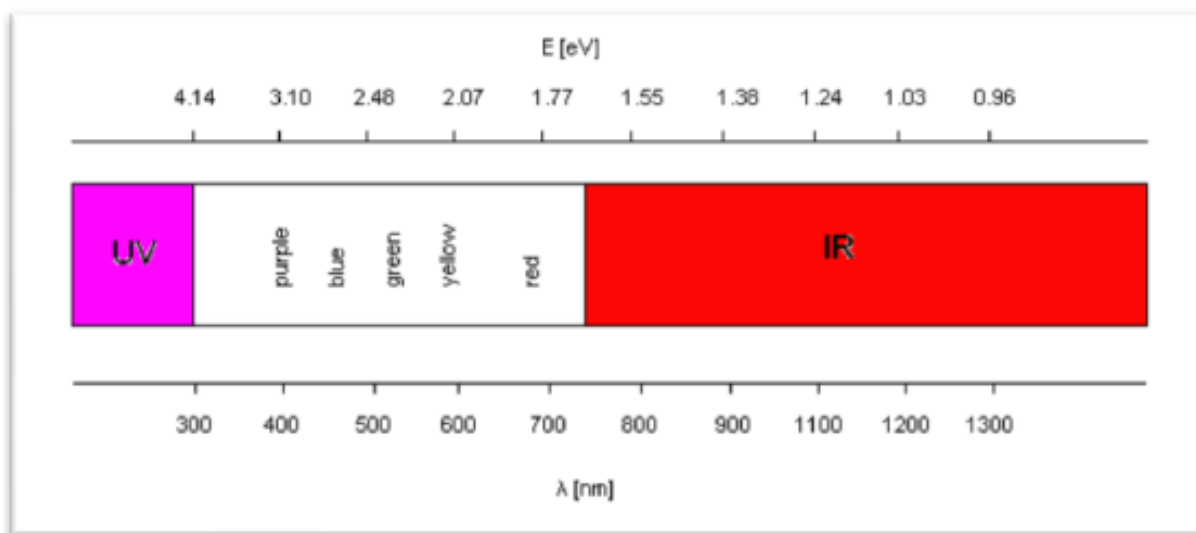
Συγκεκριμένα, όσον αφορά τα στοιχεία που αποτελούν τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

⊙ $c \rightarrow$ ταχύτητα του φωτός στο κενό ($2,998 \times 10^8$ m/s)

⊙ $h \rightarrow$ σταθερά Planck(6.625×10^{-34} Js)

⊙ $q \rightarrow$ στοιχειώδες φορτίο (1.602×10^{-9} C)

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η σχέση του τρίπτυχου χρώμα-ενέργεια-μήκος κύματος. Η ενέργεια ενός φωτονίου μπορεί να χαρακτηριστεί με ένα χρώμα. Το σύνολο των φωτονίων τα οποία περιέχουν πληθώρα διαφορετικών ενεργειακών ποσοτήτων αποκαλείται **φάσμα**. Έτσι προκύπτει ότι ένα πλήθος φασμάτων αποτελεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Επιπλέον, σημαντική είναι η πληροφορία ότι το λευκό φως που γίνεται αντιληπτό μέσω της όρασης μας είναι ένα σύνολο από ενεργειακές καταστάσεις. Με άλλα λόγια το φως ορίζεται ως ένα τεράστιο πλήθος ενεργειών.



Σχήμα 2.1.1: Απεικόνιση σύνδεσης χρώματος-ενέργειας-μήκους κύματος.

Σε προηγούμενη παράγραφο έγινε αναφορά στο ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής σε υλικά που συμπεριφέρονται ως ημιαγωγοί. Για την δημιουργία αυτού του ζεύγους απαραίτητη προϋπόθεση είναι η απορρόφηση συγκεκριμένων φωτονίων τα οποία περιέχουν την κατάλληλη ενέργεια γι' αυτόν τον σκοπό. Σημαντικό στοιχείο είναι το πλήθος φωτονίων που περιέχονται σε ένα ποσό

ενέργειας συναρτήσει του μήκους κύματος. Για να περιγράψουμε καλύτερα το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούμε τις εξής έννοιες:

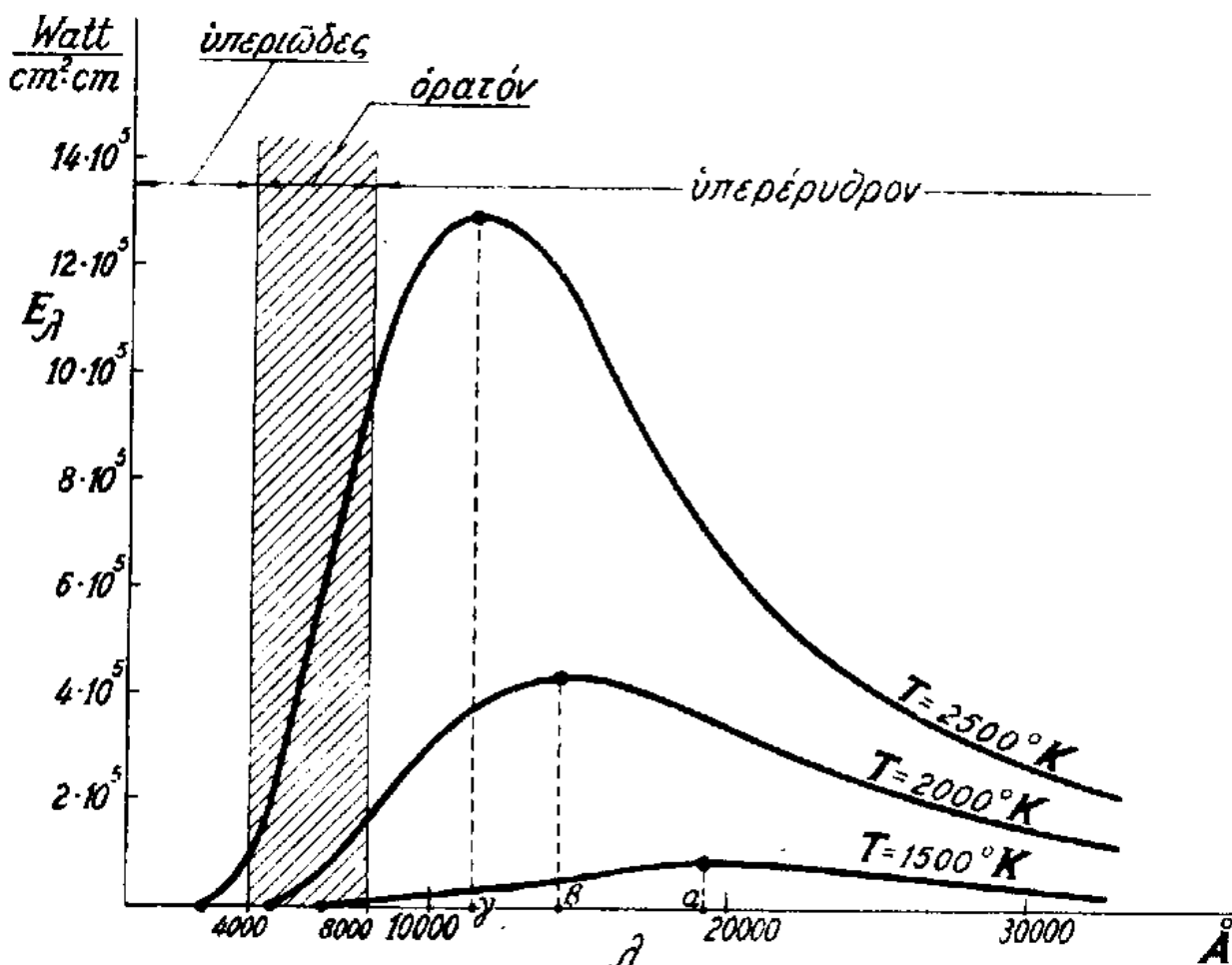
✓ $P(\lambda) \rightarrow$ Φασματική Πυκνότητα Ισχύος

✓ $\Phi(\lambda) \rightarrow$ Πυκνότητα Ροής Φωτονίων

Αναλυτικότερα, **Φασματική Πυκνότητα Ισχύος** ονομάζεται η ισχύς με την οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας καθώς και ανά μονάδα μήκους κύματος και συμβολίζεται με $P(\lambda)$ $\{ \text{W m}^{-2} \text{m}^{-1} \}$. Η **Πυκνότητα Ροής των Φωτονίων** αποτελεί τον αριθμό των φωτονίων που περιέχονται ανά μονάδα επιφάνειας, χρόνου καθώς και ανά μονάδα μήκους κύματος και συμβολίζεται με $\Phi(\lambda)$ $\{ \text{phm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{m}^{-1} \}$. Ένα επιπλέον στοιχείο που προκύπτει είναι ότι ακτινοβολία αποκαλείται το σύνολο της ισχύος μιας πηγής που εκπέμπει ακτινοβολία (π.χ. ήλιος) και η οποία προσπίπτει σε μία μονάδα επιφάνειας. Η σχέση που ενώνει τη φασματική πυκνότητα ισχύος με την πυκνότητα ροής των φωτονίων είναι η ακόλουθη:

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

Όλα τα σώματα στον πλανήτη μας αλλά και γενικότερα σε ολόκληρο το ηλιακό μας σύστημα δέχονται, αλλά και ταυτόχρονα εκπέμπουν ακτινοβολία (φως). Η ακτινοβολία που εκπέμπει το εκάστοτε σώμα συνδέεται άμεσα με την θερμοκρασία του. Όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία (ενέργεια) έχει ένα σώμα και σε συνάρτηση με την ενέργεια του περιβάλλοντος που το περικλείει, τόσο μεγαλύτερα ποσά ακτινοβολίας εκπέμπει. Ο χαρακτηρισμός για το σώμα του οποίου η ενεργειακή του κατάσταση (θερμοκρασία-ακτινοβολία) βρίσκεται σε απόλυτη αρμονία με την ενεργειακή κατάσταση του περιβάλλοντος του είναι 'μέλαν σώμα ή φαιό σώμα'. Στο διάγραμμα που ακολουθεί περιγράφεται η ποσοτική σχέση που ενώνει την εκπομπή ακτινοβολίας με τη θερμοκρασία του σώματος που την εκπέμπει καθώς και με το μήκος κύματος.



Σχήμα 2.1.2: Διαγραμματική απεικόνιση εξάρτησης ακτινοβολίας-θερμοκρασίας σώματος.

Στον πυρήνα του πιο λαμπερού σώματος του ουρανού μας, δηλαδή στον ήλιο, επικρατεί θερμοκρασία περίπου ίση με 13600000 (13.6×10^6) K. Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο και για την επιφάνεια του, τη γνωστή και ως **φωτόσφαιρα**, στην οποία η θερμοκρασία που επικρατεί πλησιάζει τους 5.800 K. Από αυτά τα βασικά στοιχεία γίνεται άμεσα κατανοητό, ότι το τεράστιο αυτό αστέρι που ονομάζεται ήλιος, εκπέμπει ασταμάτητα, ιλιγγιώδη ποσά ενέργειας (ακτινοβολίας). Το εσωτερικό του ήλιου με την τόσο υψηλή επικρατούσα θερμοκρασία είναι το ιδανικό περιβάλλον για την εκτέλεση πυρηνικών εκρήξεων (αντιδράσεων). Αυτές οι αντιδράσεις αποτελούν την κύρια πηγή για την πολύ υψηλή ενέργεια του ήλιου.

Μία ακόμη έννοια που συναντάμε εξετάζοντας τον ήλιο και την ενέργεια του είναι η **ηλιακή σταθερά**, η οποία συμβολίζεται με G_{sc} και είναι ίση με 1353 W/m^2 . Η ηλιακή σταθερά ορίζεται ως η ενέργεια που δέχεται μία μονάδα επιφάνειας (κάθετη στην διεύθυνση σύμφωνα με την οποία

διαδίδεται η ακτινοβολία), ανά μονάδα χρόνου από τον ήλιο (έξω από την ατμόσφαιρα) και αυτό μόνο όταν, η απόσταση της Γης από το πιο λαμπερό αστέρι του ηλιακού μας συστήματος έχει τη μέση τιμή της.

Το κύριο στοιχείο από το οποίο εξαρτάται η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ο πλανήτης μας, είναι το μέγεθος (μήκος) της απόστασης που πρέπει να διασχίσει το φως του ήλιου για να καταλήξει στην ατμόσφαιρα της Γης. Όταν αυτό το τεράστιο αστέρι κατά της διάρκειας της αεικίνητης περιστροφής του (σε συνάρτηση πάντα και με την κίνηση της Γης) βρεθεί κάθετα ακριβώς πάνω από τον πλανήτη μας τότε έχουμε την ελάχιστη απόσταση Γης-ήλιου. Κάπου εδώ υποδεχόμαστε την έννοια της **οπτικής αέριας μάζας**. Η οπτική αέρια μάζα ή Airmass (AM) όπως είναι διαδεδομένη εξαρτάται άμεσα από την γωνία που δημιουργείται ανάμεσα στον ήλιο και σε αυτό το κατακόρυφο σημείο που αναφέρθηκε παραπάνω. Όταν ο ήλιος βρίσκεται σε αυτό το κατακόρυφο σημείο, δηλαδή ακριβώς κάθετα πάνω από τον πλανήτη Γη, τότε συναντούμε την **AM1 (airmassone)**. Για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες ο ήλιος σχηματίζει μια γωνία θ , σε σύγκριση με το κατακόρυφο προαναφερθέν σημείο υπάρχει η εξής μαθηματική σχέση:

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

Αναλυτικότερα, σε περίπτωση όπου ο ήλιος δεν βρίσκεται ακριβώς κάθετα πάνω από τη Γη, η οπτική αέρια μάζα είναι ίση με το συνημίτονο της γωνίας θ που σχηματίζεται μεταξύ ήλιου και Γης.

Εκτός από την AM1 (airmassone) υπάρχουν και άλλες "πρότυπες" τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία όπως η **AM0 (airmasszero)** η οποία αποτελεί την ενέργεια (ακτινοβολία) που εκπέμπεται είτε σε κάποιο περιβάλλον με μηδενική ατμόσφαιρα είτε στο διάστημα. Επιπλέον, κάπου "ενδιάμεσα" σε αυτές τις δύο έννοιες (AM1 και AM0) λαμβάνει χώρα και η AM1.5. Σε ένα αρκετά φωτεινό και ζεστό πρωινό η γωνία που σχηματίζει η θέση του ήλιου σε σχέση με το κατακόρυφο σημείο, ακριβώς κάθετα πάνω από τη Γη, έχει τιμή περίπου ίση με 48 μοίρες. Πιο συγκεκριμένα η AM1.5 είναι ίση με 827 W/m².

2.2 Ο Ήλιος

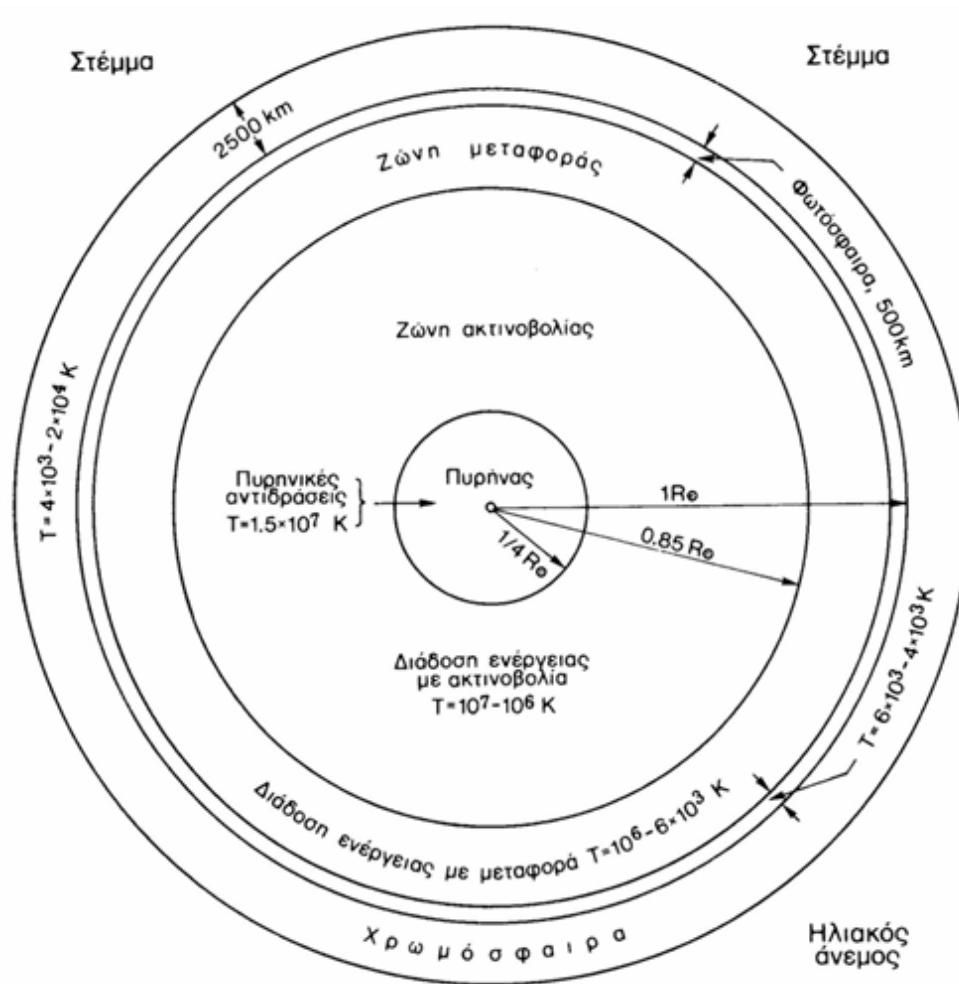


Σχήμα 2.2.1: Ο Ήλιος

Το τεράστιο, αυτόφωτο αστέρι που ονομάζεται **Ήλιος** απέκτησε ανά τους αιώνες αρκετούς χαρακτηρισμούς για την υπόστασή του. Με βάση τη μυθολογία μας ο Ήλιος ήταν μια προσωποποιημένη θεότητα που λατρευόταν από τους ανθρώπους και διέσχισε τους ουραμούς με το πύρινο άρμα του. Είναι ευρέως αντιληπτό ότι αν δεν υπήρχε ο Ήλιος, καμία μορφή ζωής δεν θα ήταν δυνατό να επιβιώσει στον πλανήτη μας. Στις μέρες μας και με την συνεχή εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού ο ήλιος αποτελεί πλέον μία από τις σημαντικότερες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας.

Ο Ήλιος έχει τη μορφή μιας σφαίρας. Μιας γιγαντιαίας, πύρινης σφαίρας η οποία έχει διάμετρο περίπου ίση με 1392×10^3 Km. Ο ήλιος εκπέμπει τεράστια ποσά ενέργειας τα οποία παράγονται κατά κύριο λόγο στον πυρήνα του. Αξιοσημείωτο στοιχείο αποτελεί το ότι ο πυρήνας του ήλιου περιλαμβάνει περίπου το 50% της συνολικής μάζας του. Η θερμοκρασία στον πυρήνα του ήλιου είναι σχεδόν 2500 φορές μεγαλύτερη από την θερμοκρασία που επικρατεί στην επιφάνειά του. Πιο συγκεκριμένα στο **κέντρο (πυρήνα)** του ήλιου η θερμοκρασία αγγίζει τους 13.6×10^6 K, τη στιγμή που η **επιφανειακή** του **θερμοκρασία** είναι περίπου **5800 K**. Τα γεωμετρικά του στοιχεία είναι επίσης αξιοσημείωτα λόγω του τεράστιου αριθμητικού αλλά και φυσικού μεγέθους τους, δηλαδή, η **επιφάνεια** του είναι ίση με 6.09×10^{12} Km², που σημαίνει 12000 φορές μεγαλύτερη από την επιφάνεια της Γης. Η **μάζα** του αγγίζει τα 1.990×10^{30} Kg, δηλαδή 330000 γήινες μάζες. Ο **όγκος** του συγκριτικά με τον όγκο του πλανήτη μας είναι περίπου 1500000 μεγαλύτερος και η τιμή του είναι $1,41 \times 10^{18}$ Km³. Ένα ακόμη φυσικό χαρακτηριστικό του ήλιου είναι η **πίεση** στο κέντρο του. Η πίεση στον πυρήνα του ήλιου ανέρχεται στις **10⁹atm** και όπως παρατηρούμε είναι ιλιγγιώδως μεγαλύτερη από την πίεση στην επιφάνεια της γης όπου η επικρατούσα πίεση είναι **1atm**. Τέλος,

αξίζει να σημειωθεί ότι από τα τεράστια ποσά ενέργειας που ακτινοβολεί ο ήλιος, τα οποία ανέρχονται στα $380 \times 10^{21} \text{ kW}$, η Γη δέχεται λιγότερα από τα μισά δηλαδή περίπου $170 \times 10^{12} \text{ kW}$. Παρακάτω ακολουθεί ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνεται και σχηματικά η δομή του Ήλιου.

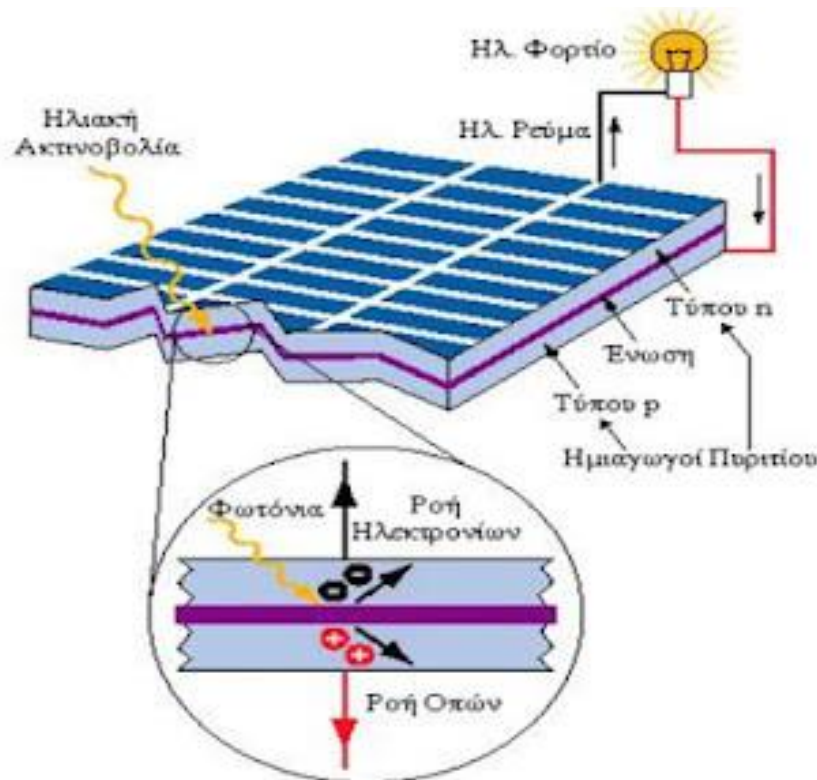


Σχήμα 2.2.2: Σχηματική απεικόνιση της δομής του αστέρα Ήλιου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ένα ‘εργαλείο’, το οποίο ο άνθρωπος δημιούργησε με σκοπό να μετατρέπει άμεσα την ηλιακή ενέργεια (φως), σε ηλεκτρική ενέργεια (ρεύμα). Πρόκειται για μια σύνθετη λέξη που αποτελείται από δυο συνθετικά: **φως** και **βολτ**. Το δεύτερο συνθετικό προέρχεται από τον εφευρέτη της μπαταρίας Alessandro Volta. Ο Alessandro Volta γεννήθηκε (18 Φεβρουαρίου 1745) και πέθανε (5 Μαρτίου 1827) στην Ιταλία όπου, διετέλεσε το μεγαλύτερο μέρος του της ζωής και του έργου του. Οι ιδιότητες του ήταν φυσικός, εφευρέτης αλλά και διδάκτωρ φυσικής στο Πανεπιστήμιο της Παβίας.

Το επόμενο βήμα για την ανακάλυψη και τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού/φωτοηλεκτρικού φαινομένου οφείλεται στον Alexandre-Edmond Becquerel. Ο A. E. Becquerel γεννήθηκε (24 Μαρτίου 1820) και πέθανε (11 Μαΐου 1891) ήταν επίσης φυσικός, Γαλλικής καταγωγής, και μέσα από τα πειράματα του ανακάλυψε τις δυνατότητες του ηλιακού φωτός. Ουσιαστικά όταν γίνεται λόγος για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία/συστήματα πρόκειται για μια μπαταρία η οποία απορροφά την ηλιακή ενέργεια και τη μετατρέπει σε ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 3.1: Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Δύο από τα βασικά χημικά στοιχεία που συντέλεσαν μέσω της αξιοποίησης τους στην εξέλιξη του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι το σελήνιο (Se) και το πυρίτιο (Si). Πρόκειται για δύο μη μεταλλικά στοιχεία, τα οποία χαρακτηρίζονται ως ημιαγωγοί. Παρουσιάζουν δηλαδή για ένα ποσοστό μεγάλη αντίσταση (μονωτής) κατά την κίνηση των ηλεκτρονίων και για ένα άλλο ποσοστό μικρή αντίσταση (αγωγός). Αυτομάτως οδηγούμαστε στην έννοια του ημιαγωγού, δηλαδή ένα στοιχείο που παρουσιάζει χαρακτηριστικά και αγωγού αλλά και μονωτή.

Οι πειραματισμοί για την εξέλιξη του φωτοβολταϊκού συνεχίστηκαν από διάφορους ηλεκτρολόγους και ερευνητές. Συγκεκριμένα το 1883 δημιουργήθηκε ένα ηλιακό στοιχείο από σελήνιο το οποίο έμοιαζε αρκετά με τα ηλιακά στοιχεία που ακολούθησαν, κατασκευασμένα από πυρίτιο, με τη διαφορά ότι αυτό του σεληνίου είχε αρκετά μικρό βαθμό απόδοσης. Υπεύθυνος για την κατασκευή αυτού του στοιχείου ήταν ο Αμερικάνος ηλεκτρολόγος Charles Edgar Fritz.

Την κυριότερη ραγδαία εξελικτική πορεία σημείωσαν τα φωτοβολταϊκά κατά τη διάρκεια του 19^{ου} αιώνα και συγκεκριμένα από το 1950 έως το 1980. Ορόσημο σε αυτή την πορεία στάθηκε η τοποθέτηση ηλιακών στοιχείων κατασκευασμένα από πυρίτιο σε δορυφόρο του Πολεμικού Ναυτικού των Η.Π.Α. Από εκεί και ύστερα ξεκίνησε να χρησιμοποιείται εκτενέστερα η τοποθέτηση ηλιακών στοιχείων σε δορυφόρους και όχι μόνο που "δρουν" στο διάστημα. Καθοριστικό ρόλο σε αυτή την κατάσταση έπαιξε το υψηλό κόστος παραγωγής των φωτοβολταϊκών συστημάτων γι' αυτό και η χρήση τους ήταν αρκετά περιορισμένη. Με την πάροδο των δεκαετιών και την ταυτόχρονη εξέλιξη της τεχνολογίας μέσα σε περίπου 20 χρόνια το κόστος παραγωγής των φωτοβολταϊκών συστημάτων υποδεκαπλασιάστηκε. Πιο συγκεκριμένα το 1950 μια μέση τιμή κόστους ήταν 500\$ / Watt ενώ το 1970 το κόστος άγγιξε τα 50\$ / Watt. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πτώση της τιμής κόστους για την παραγωγή φωτοβολταϊκού συστήματος είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόδοσή τους. Ειδικότερα, παράλληλα με την μείωση κόστους παραγωγής η απόδοση των συστημάτων που είχε ως αρχική τιμή το 6-8% σημείωσε ανοδική πορεία.

Από το 1980 και ύστερα έως τις μέρες μας και τον 20^ο αιώνα, η παραγωγή φωτοβολταϊκών έχει σημειώσει ταχύτατη βελτίωση στις μεθόδους κατασκευής αλλά και στον βαθμό απόδοσης και αυτό μπορεί άνετα να το διαπιστώσει κάποιος αν συγκρίνει τα 20 MW περίπου που παράγονταν το 1980 με τα 38-40 MW που παράγονται στις μέρες μας σε παγκόσμια κλίμακα. Η τιμή πλέον αγγίζει τα 7€/Watt.

Λίγες είναι οι χώρες που έχουν ανεπτυγμένη τεχνολογία και ασχολούνται με την παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Θα μπορούσαν να είναι πολύ περισσότερες εάν αναλογιστούμε ότι το ηλιακό φως είναι ατελείωτο και διαθέσιμο σε όλα τα μέρη του πλανήτη μας. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει με ρεύμα από μια ελάχιστου μεγέθους κατασκευή όπως ένα ρολόϊ τοίχου είτε ακόμη και για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε τέτοια ποσότητα ώστε να εξασφαλίσει τη λειτουργία ενός εργοστασίου ή μιας βιομηχανικής επιχείρησης.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια έχει εξαπλωθεί η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια διαφόρων ειδών τα οποία τροφοδοτούνται με ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ικανό να καλύψει τα ποσά ενέργειας που απαιτούν για να λειτουργήσουν

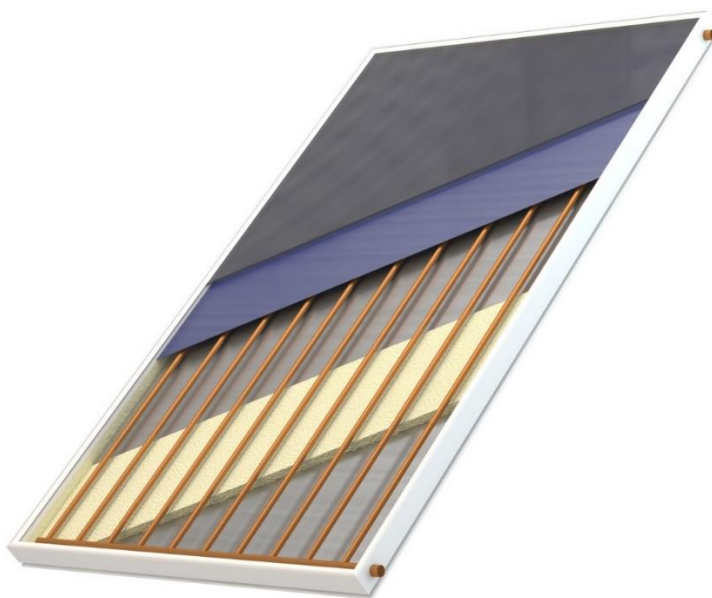
αυτά τα κτίρια. Σημαντική λεπτομέρεια είναι επιπλέον, η κατακόρυφη άνοδος που σημείωσε ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού στοιχείου που κατασκευάζεται κατά κύριο λόγο από πυρίτιο, ο οποίος αγγίζει το 25% υπό περιορισμένες συνθήκες (εργαστηρίου) αλλά και σε γενικότερη χρήση όπου η απόδοση φτάνει το ποσοστό του 17%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχοντας παρόμοια κίνητρα αποσκοπούν στο να έχουν και το ίδιο αποτέλεσμα. Είναι μια ‘νέα εποχή’ για την ενέργεια μετά την τεράστια ακμή των ορυκτών καυσίμων. Σε αυτή λοιπόν, τη ‘νέα εποχή’ θα συναντήσουμε μια μορφή παραγωγής ενέργειας που ως κύριο ‘συστατικό’ χρησιμοποιεί τον ήλιο και τα τεράστια ποσά ενέργειας που παράγει. Ο λόγος για το **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**, το οποίο αξιοποιεί τα γιγάντια ποσά ηλιακής ακτινοβολίας που εκπέμπει ο Ήλιος με δύο τρόπους:

- 1) Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας σε μορφή θερμότητας από στοιχεία που ονομάζονται **ηλιακοί συλλέκτες**



Σχήμα 4.1.1: Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

- 2) Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από στοιχεία ημιαγωγούς που ονομάζονται **ηλιακές κυψέλες** και μετατρέπουν άμεσα την ακτινοβολία που δέχονται σε ηλεκτρική ενέργεια

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο η ανακάλυψη του φωτοβολταϊκού φαινομένου οφείλεται στον Γάλλο φυσικό A. E. Becquerel (δεκαετία 1840). Χάρη σε αυτό το φαινόμενο ο άνθρωπος είναι ικανός πλέον να μετατρέπει άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία (ενέργεια) που εκπέμπεται από τον Ήλιο και απορροφάται από τον πλανήτη μας κατευθείαν σε ηλεκτρική ενέργεια. Με τη βοήθεια φυσικά των ηλιακών κυψελών (ημιαγωγοί). Οι ηλιακές κυψέλες απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και τη μετατρέπουν άμεσα σε ηλεκτρική. Ενώ οι ηλιακοί συλλέκτες απορροφούν και συλλέγουν την ακτινοβολία του Ήλιου σε μορφή θερμότητας. Άρα έχουμε να εξετάσουμε δύο διαφορετικές καταστάσεις.



Σχήμα 4.1.2: Φωτοβολταϊκές ηλιακές κυψέλες

Η ανάπτυξη αυτού του φαινομένου προσδίδει στον Ήλιο επιπλέον χαρακτηριστικά εκτός από αυτά που ήδη κατέχει π.χ. να είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη Γη, μέσω της ενέργειας που εκπέμπει. Κι αυτό γίνεται ξεκάθαρο με την εξέλιξη του φωτοβολταϊκού φαινομένου, το οποίο σκοπεύει στην διευκόλυνση της καθημερινής ζωής των ανθρώπων και όχι μόνο. Πρόκειται για ένα φαινόμενο άκρως φιλικό προς το περιβάλλον μας σε αντίθεση πάντα με τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούμε εδώ και αιώνες για την κάλυψη των αναγκών μας. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα αντιληπτή στις μέρες μας η αναγκαιότητα για διαφύλαξη του περιβάλλοντος, το οποίο ο ίδιος ο

άνθρωπος έχει φτάσει σε οριακό σημείο (βλ. φυσικές καταστροφές, πλημμύρες, αλλαγή παγκόσμιου κλίματος) και με τη βοήθεια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να ‘επανορθώσει’. Προκειμένου όμως να επανορθώσει και να ‘εκμεταλλευτεί’ σωστά όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πρέπει να λάβει υπ’ όψιν του 3 διαφορετικούς αλλά και ταυτόχρονα αλληλένδετους παράγοντες την οικολογία, την ενέργεια και φυσικά την οικονομία.

Σχετικά με την οικολογία γίνεται άμεσα κατανοητό ότι διαμέσου της αξιοποίησης του φωτοβολταϊκού φαινομένου και συνάμα της απορρόφησης μεγάλων ποσών ηλιακής ενέργειας μειώνονται αισθητά οι παραγόμενοι ρύποι που εκπέμπονται εδώ και αιώνες από την αλόγιστη εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων. Οι ρύποι αυτοί δεν είναι άλλοι από τα στερεά και υγρά απόβλητα τα οποία είναι απόρροια των ανεπτυγμένων βιομηχανιών καθώς και από διάφορα αέρια απόβλητα τα οποία παράγει ο ίδιος ο άνθρωπος ακόμα και με τις καθημερινές του δραστηριότητες. Ορισμένα από αυτά τα αέρια που μειώθηκαν αισθητά ύστερα από την εξέλιξη του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι τα παρακάτω: Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2), τα διάφορα παραγόμενα οξείδια του θείου (SO_x) που οφείλονται κατά κύριο λόγο στην επεξεργασία και στην καύση των υδρογονανθράκων και τέλος στα οξείδια του αζώτου (NO_x) τα οποία είναι εξ’ ίσου βλαβερά και τοξικά για τον άνθρωπο.

Όσον αφορά την ενέργεια ο άνθρωπος μέχρι σήμερα αξιοποιούσε αποκλειστικά οποιουδήποτε είδους ορυκτό καύσιμο έβρισκε στη διάθεση του. Σε αντίθεση όμως με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τα ορυκτά αυτά καύσιμα έχουν ημερομηνία λήξης για δύο λόγους: αρχικά γιατί εξαντλούνται και επιπλέον δεν βρίσκονται ισομοιρασμένα σε όλες τις γωνιές του πλανήτη. Από την άλλη πλευρά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συγκεκριμένα η ηλιακή ενέργεια υπάρχει άφθονη και μοιρασμένη σε ίσα ποσά στο μεγαλύτερο μέρος των περιοχών της Γης.

Τελευταίος και ίσως ο καθοριστικότερος παράγοντας για την αξιοποίηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι η συσχέτιση του με την οικονομία. Ένα μειονέκτημα του τρόπου μετάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας που είναι έντονο ακόμη και στις μέρες μας είναι ότι δεν είναι διαθέσιμη σε όλες τις μεριές του πλανήτη μας, το οποίο σημαίνει ότι δεν είναι «προσβάσιμη» από όλους τους ανθρώπους που την έχουν ανάγκη. Η ηλιακή ενέργεια και η άμεση μετατροπή της σε ηλεκτρική είναι ίσως η λύση σε αυτό το πρόβλημα κι αυτό γιατί πρόσβαση στην ηλιακή ενέργεια έχει σχεδόν όλος ο πλανήτης μας. Σε συνδυασμό με την αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής τους αλλά παράλληλα και συντήρησης αυτών καθώς και με τη δυνατότητα που παρέχουν για αξιοσημείωτα εύκολη σύνδεση και επέκταση το φωτοβολταϊκό φαινόμενο μπορεί να αποδειχθεί ένα πολύπλευρα κερδοφόρο εύρημα του ανθρώπου.

4.2 Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπως και τα περισσότερα ανθρώπινα δημιουργήματα έχουν αρκετά θετικά στοιχεία που τα καθιστούν χρήσιμα, δηλαδή πλεονεκτήματα, αλλά και ορισμένα αρνητικά, μειονεκτήματα, τα όποια έμμεσα απαιτούν κριτική σκέψη, ανάλογα με τη χρήση και το περιβάλλον που προορίζονται.

Όσον αφορά στα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχουμε:

- ✓ Η λειτουργία των συστημάτων αυτών είναι άκρως φιλική προς το περιβάλλον καθώς η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με τέτοιο τρόπο ο οποίος δεν προκαλεί ούτε υλικούς ρύπους (στερεά / υγρά απόβλητα), ούτε ηχητικούς (θόρυβος σε μεγάλα db).
- ✓ Πρόκειται για μια εκ των έξι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που υφίστανται στις μέρες μας με άκρεστη πηγή τροφοδοσίας τον Ήλιο, ο οποίος είναι διαθέσιμος σε όλο τον πλανήτη και με μηδενικό κόστος παροχής ενέργειας.
- ✓ Οι κατασκευαστές των ηλιακών στοιχείων εγγυώνται για την μακροχρόνια αντοχή (30 έτη περίπου) των φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- ✓ Οι πρώτες ύλες που είναι απαραίτητες για να δημιουργήσουμε ένα τέτοιου είδους στοιχείο βρίσκονται σε μεγάλο πλεόνασμα και σε συνδυασμό με την αρκετά απλή μεθοδολογία κατασκευής αυτών των στοιχείων τα καθιστά παραγωγικά και χρήσιμα.
- ✓ Ελάχιστες απαιτήσεις σε συντήρηση/επισκευή και παρακολούθηση λειτουργίας κα' επέκταση. Άμεση εξυγίανση πιθανής ζημιάς ή φθοράς.
- ✓ Επιπλέον ένα τέτοιο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να καταστήσει ενεργειακά ανεξάρτητη ακόμη και μια μικρή πόλη.
- ✓ Τέλος, πιο ειδικευμένα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν κύριο συστατικό για την υλοποίηση κατασκευών και γενικότερα εφαρμογών που σχετίζονται με το διάστημα διότι η ισχύς που παράγεται από αυτά σε σχέση με το κατασκευαστικό τους βάρος είναι αρκετά μεγάλη (**150 W/kg**).

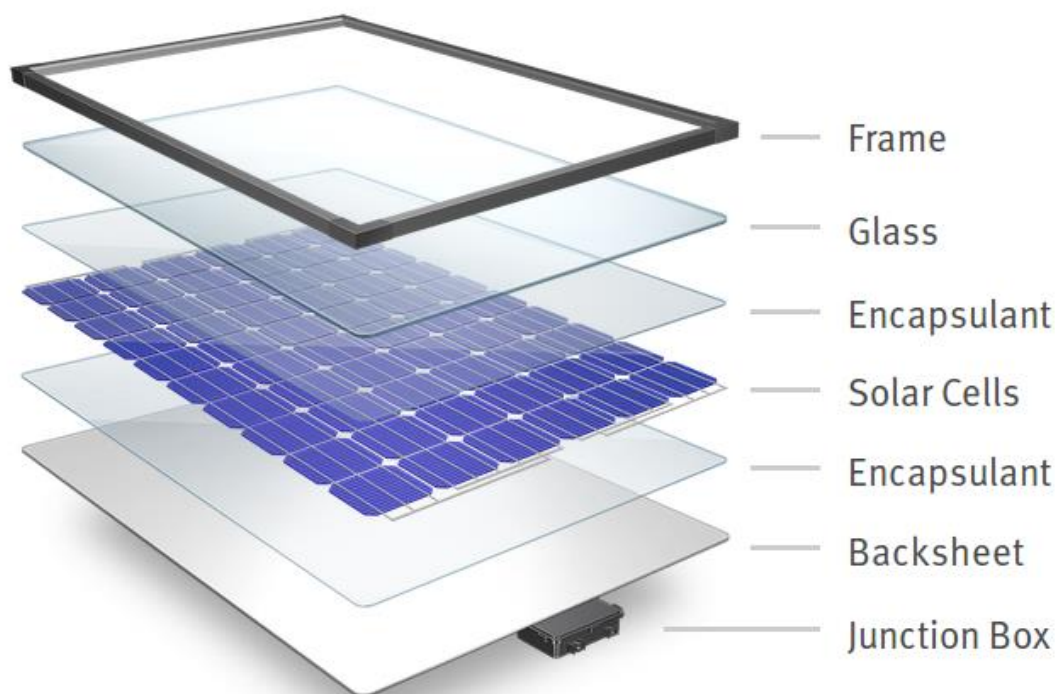
Όσον αφορά στα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχουμε:

- ⊙ Μπορεί ο Ήλιος να αποτελεί μία αέναη πηγή ενέργειας, ωστόσο, ο ρυθμός παροχής ηλιακής ενέργειας δεν είναι εξ' ίσου σταθερός σε όλα τα σημεία του πλανήτη κάθε μέρα
- ⊙ Σημαντικό μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων το οποίο υπερτερεί σε σύγκριση με ένα από τα πλεονεκτήματα που προαναφέρθηκαν (μηδαμινό κόστος συντήρησης/επισκευής) είναι το υψηλό κόστος κατασκευής τους
- ⊙ Στην περίπτωση χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων για εφαρμογές μεγάλου όγκου κρίνεται απαραίτητη η εκμετάλλευση μεγάλου αριθμού εκτάσεων όπου θα εγκατασταθούν αυτά τα συστήματα
- ⊙ Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που αποτελεί μειονέκτημα για τη βιωσιμότητα αυτών των συστημάτων είναι η απαραίτητη χρήση διαφόρων στοιχείων που είναι ικανά να αποθηκεύουν ενέργεια, στη συγκεκριμένη περίπτωση ηλεκτρική (πχ. πυκνωτής), καθώς και διαφόρων μετατροπέων που καθιστούν χρήσιμο και εκμεταλλεύσιμο το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα
- ⊙ Τέλος, είναι κοινώς αντιληπτό ότι χωρίς την ύπαρξη φωτός δεν μπορεί να υφίσταται φωτοβολταϊκό σύστημα

4.3 Φωτοβολταϊκό Σύστημα (PVSystem)

Βασικό στοιχείο για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι ένα μικρό κελί / κυψέλη που ονομάζεται **φωτοβολταϊκή κυψελίδα (photovoltaic cell)**. Έχει μικρές διαστάσεις και σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευής της παράγονται και τα μεγαλύτερα φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία κατά κύριο λόγο έχουν σχήμα τετραγώνου. Για να χρησιμοποιηθούν σωστά αυτά τα στοιχεία πρέπει να συνδεθούν σε σειρά και να έχουν τις απαραίτητες διαστάσεις καθώς και τα απαιτούμενα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Όσον αφορά στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά η μονάδα που θα δημιουργηθεί από την σε σειρά σύνδεση αυτών των στοιχείων θα πρέπει να είναι ικανή να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια και συγκεκριμένα σε έναν συσσωρευτή με ηλεκτρεργετική δύναμη (HEΔ) των 12V περίπου. Επιπλέον, όσον αφορά στις διαστάσεις στόχος είναι η να μπορούν άνετα και χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες να μεταφερθούν, να συναρμολογηθούν καθώς και να επισκευαστούν/αντικατασταθούν. Λόγω της ευαισθησίας αυτών των στοιχείων η κατασκευή τους αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο στο οποίο θα τοποθετηθεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο, μια γυάλινη επιφάνεια η οποία θα βρίσκεται μπροστά από την επιφάνεια του στοιχείου που προορίζεται να απορροφά την ηλιακή ενέργεια και τέλος ενός πλαστικού υλικού το οποίο θα είναι υπεύθυνο για την προστασία του στοιχείου από τους εξωτερικούς παράγοντες (μόνωση, καιρικές συνθήκες κλπ.). Όταν συνδεθούν σε σειρά 36 τέτοια στοιχεία με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τόσο

κατασκευαστικά όσο και ηλεκτρικά θα μπορούμε πλέον να μιλάμε για ένα **φωτοβολταϊκό πλαίσιο (photovoltaic module)**.



Σχήμα 4.3.1: Δομικά στοιχεία φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι ο βασικός συσσωρευτής / συλλέκτης ο οποίος εδώ και αρκετά χρόνια πλέον βρίσκεται σε γραμμή παραγωγής και πληθώρα βιομηχανιών ασχολείται με την παραγωγή του. Ένα τέτοιο πλαίσιο αποτελείται από ένα μεταλλικό ή και πλαστικό υψηλών προδιαγραφών φύλλο το οποίο είναι η βάση του πλαισίου, ενώ η εμπρόσθια όψη του πλαισίου είναι γυάλινη ή κατασκευασμένη από διαφανές πλαστικό και ενδιάμεσα βρίσκεται το σύνολο των κυψελίδων που αποτελούν το πλαίσιο. Όλα αυτά συγκρατούνται από ένα μεταλλικό περίβλημα το οποίο φροντίζει για τη μόνωση και τη στεγανότητα του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Μιλώντας για φωτοβολταϊκά πλαίσια πρέπει να ξεχωρίσουμε ποιον από τα δύο είδη πλαισίων καλύπτει τις ανάγκες μας. Τα πλαίσια εκείνα των οποίων τα βασικά δομικά τους στοιχεία είναι γυαλί-μέταλλο είναι γνωστά με την ονομασία **τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια**, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν πλαίσια των οποίων και η εμπρόσθια αλλά και η πίσω όψη τους είναι κατασκευασμένη από γυαλί, τα αποκαλούμενα **ημιπερατά φωτοβολταϊκά πλαίσια**.

Αυτά που χρησιμοποιούνται ευρέως και τοποθετούνται σε εξωτερικά υπαίθρια φωτοβολταϊκά πάρκα, αλλά και σε οροφές διαφόρων κτισμάτων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους είναι τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η δεύτερη κατηγορία φωτοβολταϊκών πλαισίων χρησιμοποιείται σε πιο ιδιαίτερες περιπτώσεις. Ανάμεσα σε δύο πίνακες από γυαλί βρίσκονται οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες, στο πίσω μέρος υπάρχει ένα τζάμι το οποίο είναι κατασκευασμένο κατάλληλα έτσι ώστε να διατηρεί το πλαίσιο μονωμένο και ενδιάμεσα από αυτά τα στοιχεία υπάρχει ποσότητα αερίου Argon.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται με δύο τρόπους ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες μας είτε σε σειρά, είτε παράλληλα. Η ισχύς ενός τέτοιου πλαισίου μπορεί να αγγίξει και τα 150 W και πρέπει να σημειωθεί ότι για να ορίσουμε τον αριθμό των στοιχείων που θα αποτελούν το πλαίσιο μας λαμβάνουμε υπ' όψιν την τάση που υπάρχει στους πόλους των συσσωρευτών μας η οποία δεν ξεπερνά τα 12V.

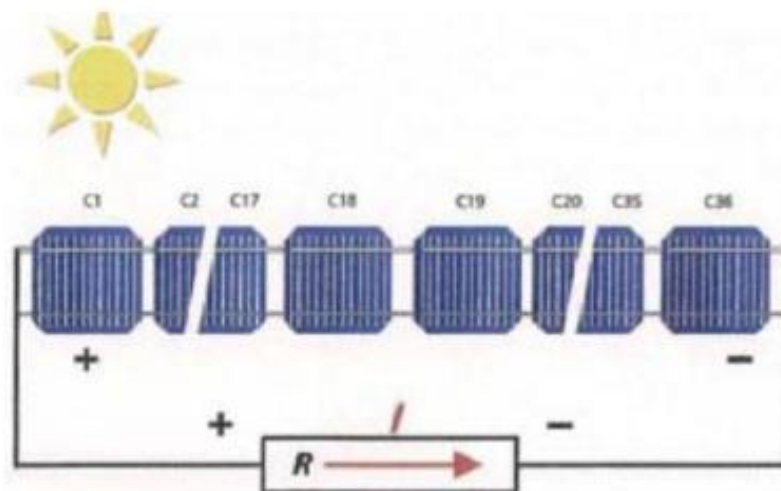
Επιπρόσθετα, εκτός από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο υπάρχει και το **φωτοβολταϊκό πάνελ (photovoltaic panel)** το οποίο δεν διαφέρει κατασκευαστικά από το πλαίσιο, διαφέρει όμως στο ότι ένα φωτοβολταϊκό πάνελ μπορεί να συγκροτείται από πολλά περισσότερα ξεχωριστά φωτοβολταϊκά πλαίσια, ορθώς ηλεκτρολογικά συνδεδεμένα μεταξύ του έτσι ώστε να παράγουν την απαιτούμενη ισχύ και τάση.



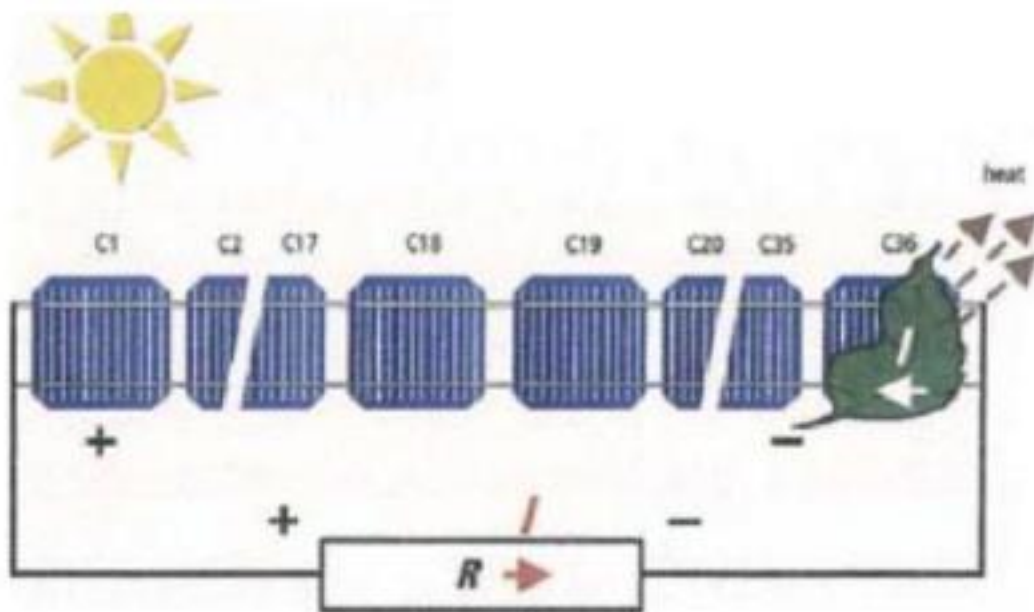
Σχήμα 4.3.2: Φωτοβολταϊκό Πάνελ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται είτε σε σειρά, είτε παράλληλα. Όταν συνδεθεί ένα σύνολο φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά και κατ' επέκταση όταν συνδεθεί ένας αριθμός τέτοιων συνόλων παράλληλα (σύνολα που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά) τότε γίνεται λόγος για μια **φωτοβολταϊκή συστοιχία (photovoltaic array)**. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που μπορεί να φτάσει ένα φωτοβολταϊκό είναι 600Vγι' αυτό προσέχουμε η σύνδεση σε σειρά (αύξηση συνολικής τάσης) καθώς και η παράλληλη σύνδεση (αύξηση συνολικού ρεύματος) να είναι εντός συμβατικών ορίων. Επίσης, μια συστοιχία μπορεί να αναπτύξει ισχύ αιχμής (Wp) από 100Wέως και 1KW.

Λόγω του ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ και κατ' επέκταση οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες είναι εκτεθειμένες στις εξωτερικές συνθήκες (περιβάλλον, βροχή, σύννεφα, άνεμος) έχει ως αποτέλεσμα πολλές φορές είτε τη μείωση της παραγόμενης τάσης και του παραγόμενου ρεύματος είτε ακόμη και την καταστροφή ολόκληρου του πλαισίου. Ένας από τους λόγους καταστροφής του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι η θραύση του από έντονες καιρικές συνθήκες είτε από άλλο εξωγενή παράγοντα. Άλλη αιτία που μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή ενός πλαισίου είναι η σκίαση ενός κυττάρου. Για να συμβεί αυτό αρκεί να μείνει χωρίς έκθεση σε ηλιακό φορτίο ένα κύτταρο, να είναι δηλαδή σκιασμένο είτε λόγω ανάπτυξης κάποιου δέντρου πλησίον του, είτε λόγω περιττωμάτων πτηνών είτε για οποιοδήποτε άλλο λόγο ο οποίος θα οδηγήσει στο φαινόμενο **hotspot**(μακροχρόνια σκίαση κυττάρου) και στη συνέχεια θα προκαλέσει την καταστροφή του κυττάρου αλλά και όλου του πλαισίου μιας και στο εμπόριο δεν κυκλοφορεί/κατασκευάζεται μικρότερων διαστάσεων φωτοβολταϊκό σύστημα από το πλαίσιο.



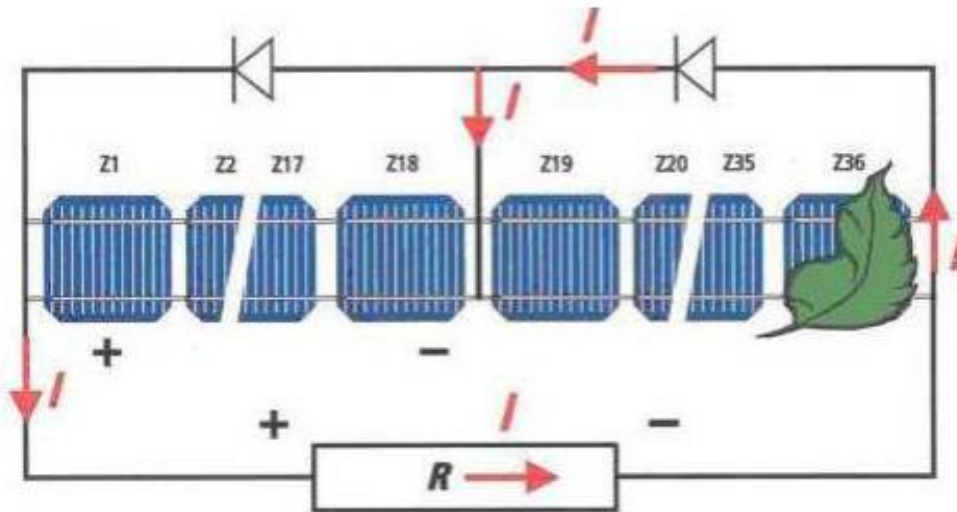
Σχήμα 4.3.3: Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο φορτισμένο με ηλεκτρικό φορτίο



Σχήμα 4.3.4: Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο φορτισμένο
με ηλεκτρικό φορτίο και σκιασμένο κύτταρο

Στο σχήμα 4.3.4 παρατηρούμε ότι το τελευταίο κύτταρο είναι σκιασμένο. Αυτό έχει ως συνέπεια το συγκεκριμένο κύτταρο να μην παράγει πλέον ηλεκτρικό ρεύμα και ταυτόχρονα να συμπαρασύρει/καταναλώνει και το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα των γειτονικών του κυττάρων. Η κατανάλωση αυτή συμβάλλει στην παραγωγή θερμότητας και συνάμα στην αύξηση της θερμοκρασίας του συγκεκριμένου κυττάρου (φαινόμενο hotspot) με αποτέλεσμα την καταστροφή του.

Για την αποφυγή λοιπόν του φαινομένου αυτού τοποθετούνται περίπου ανά 20 φωτοβολταϊκά κύτταρα **δίοδοι παράκαμψης**, οι οποίες «προστατεύουν» το ρεύμα των υπόλοιπων κυττάρων και δεν επιτρέπουν την αύξηση τάσης στο σκιασμένο κύτταρο η οποία θα έχει ως συνέπεια την αύξηση θερμοκρασίας του και με αυτόν τον τρόπο θα αποφευχθεί η καταστροφή του.

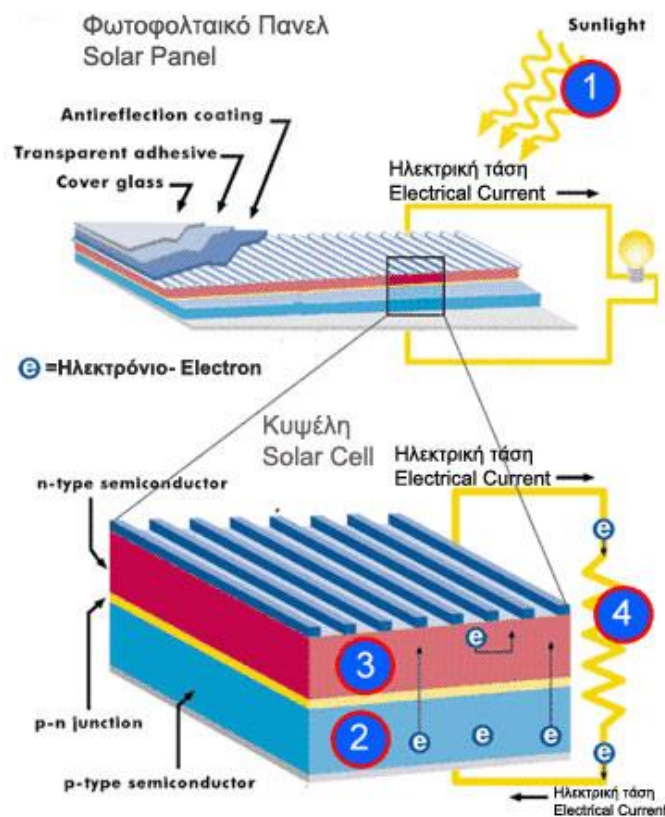


Σχήμα 4.3.5: Αρχή λειτουργίας διόδου παράκαμψης

Τέλος, στο χώρο των φωτοβολταϊκών συναντούμε δύο συγκεντρωτικές έννοιες. Η μία εξ' αυτών αναφέρεται στην "ομάδα" των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστοιχιών και είναι το **φωτοβολταϊκό πάρκο** και η δεύτερη είναι ο **φωτοβολταϊκός σταθμός** ο οποίος περιλαμβάνει το φωτοβολταϊκό πάρκο με όλα τα «εργαλεία» που χρειάζεται (συσσωρευτές, μετασχηματιστές DC-AC) για τη σωστή λειτουργία και τροφοδοσία των μονάδων που θέλουμε να λειτουργήσουν μέσω αυτών.

4.4 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η πηγή απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή διαφορετικά και ηλιακές κυψέλες. Αυτές οι κυψέλες παράγονται από μέταλλα τα οποία έχουν τις ιδιότητες των ημιαγωγών και κατασκευάζονται συνήθως με δισκοειδή μορφή. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η δημιουργία διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο πλευρές του δίσκου μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια τους. Η παραγόμενη τάση καθώς και το παραγόμενο ρεύμα αυτών των στοιχείων εξαρτάται τόσο από το υλικό το οποίο κατασκευάζονται αλλά όπως είναι προφανές και από την ισχύροτητα της ηλιακής ακτινοβολίας την οποία δέχονται και απορροφούν.



Σχήμα 4.4.1: Σχηματική διάταξη λειτουργίας φωτοβολταϊκού πάνελ και φωτοβολταϊκής κυψέλης.

Σε μία τέτοια κυψέλη είναι δυνατόν να αναπτυχθεί παραγόμενη τάση περίπου ίση με 0.5-1.0V και ένταση παραγόμενου ρεύματος από 20mA έως 40mA για επιφάνεια εμβαδού ίση με 1 cm^2 . Αυτά τα ποσά είναι βεβαίως άρρηκτα συνδεδεμένα και εξαρτώμενα από την ισχυρότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια κυψέλη καθώς και από το υλικό το οποίο είναι κατασκευασμένη.

Το κύριο συστατικό με βάση το οποίο κατασκευάζονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι το **πυρίτιο(Si)**. Το πυρίτιο είναι το 2^ο στοιχείο που υπάρχει σε αφθονία στον πλανήτη μας σύμφωνα πάντα με τη μάζα του, καθ' ότι το 90% περίπου του φλοιού της Γης αποτελείται από ορυκτά που περιέχουν αξιόλογο ποσοστό πυριτίου. Τα στοιχεία που κατασκευάζονται από πυρίτιο είναι 3 ειδών: **μονοκρυσταλλικοί δίσκοι, πολυκρυσταλλικοί δίσκοι και άμορφα(λεπτά φύλλα πυριτίου)**. Στις μέρες μας η τεχνολογική εξέλιξη έχει ωθήσει τις ιδιότητες του πυριτίου, ως βασικού ημιαγώγιμου υλικού, σε αρκετά αισθητή βελτίωση τόσο ώστε να γίνεται λόγος για προσέγγιση του θεωρητικού συντελεστή απόδοσης.

Ο **συντελεστής απόδοσης** είναι ο λόγος της ισχύος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει μία φωτοβολταϊκή κυψέλη προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που έχει απαιτηθεί να απορροφήσει προκειμένου να αποδώσει αυτό το ποσό ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου στόχος είναι η δημιουργία διαφοράς δυναμικού στο κενό που εμπεριέχεται στις δύο όψεις του εκάστοτε στοιχείου και συγκεκριμένα αυτό το κενό ονομάζεται **ενεργειακό διάκενο**. Όταν η τιμή αυτού του ενεργειακού διακενου είναι ίση περίπου με 1.5eV τότε η μετατροπή ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αγγίξει το μέγιστο θεωρητικό συντελεστή ο οποίος είναι περίπου ίσος με 25%.

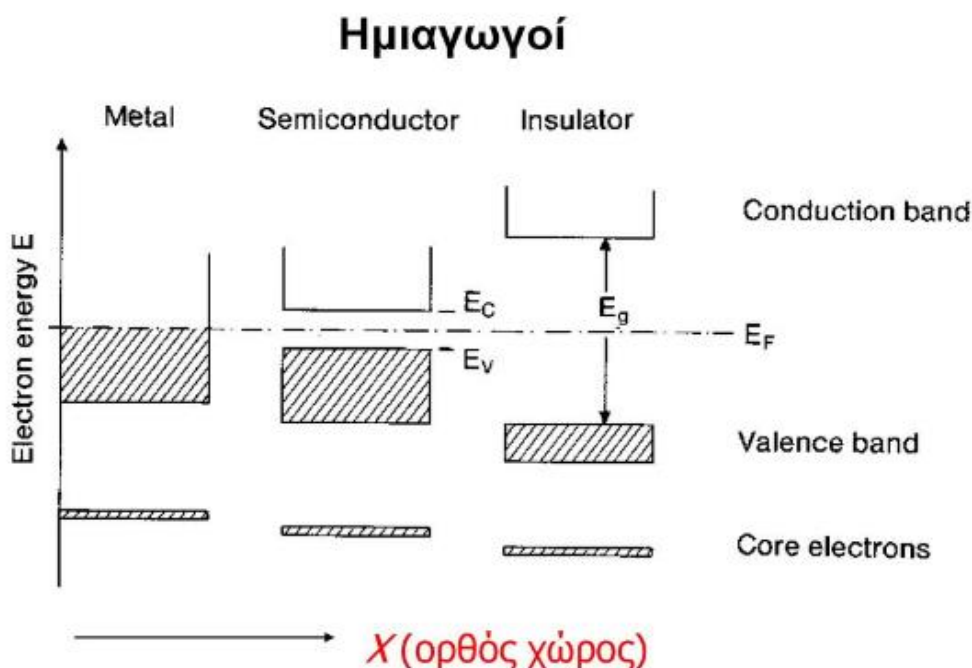
Ολοκληρώνοντας, όπως σε κάθε κατασκευή που προορίζεται για γραμμή παραγωγής και κατ' επέκταση την εξυπηρέτηση των ανθρώπινων αναγκών σημαντικό είναι να γνωρίζουμε το κόστος που απαιτείται για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, σε σχέση πάντοτε με την ποιότητα και τον βαθμό απόδοσης τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτές οι ορολογίες περιγράφονται συνδυαστικά από την έννοια του WattPeak (Wp) {Watt Αιχμής όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο}.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ : ΔΟΜΗ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

5.1 Ημιαγωγοί

Τα στερεά υλικά ανάλογα με την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα (εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία), καθώς και από το **Ενεργειακό Χάσμα ή Διάκενο (E_g)** που υφίσταται ανάμεσα σε δύο **ενεργειακές ζώνες** στη **ζώνη σθένους** και στη **ζώνη αγωγιμότητας** (τις οποίες θα εξηγήσουμε παρακάτω) διαχωρίζονται σε **αγωγούς (conductors)** {ενίοτε και **υπεραγωγούς – superconductors**}, **ημιαγωγούς (semiconductors)** και **μονωτές (insulators)**.

Όσον αφορά στις δύο ενεργειακές ζώνες που αναφέραμε, τα ηλεκτρόνια ενός μονωμένου ατόμου εμφανίζουν συγκεκριμένα ενεργειακά επίπεδα. Εάν όμως παρατηρήσουμε σύνολο τέτοιων ατόμων θα δούμε ότι δημιουργείται ένα κρυσταλλικό πλέγμα από αυτά τα άτομα και κατ' επέκταση έχουμε τη δημιουργία δύο ενεργειακών ζωνών: τη **ζώνη σθένους (valence band)** και τη **ζώνη αγωγιμότητας (conduction band)**. Στο παρακάτω σχήμα θα γίνει κατανοητή η θέση και η λειτουργία αυτών των ζωνών καθώς και του ενεργειακού χάσματος (E_g).



Σχήμα 5.1.1: Σχηματικό διάγραμμα ενεργειακών ζωνών για αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές.

Πιο συγκεκριμένα:

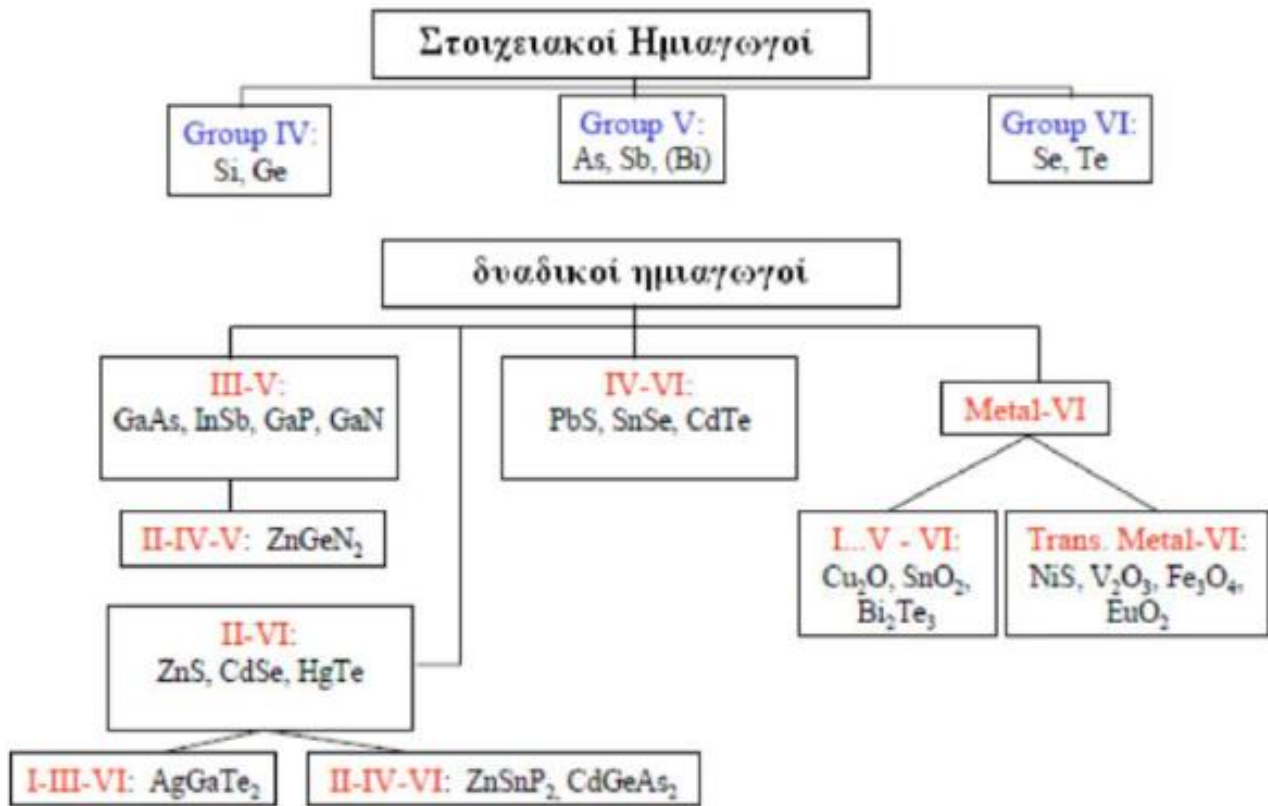
- ✓ **Υπεραγωγοί:** έχουν την ιδιότητα στις χαμηλές θερμοκρασίες να ελαχιστοποιούν την αντίσταση τους στο ηλεκτρικό ρεύμα, τείνοντας στο μηδέν.

- ✓ **Αγωγοί (μέταλλα):** χαρακτηριστικό τους είναι ο μικρός βαθμός ($10^{-8} \Omega / \text{cm}^3$) ηλεκτρικής αντίστασης που παρουσιάζουν (ανάλογος της θερμοκρασίας), παρατηρούμε δηλαδή μεγάλη αγωγιμότητα σε αυτά τα στερεά υλικά. Τα μέταλλα έχουν πληθώρα ελεύθερων ηλεκτρονίων και το βασικό λειτουργικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι σε αυτά τα υλικά οι δύο ζώνες (σθένους και αγωγιμότητας) καλύπτει σε ένα μέρος η μία την άλλη, το οποίο σε συνδυασμό με ένα μικρό προσφερόμενο ποσό ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση και μεταφορά ηλεκτρονίων.

- ✓ **Ημιαγωγοί:** τα υλικά που ονοματίζονται ως ημιαγωγοί παρουσιάζουν τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας περίπου ανάμεσα σε αυτές των αγωγών και των μονωτών ($10^{-2} \Omega / \text{cm}^3$). Η αντίσταση τους στο ηλεκτρικό ρεύμα είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας, όσο δηλαδή αυξάνεται η θερμοκρασία παρατηρούμε αύξηση και στην αγωγιμότητα τους. Ο αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι αισθητά μικρότερος από αυτόν των αγωγών. Επιπλέον, εδώ θα συναντήσουμε και την έννοια του ενεργειακού χάσματος E_g το οποίο είναι περίπου ίσο με 1 eV. Στην περίπτωση των ημιαγωγών δεν υπάρχει υπερκάλυψη των δύο ενεργειακών ζωνών, αλλά παρ' όλα αυτά με ένα προσφερθέν ποσό ενέργειας μπορούμε να πετύχουμε κίνηση και μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Σε αυτήν όμως την περίπτωση η κίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργεί κενές θέσεις οι οποίες ονομάζονται **οπές (h)**.

- ✓ **Μονωτές:** η αντίσταση που παρουσιάζουν στο ηλεκτρικό ρεύμα είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τα προαναφερθέντα σώματα ($10^{14} \Omega / \text{cm}^3$). Συν τοις άλλοις, το ενεργειακό διάκενο (E_g) στις ζώνες αυτών των υλικών είναι αρκετά μεγαλύτερο ($\approx 5\text{eV}$), κάτι που σημαίνει ότι παρά το προσφερόμενο ποσό ενέργειας είναι αδύνατη η κίνηση και μεταφορά των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων γίνεται κατά κύριο λόγο από υλικά που εμφανίζουν τις ιδιότητες των ημιαγωγών. Το κυρίαρχο στοιχείο που επιλέγεται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών είναι το πυρίτιο (Si), ευρέως διαδεδομένο για τις ιδιότητες του ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1950 αλλά και για τα υψηλά ποσά συγκέντρωσης στον φλοιό του πλανήτη μας. Στη συνέχεια παραθέτονται ένα σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει τις χημικές ενώσεις των ημιαγωγών, όπως επίσης και ένας πίνακας με τιμές ενεργειακού χάσματος (Eg) για ορισμένους από αυτούς.



Σχήμα 5.1.2: Σχηματική απεικόνιση χημικών ενώσεων ημιαγωγών

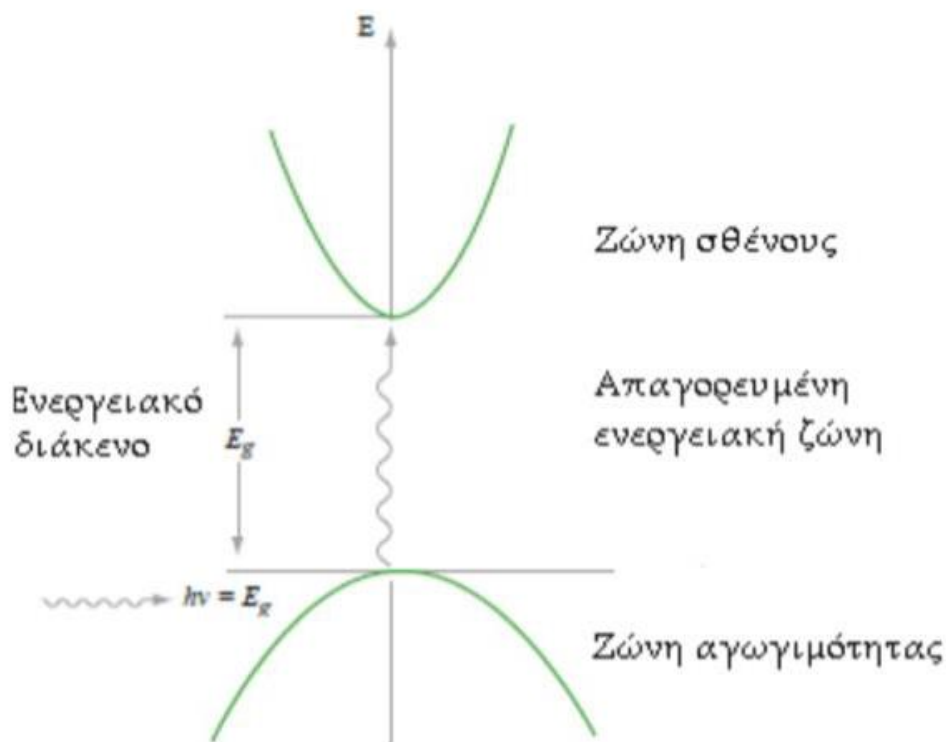
Ημιαγωγοί III-V	E_g (eV)	Ημιαγωγοί II-VI, IV-VI	E_g (eV)	Ημιαγωγοί II-IV-V ₂	E_g (eV)
AlP	2,43	ZnS	3,60	ZnSiP ₂	2,96
AlAs	2,16	ZnSe	2,58	ZnSiAs ₂	2,12
AlSb	1,52	ZnTe	2,25	ZnGeP ₂	2,34
GaAs	1,42	CdSe	1,73	ZnGeAs ₂	1,15
GaP	2,26	CdTe	1,61	ZnSnP ₂	1,66
GaSb	0,72	CdS	2,45	ZnSnAs ₂	0,73
GaN	3,36	SnS	1,08	CdSiP ₂	2,45
InP	1,35	SnSe	0,90	CdSiAs ₂	1,55
InAs	0,36	PbS	0,37	CdGeP ₂	1,72
InSb	0,17	PbSe	0,26	CdGeAs ₂	0,57
InN	2,40	PbTe	0,29	CdSnP ₂	1,17

Σχήμα 5.1.3: Πίνακας ενδεικτικών τιμών για ενεργειακό διάκενο (E_g) διαφόρων ημιαγωγών.

Η σχέση θερμοκρασίας και ηλεκτρικής αντίστασης των ημιαγωγών είναι αντιστρόφως ανάλογη. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται και η αγωγιμότητα τους στο ηλεκτρικό ρεύμα ενώ σε γενικά χαμηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά των μονωτών. Η ενέργεια που υφίσταται στο περιβάλλον και σε κανονικές συνθήκες (θερμοκρασία) είναι ικανή και αρκεί για την κίνηση και μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.

Η ζώνη σθένους δημιουργείται από την ενέργεια των ηλεκτρονίων που αποτελούν τους κρυσταλλικούς δεσμούς των στοιχείων, ενώ η ζώνη αγωγιμότητας από την ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν διαχωριστεί από τους δεσμούς και κινούνται ελεύθερα δημιουργώντας πίσω τους μια κενή θέση στο πλέγμα τη λεγόμενη, **οπή (h)**. Η σχέση οπών και ηλεκτρονίων είναι δυναμική. Όσα δηλαδή ηλεκτρόνια μεταπηδούν από τη μία ζώνη στην άλλη τόσες και οι οπές που θα δημιουργηθούν στο άτομο.

Επίσης, ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο που αναφέραμε είναι το ενεργειακό χάσμα ή ενεργειακό διάκενο (E_g). Πρόκειται για την απόσταση ανάμεσα στη ζώνη σθένους και τη ζώνη αγωγιμότητας και αναφέρεται στην ενέργεια (ελάχιστα απαιτούμενη) που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να ενεργοποιηθεί, να μετακινηθεί, να μετατραπεί από ηλεκτρόνιο σθένους σε ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας και στον ίδιο χρόνο να αφήσει πίσω του μια οπή. Το ενεργειακό αυτό διάκενο σε στοιχεία με ένα απόλυτο κρυσταλλικό πλέγμα και χωρίς καμία πρόσμιξη (όπως θα αναπτύξουμε παρακάτω) έχει την ονομασία, **απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη**. Στο ακόλουθο σχήμα μπορούμε να κατανοήσουμε την έννοια αυτή.



Σχήμα 5.1.4: Σχηματική διάταξη ενεργειακών ζωνών
και απαγορευμένης ενεργειακής ζώνης.

5.2 Ημιαγωγοί και Προσμίξεις

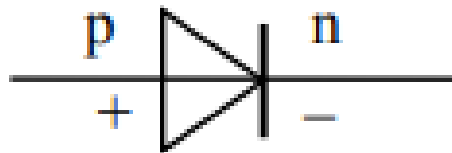
Οι ημιαγωγοί προσμίξεων όπως γίνεται αντιληπτό και από την ονομασία τους δημιουργούνται από την πρόσμιξη δύο στοιχείων σε υγρή μορφή (τήξη) κατά κύριο λόγο και προκαλούν αλλαγή στη σύσταση της κρυσταλλικής δομής. Εάν για παράδειγμα μια ποσότητα τετρασθενούς ημιαγωγού π.χ. πυριτίου (Si) αναμειχθεί σε υγρή μορφή με μια μικροποσότητα πεντασθενούς αγωγού όπως το άζωτο (N) το οποίο βρίσκεται εξ' ίσου σε κατάσταση τήξης, ύστερα από την ψύξη αυτού του τήγματος θα έχουμε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός στερεού διαλύματος. Σε αυτό το διάλυμα τα άτομα του αζώτου (N) θα έχουν πλέον ενσωματωθεί στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου (Si). Στη συνέχεια ακολουθεί η δημιουργία ομοιοπολικών δεσμών ανάμεσα στα άτομα του αζώτου και του πυριτίου και εξ' αιτίας της προαναφερθείσας διαφοράς κάθε άτομο θα έχει πλεόνασμα ενός ηλεκτρονίου. Με μια μικρή προσφορά ενέργειας μπορεί να ξεκινήσει η κίνηση των ηλεκτρονίων και ως αποτέλεσμα να μετατραπούν τα άτομα του αζώτου σε θετικά φορτισμένα ιόντα. Αυτομάτως

Ολοκληρώνοντας, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου έχουμε ταυτόχρονα και τα δύο είδη προσμίξεων οι ημιαγωγοί που εμπλέκονται αποκαλούνται **αντισταθμισμένοι ημιαγωγοί**.

5.3 Επαφή p-n

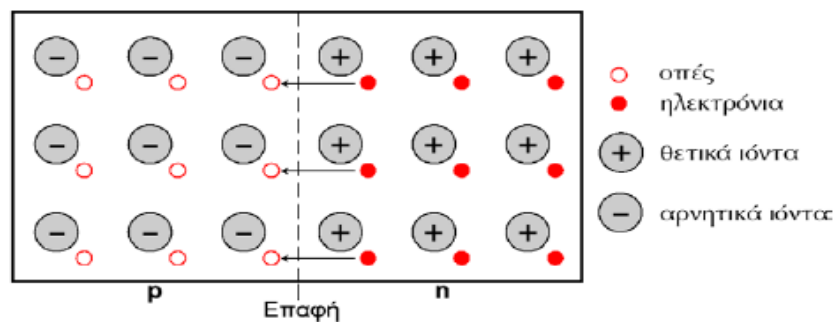
5.3.1 Δίοδος /Επαφή p-n χωρίς πόλωση

Δίοδος ή **κρυσταλλοδίοδος** ονομάζεται το στοιχείο / εξάρτημα που προκύπτει από την ένωση ενός ημιαγωγού τύπου n με έναν ημιαγωγό τύπου p.



Σχήμα 5.2.1.1 : Επαφή p-n ή κρυσταλλοδίοδος

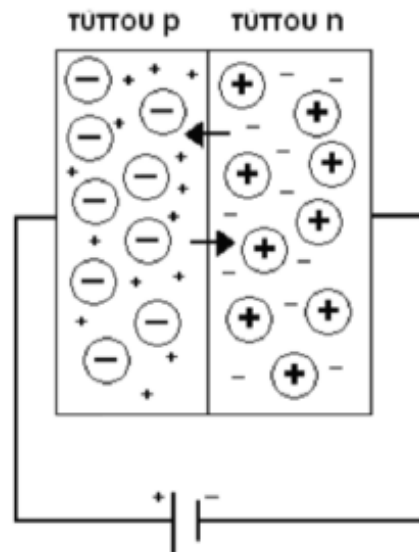
Κατά την πραγματοποίηση αυτής της ένωσης παρατηρούμε κίνηση ηλεκτρονίων (ημιαγωγός n) και οπών (ημιαγωγός p) στη μεταξύ τους διαχωριστική περιοχή. Ουσιαστικά οι δύο αυτοί ημιαγωγοί ανταλλάσσουν ηλεκτρόνια & οπές, ο μὲν ημιαγωγός προσφέροντας πλεονάζοντα ηλεκτρόνια και ο δε ημιαγωγός προσφέροντας οπές. Το αποτέλεσμα αυτής της ανταλλαγής είναι η δημιουργία μιας μικρής σε διάσταση περιοχής (περίπου ίση 1-2μm) στο σημείο επαφής των δύο στοιχείων στην οποία δεν υπάρχουν ούτε οπές αλλά ούτε και κινούμενα ηλεκτρόνια. Η περιοχή αυτή ονομάζεται **περιοχή απογύμνωσης** ή **ζώνη εξάντλησης**.



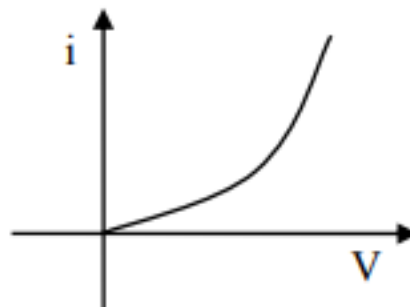
Σχήμα 5.2.1.2 : Σχηματική απεικόνιση διόδου p-n.

5.3.2 Η επαφή p-n με ορθή πόλωση

Όσον αφορά στην έννοια της ορθής πόλωσης, πρόκειται για τη σύνδεση μιας πηγής συνεχούς ρεύματος (DC) με μία διόδο p-n, κατά την οποία ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το αρνητικό τμήμα της διόδου (n) και ο θετικός πόλος της πηγής με το θετικό τμήμα της διόδου (p). Η επαφή p-n μετά τη σύνδεση αυτή θεωρείται ορθώς πολωμένη και έχει ως αποτέλεσμα την ανεμπόδιστη μετακίνηση ηλεκτρονίων από το τμήμα n στο τμήμα p, καθώς και την εξ' ίσου ανεμπόδιστη μετακίνηση οπών από το τμήμα p στο τμήμα n. Τέλος, η ένταση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της τάσης που τροφοδοτούμε την επαφή.



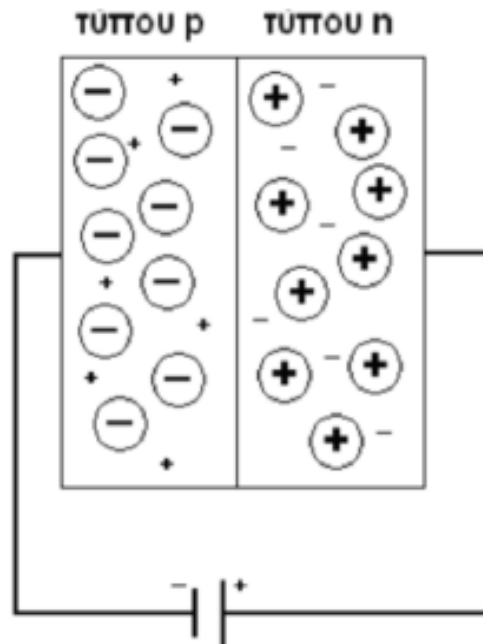
Σχήμα 5.2.2.1 : Ορθή πόλωση διόδου p-n



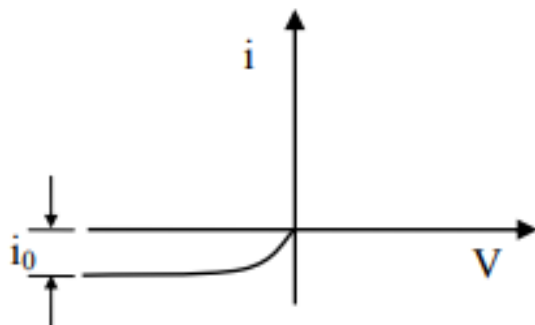
Σχήμα 5.2.2.2 : Διάγραμμα τάσης (V) – ηλεκτρικού ρεύματος (I)

5.3.3 Η επαφή p-n με ανάστροφη πόλωση

Κατά την ανάστροφη πόλωση ακολουθούμε την αντίστροφη διαδικασία από ό,τι στην ορθή. Συγκεκριμένα συνδέουμε την πηγή συνεχούς ρεύματος (DC) αυτή τη φορά με τον αρνητικό πόλο της πηγής να έρχεται σε επαφή με το τμήμα p της διόδου ενώ ο θετικός πόλος της πηγής έρχεται σε επαφή με το τμήμα n της διόδου. Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόνια του τμήματος n κινούνται προς τον θετικό πόλο της πηγής ενώ ταυτόχρονα οι οπές του τμήματος p κινούνται προς τον αρνητικό πόλο της πηγής και συνδέονται με τα υπάρχοντα εκεί ηλεκτρόνια. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας παρατηρούμε τη μεγέθυνση του εύρους της ζώνης εξάντλησης κι αυτό γιατί η μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών προς τα τμήματα p και παντίστοιχα, δεν γίνεται με την ίδια ευκολία όπως στην ορθή πόλωση. Επιπλέον, παρατηρούμε τη δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, ισχυρού και αντίθετου σε σχέση με το πεδίο της εφαρμοζόμενης πηγής στη δίοδο.



Σχήμα 5.2.3.1 : Ανάστροφη πόλωση διόδου p-n



Σχήμα 5.2.3.2 : Διάγραμμα τάσης (V) – ηλεκτρικού ρεύματος (I)

Ο μαθηματικός τύπος μέσω του οποίου υπολογίζουμε το παραγόμενο ρεύμα είναι ο εξής :

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

Όπου,

I_0 : Ανάστροφο ρεύμα κόρου

k: Σταθερά Boltzmann

T: Απόλυτη θερμοκρασία

γ : συντελεστής χαρακτηρισμού διόδου ($1 < \gamma < 2$)

Ανακεφαλαιώνοντας, στην ορθή πόλωση η ένταση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της τάσης που εφαρμόζουμε στη δίοδο ενώ αντιθέτως, στην ανάστροφη πόλωση όταν δηλαδή εφαρμόζουμε αρνητική τάση στη δίοδο το ηλεκτρικό ρεύμα λαμβάνει την τιμή I_0 , το ανάστροφο ρεύμα κόρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

6.1 Κρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο το κύριο συστατικό των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι το πυρίτιο (Si), ο ημιαγωγός που υφίσταται σε μεγάλες ποσότητες πάνω στον πλανήτη Γη για και σε συνδυασμό με την έως σήμερα τεχνολογική εξέλιξη μπορούμε να παράγουμε φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

6.1.1 φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου αποτελούν την πλειοψηφία των στοιχείων που κατασκευάζονται στις μέρες μας. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο δεν περιέχει κάποιου είδους πρόσμιξη πάρα μόνο ένα κρυσταλλικό πλέγμα χωρίς ασυνέχειες. Παράγεται είτε μέσω της μεθόδου Czochralski είτε μέσω της μεθόδου Floating Zone. Το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 200-400 μm και η απόδοση των στοιχείων αυτών αγγίζει το 15% για κατασκευάσματα που κυκλοφορούν στο εμπόριο (25% εργαστηριακά). Η επιφάνεια που αποτελούν αυτά τα στοιχεία είναι επίπεδη σχηματικά και συνηθέστερα η όψη της είναι μαύρου χρώματος. Πρόκειται για τα πιο αποδοτικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου και συνεπώς για τα πιο κοστοβόρα.



*Σχήμα 6.1.1.1: Καθαρό μονοκρυσταλλικό πυρίτιο
ανεπτυγμένο με τη μέθοδο Czochralski.*

Monocrystalline



Solar panel



Solar cell

Σχήμα 6.1.1.2: Φωτοβολταϊκό πάνελ και κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

6.1.2 φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου παράγονται από την ψύξη μεγάλων ποσοτήτων τήγματος καθαρού πυριτίου με σκοπό τη δημιουργία κρυστάλλων. Το πάχος των στοιχείων αυτών είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό των μονοκρυσταλλικών κυμαίνεται δηλαδή από 10 μμέως 50 μm. Η διαφορά από τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου βρίσκεται στην καθαρότητα της κρυσταλλικής δομής των πολυκρυσταλλικών στοιχείων όπου υφίστανται ασυνέχειες και εμφάνιση διαφορετικών κρυστάλλων πυριτίου. Η απόδοση των στοιχείων πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι περίπου 10-12% για εμπορικές κατασκευές (20% εργαστηριακά) και αυτό δικαιολογεί άμεσα το χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά. Τέλος, σε αντίθεση με τον σκούρο μαύρο χρωματισμό των μονοκρυσταλλικών, τα πολυκρυσταλλικά εμφανίζουν ένα μπλε σκούρο χρώμα στην επιφάνεια τους.

Polycrystalline



Solar panel



Solar cell

Σχήμα 6.1.2.1: Φωτοβολταϊκό πάνελ και κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου

6.1.3 φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας (ribbonsilicon)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας παράγονται από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και στην ουσία πρόκειται για μια λεπτή ταινία η οποία έχει δημιουργηθεί ύστερα από τήξη του υλικού. Ο βαθμός απόδοσης του είναι περίπου 12% και το κόστος για την παραγωγή τους είναι αρκετά υψηλό γι' αυτό και δεν τα βρίσκουμε σε μεγάλη βιομηχανική και εμπορική παραγωγή.

Μία ακόμη ένωση η οποία έχει χρησιμοποιηθεί είναι το Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs). Το GaAs είναι μια ιδανική ένωση για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα καθ' ότι η τιμή για το ενεργειακό του διάκενο είναι περίπου ίση με 1.4 eV. Επιπλέον, το Αρσενικούχο Γάλλιο είναι ιδανικό για χρήση στο διάστημα καθώς έχει υψηλή αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες αλλά το μειονέκτημα της ύπαρξης μικρών ποσοτήτων Γαλλίου στη Γη, το καθιστά αδύνατο για μαζική και εμπορική παραγωγή.

6.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων (thin film)



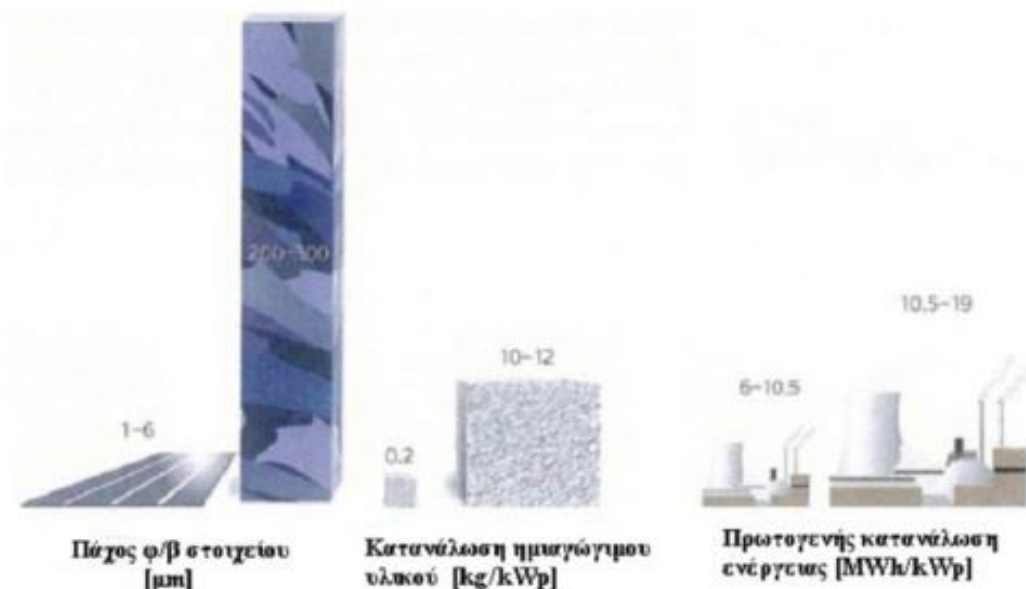
Σχήμα 6.2.1: Φωτοβολταϊκό πάρκο λεπτών υμενίων (Τουρκία)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων (thin film) αποτελούν μια οικονομική μέθοδο λόγω του ότι δεν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες για την επεξεργασία των υλικών τους. Ο ημιαγωγός που θα εμπεριέχεται στα στοιχεία αυτά τοποθετείται με τη μορφή λεπτών στρωμάτων (thin film) πάνω σε ένα χαμηλού κόστους στοιχείο ανεξαρτήτου είδους υλικού, όπως αλουμίνιο, πλαστικό γυαλί κλπ. Η σύνθεση αυτή ολοκληρώνεται όταν τοποθετηθεί στην οπίσθια πλευρά της ένας μεταλλικός αγωγός (όπως συμβαίνει και στην παραγωγή των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων) και στη συνέχεια ξεκινήσει η παραγωγή μεμονωμένων αλλά παρ' όλα αυτά ηλεκτρικά συνδεδεμένων

στοιχείων με τη βοήθεια κοπής laser. Για την παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων με λεπτά υμένια χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί όπως το άμορφο πυρίτιο(a:Si), ο Δισεληνοϊδούχος χαλκός(CuInSe₂ ή CIS), το Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)και το Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe).

6.2.1 φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous thin film silicon)

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων με λεπτά υμένια είναι αυτή του άμορφου πυριτίου. Η έννοια του άμορφου πυριτίου δεν περιγράφει κάτι άλλο παρά την τυχαία διάταξη που ακολουθούν τα άτομα του πυριτίου. Τα στοιχεία αυτά έχουν το πλεονέκτημα να μην επηρεάζονται από τις ακραία υψηλές θερμοκρασίες, όπως επίσης, έχουν το πλεονέκτημα έναντι των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων να παρουσιάζουν υψηλές αποδόσεις στην περίπτωση της διάχυτης ακτινοβολίας (συννεφιά). Ένα ακόμη πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου είναι ότι δεν υπάρχει κάποιου είδους περιορισμός όσον αφορά στη μορφή που θα κατασκευαστούν (σε αντίθεση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά) δηλαδή, το σώμα πάνω στο οποίο θα τοποθετηθεί ο ημιαγωγός μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή, απλά και μόνο για πρακτικούς σκοπούς δίνεται ιδιαίτερη προτίμηση στις ορθογώνιες μορφές. Η απόδοση αυτών των στοιχείων κυμαίνεται μεταξύ 6% και 8%.



Σχήμα 6.2.1.1 : Συγκριτική απεικόνιση φωτοβολταϊκού στοιχείου thinfilm (αριστερά) έναντι κρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου (δεξιά)

6.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων

Ένα από τα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η αδυναμία απορρόφησης και κατ' επέκταση αξιοποίησης του συνολικού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει λόγω της ενεργειακής διαφοράς ανάμεσα στα προσπίπτοντα φωτόνια και στο ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού στοιχείου των φωτοβολταϊκών. Για την ικανοποίηση επομένως, αυτών των απαιτήσεων, η τεχνολογία οδηγήθηκε στη δημιουργία **φωτοβολταϊκών στοιχείων πολλαπλών στρωμάτων (multijunction / tandemcell)**. Πρόκειται για ενώσεις στις οποίες τα φωτόνια που δεν θα απορροφηθούν από το ανώτερο (πρώτο) στρώμα φωτοβολταϊκού υλικού, θα προχωρήσουν στο επόμενο (δεύτερο) υλικό, το οποίο βρίσκεται σε αυτή τη θέση έχοντας μικρότερο ενεργειακό διάκενο από το πρώτο, με σκοπό την αξιοποίηση των διερχόμενων φωτονίων. Στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τέτοιας κατηγορίας φωτοβολταϊκών είναι ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός, το Τελλουριούχο Κάδμιο, το Αρσενικούχο Γάλλιο. Η χρήση αυτών των στοιχείων αποτέλεσε σταθμό στους βαθμούς απόδοσης των φωτοβολταϊκών με τον πήχη να αγγίζει το 43% (Solar Junction).

6.3.1 Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (CuInSe₂ ή CIS)

Πρόκειται για ένα πολυκρυσταλλικό στοιχείο το οποίο παρουσιάζει υψηλή απορροφητικότητα στο φως που προσπίπτει στην επιφάνεια του. Έχει χαμηλό κόστος κατασκευής, αλλά το πρόβλημα έγκειται στις μικρές ποσότητες ινδίου που υπάρχουν στη φύση. Η αύξηση της απόδοσης του επιτυγχάνεται με την πρόσμιξη Γαλλίου (CIGS). Σε γενικές γραμμές η απόδοση του αγγίζει το 18% σε εργαστηριακό επίπεδο, ενώ στην ευρύτερη αγορά μόλις το 10-11%.



Σχήμα 6.3.1.1 : Στοιχείο Δισεληνοϊνδιούχου Χαλκού

6.3.2 ΤελλουριούχοΚάδμιο (CdTe)

Ένα ακόμη πολυκρυσταλλικό στοιχείο το οποίο πλεονεκτεί έναντι άλλων λόγω της τιμής που λαμβάνει το ενεργειακό του διάκενο η οποία ανέρχεται στο 1 eV. Αυτή η τιμή πλησιάζει αρκετά το ηλιακό φάσμα με αποτέλεσμα να μπορεί να απορροφήσει έως και το 95% της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του. Η εργαστηριακή του απόδοση αγγίζει το 15% ενώ οι αποδόσεις στην ευρύτερη αγορά δεν ξεπερνούν το 8%. ‘‘Πληγή’’ για την ανάπτυξη του τελλουριούχου καδμίου αποτελεί η έλλειψη τελλουρίου, αλλά και έρευνες που υποδεικνύουν πως το κάδμιο είναι καρκινογόνο στοιχείο.

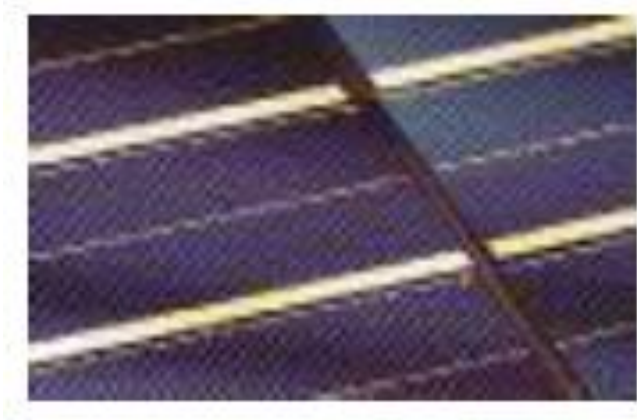


Σχήμα 6.3.2.1 : Στοιχείο Τελλουριούχου Καδμίου

6.3.3 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Η δομή αυτού του στοιχείου είναι κρυσταλλική και όμοια με του πυριτίου. Αποτελείται από τα επί μέρους στοιχεία Γάλλιο και Αρσένιο. Το Γάλλιο (Ga)δημιουργείται μέσα από την τήξη διαφόρων μετάλλων όπως είναι το αλουμίνιο (Al), ο ψευδάργυρος (Zn) κλπ. Κατατάσσεται στην κατηγορία με τα σπάνια στοιχεία που βρίσκονται στη φύση, όπως ο χρυσός. Από την άλλη πλευρά το Αρσένιο δεν αποτελεί σπάνιο στοιχείο αλλά είναι τοξικό για τον ανθρώπινο οργανισμό. Το ενεργειακό διάκενο αυτής της ένωσης λαμβάνει τιμή κοντά στο 1,43 eV. Η τιμή αυτή είναι ιδανική για τη μέγιστη απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, το Αρσενικούχο Γάλλιο παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή σε ακραία υψηλές θερμοκρασίες και ταυτόχρονα πολύ

υψηλή απόδοση της τάξης του 26-28%. Για τους λόγους αυτούς αλλά και εξ' αιτίας του υψηλού κόστους παραγωγής του συνιστάται κυρίως σε διαστημικές εφαρμογές.



Σχήμα 6.3.3.1 : Στοιχείο Αρσενικούχου Γαλλίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

7.1 Εισαγωγή στα Οργανικά Φωτοβολταϊκά

Οι υψηλές απαιτήσεις για ενέργεια στη σημερινή εποχή, η ταυτόχρονη εξάντληση του ορυκτού πλούτου και κατά συνέπεια αυτών, η επιβάρυνση/κακοποίηση του περιβάλλοντος ώθησε τον ανθρώπινο παράγοντα στην έρευνα για δημιουργία μέσων εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων στοιχείων της φύσης, ένα εκ των οποίων είναι ο Ήλιος. Δημιουργήθηκαν έτσι τα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο απαιτούν ένα σχετικά υψηλό κόστος παραγωγής αλλά και συντήρησης συγκριτικά με τα υπόλοιπα τεχνολογικά μέσα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το κύριο συστατικό που αυξάνει το κόστος των φωτοβολταϊκών είναι η ανάπτυξη τεχνολογιών με σκοπό την αποδοτικότερη επεξεργασία των ημιαγωγίμων υλικών.

Τα τελευταία 18-20 χρόνια περίπου, λόγω της ιλιγγιώδους ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ευρύτερη αγορά, δημιουργήθηκε το ενδιαφέρον για έρευνα παραγωγής ηλιακών κυττάρων με βασικό συστατικό τα **οργανικά υλικά**.

Τα **οργανικά φωτοβολταϊκά συστήματα (OPVs)** είναι διατάξεις ημιαγωγίμων υλικών, οι οποίες απαρτίζονται από (ένα ή/και περισσότερα) πολυμερικά στρώματα/ταινίες (polymeric films). Παρ' ότι τα οργανικά φωτοβολταϊκά θεωρούνται ιδανικά από άποψη κόστους παραγωγής και συντήρησης έχουν ένα κομβικά σημαντικό μειονέκτημα το οποίο είναι η χαμηλή απόδοση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Συγκεκριμένα, ενώ οι συμβατικές φωτοβολταϊκές διατάξεις προσφέρουν αποδόσεις της τάξεως του 10% (thin film) ή ακόμη και του 20% (άμορφο πυρίτιο), οι διατάξεις των οργανικών φωτοβολταϊκών αγγίζουν μόλις το 5%.

Στο ζυγό με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των οργανικών φωτοβολταϊκών εκτός από τη χαμηλή απόδοση προστίθενται επιπλέον στοιχεία στην πλευρά των μειονεκτημάτων, τα οποία θέτουν ερωτήματα για την εμπορική βιωσιμότητα των συστημάτων αυτών.

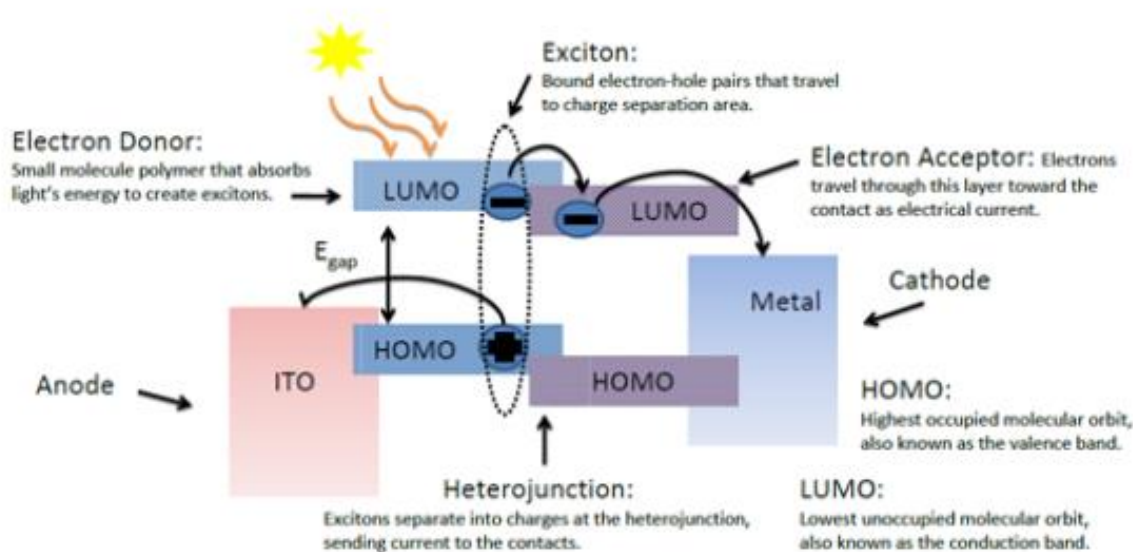
Ένα από αυτά τα στοιχεία είναι η χαμηλή αντοχή των οργανικών κυττάρων στην περιβαλλοντική ατμόσφαιρα (οξυγόνο, υγρασία). Μπορεί ένα κύτταρο να παραμείνει "ζωντανό" ύστερα από την έκθεση του στον αέρα, αλλά η διάρκεια ζωής του θα μειωθεί σημαντικά μόνο από τη στιγμή που θα εκτεθεί σε φως. Στη λίστα με τα στοιχεία αυτά προστίθεται και το θέμα του μεγέθους που κατασκευάζονται τα κύτταρα. Η παρούσα κατάσταση περιλαμβάνει κύτταρα μεγέθους περίπου 1 mm², τα οποία για να είναι βιώσιμα και να μπορούν να αξιοποιηθούν θα πρέπει να απαρτίζονται

περιοχές έως και των 100 cm^2 . Επιπλέον, αυτά τα κύτταρα θα πρέπει να αποτελέσουν μέρος φωτοβολταϊκών διατάξεων, η επιφάνεια των οποίων θα είναι τουλάχιστον 1 m^2 .

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV) έγιναν γνωστά ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ενώ λίγο πριν τα τέλη του, ήρθε η καινοτόμος ανακάλυψη των **πολυμερών** από τον Καθηγητή Φυσικής του Πανεπιστημίου της Σάντα Μπάρμπαρα, στην Καλιφόρνια, Dr Alan Heeger και τους δύο συναδέλφους του, Dr Alan MacDiarmid από τη Νέα Ζηλανδία καθώς και τον ερευνητή Hideki Shirakawa από την Ιαπωνία. Αυτή η ανακάλυψη τους οδήγησε στην κατάκτηση του βραβείου Νόμπελ στο τέλος του 20^{ου} αιώνα (2000). Συγκεκριμένα, εξετάζοντας τη συμπεριφορά ορισμένων πλαστικών (συνθετικά πολυμερή) ύστερα από επαφή με υλικά τα οποία λειτουργούν ως "δότες" ηλεκτρονίων, παρατηρήθηκε το αποτέλεσμα της επιτρεπόμενης ροής ηλεκτρονίων, προσδίδοντας έτσι σε αυτά τα υλικά τις ιδιότητες των ημιαγωγών.

7.2 Αρχή λειτουργίας των Οργανικών Φωτοβολταϊκών

Operation of Organic Solar Cell



Σχήμα 7.2.1: Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής ενέργειας σε οργανικά φωτοβολταϊκά (πολυμερική ηλιακή κυψελίδα)

Η αρχή λειτουργίας των οργανικών φωτοβολταϊκών και κατά συνέπεια των ηλιακών κελιών που τα αποτελούν δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από τα ανόργανα φωτοβολταϊκά που είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, όταν η επιφάνεια ενός ημιαγωγίου υλικού εκτεθεί στο ηλιακό φως τότε ακολουθούν δύο ειδών αλληλένδετες λειτουργίες: παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου (οπές / κενές θέσεις ή ηλεκτρόνια) δια μέσου της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιακό φως) και διαίρεση ηλεκτρικού φορτίου στην επαφή αγωγιμότητας η οποία στη συνέχεια θα οδηγήσει στην μετατροπή αυτής της διαίρεσης σε ηλεκτρική ενέργεια (ρεύμα).

Ενώ στα ανόργανα φωτοβολταϊκά η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας παράγει φορείς ηλεκτρικών φορτίων (θετικούς και αρνητικούς) οι οποίοι κινούνται ελεύθερα, στα οργανικά φωτοβολταϊκά παρατηρήθηκε ότι πλέον γίνεται λόγος για δεσμευμένους φορείς ηλεκτρικών φορτίων. Ένα τέτοιο δεσμευμένο ζεύγος ηλεκτρικών φορέων (θετικού και αρνητικού) ονομάζεται **εξιτόνιο**. Η θέση που λαμβάνει το πολυμερές υλικό (φωτοενεργό), στο οποίο βασίζεται η κατασκευή των οργανικών φωτοβολταϊκών, είναι ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια. Το πρώτο είναι διάφανο και επιτρέπει την απορρόφηση του ηλιακού φωτός και το δεύτερο είναι κατασκευασμένο από κάποιο είδους μέταλλο. Μέσω της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο πολυμερές, προκαλείται διέγερση στα ηλεκτρόνια του πυρήνα με αποτέλεσμα αυτά να έχουν την τάση για απομάκρυνση από αυτόν. Συνεπώς, μπορούμε πλέον να μιλάμε για δύο φορείς ηλεκτρικού φορτίου, έναν με θετικό και έναν με αρνητικό ο συνδυασμός των οποίων αποτελεί το εξιτόνιο. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι με τη βοήθεια ηλεκτρικού πεδίου τα δεσμευμένα ζεύγη φορτίων του εξιτονίου μπορούν να διασπαστούν σε ελεύθερα κινούμενα φορτία.

7.2.1 Στοιχεία θεωρίας εξιτονίων

Τα εξιτόνια εντοπίζονται στα ημιαγωγία υλικά, σε μοριακούς κρυστάλλους αλλά και στα πολυμερή υλικά.

Όσον αφορά στους ημιαγωγούς, η έλξη που δημιουργείται κατά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ανάμεσα στο ηλεκτρόνιο και τη διαθέσιμη οπή έχει ως απόρροια την εμφάνιση κίνησης στο ενεργειακό χάσμα. Τη μετάβαση δηλαδή από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και κατά συνέπεια τη δημιουργία οπής στη ζώνη σθένους. Οι ηλεκτροστατικές ελκτικές δυνάμεις Coulomb, που κατακλύζουν τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών λόγω αντίθετου ηλεκτρικού προσήμου είναι υπεύθυνες για τη συνεχή σύζευξη αυτών των στοιχείων τα οποία αποτελούν τα εξιτόνια των ημιαγωγών.

Ένα ζευγάρι ηλεκτρονίου-οπής όταν είναι απομονωμένο σε μια μοριακή ενότητα (μονάδα) τότε αυτό μπορεί να αποκαλεστεί/θεωρηθεί ως εξιτόνιο Frenkel (μοριακό εξιτόνιο). Αυτή η κατάσταση αφορά στους μοριακούς κρυστάλλους.

Στα οργανικά ημιαγώγιμα υλικά, δηλαδή στα πολυμερή, όταν ένα φωτόνιο θα απορροφηθεί από το υλικό και θα διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο αυτό θα κινηθεί προς τη ζώνη αγωγιμότητας αλλά παρ' όλα αυτά θα παραμείνει συζευγμένο με την οπή που θα δημιουργήσει, λόγω των προαναφερθέντων ηλεκτροστατικών δυνάμεων Coulomb που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Τα ζεύγη αυτά είναι τα εξιτόνια για τα οποία και γίνεται λόγος σε αυτή την παράγραφο. Εκτός από το εξιτόνιο Frenkel που αναφέραμε, το οποίο αφορά μια μοριακή μονάδα, υπάρχει και το εξιτόνιο Wannier-Mott το οποίο αφορά περισσότερες από μία μοριακές ενότητες. Η κατάσταση ανάμεσα στις δύο προαναφερθείσες καταστάσεις όταν δηλαδή το εξιτόνιο βρίσκεται τοποθετημένο σε ορισμένες γειτνιάζουσες μοριακές ενότητες δίνει τη δυνατότητα στο εξιτόνιο να ονομαστεί **φορέας φορτίου (exiτόνιο charge transfer)**.

Στα συζυγή πολυμερή (θα αναλύσουμε σε επόμενη παράγραφο) το μέγεθος των δυνάμεων σύζευξης των εξιτονίων βασίζεται κατά κύριο λόγο στο τρόπο δόμησης του εκάστοτε πολυμερούς. Για παράδειγμα, σε άμορφα πολυμερή η τιμή της ενέργειας αυτής κυμαίνεται κοντά στα 0.45 eV.

7.2.2 Συζυγή Πολυμερή (Conjugated Polymers)

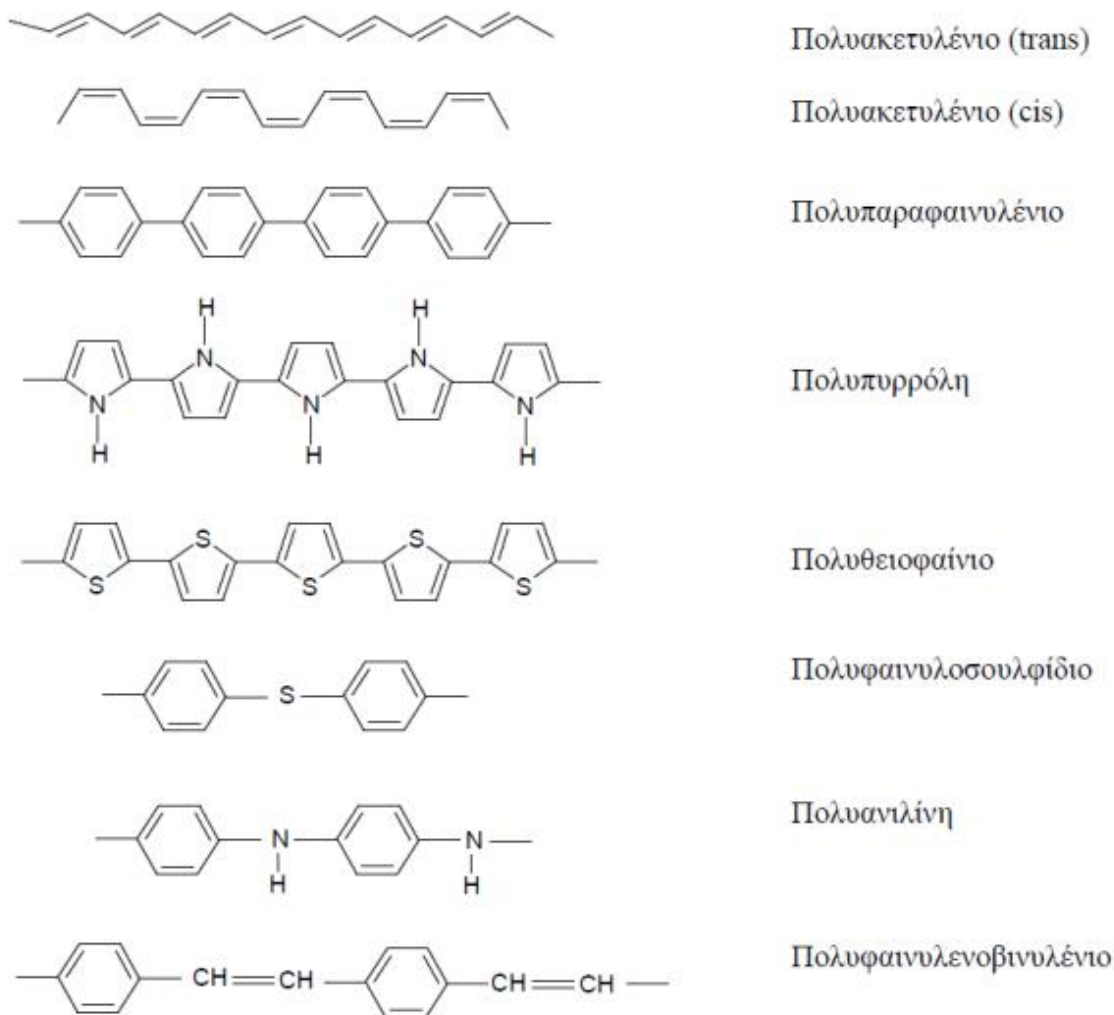
Τα πολυμερή είναι χημικές ενώσεις, αποτελούμενες από ένα μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων ομοίων μορίων (μονομερή), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους διαμορφώνοντας μακρομοριακές αλυσίδες μεγάλου μοριακού βάρους (MB).

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

Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Στα πολυμερή που μεταφορά φορτίου γίνεται με ιοντικό μηχανισμό και ονομάζονται πολυμερείς ηλεκτρολύτες ή ιοντικά πολυμερή, και στα πολυμερή που ο μηχανισμός μεταφοράς φορτίου είναι κυρίως ηλεκτρονιακής φύσης και ονομάζονται αγώγιμα πολυμερή. Τα συζυγή πολυμερή συμπεριφέρονται ως μονωτές ή ημιαγωγοί ενώ μετά από νόθευση (doping), μετατρέπονται σε αγωγούς. Ο άνθρακας, είναι το βασικό στοιχείο ενός οργανικού μορίου.

Ένα πολυμερές περιέχει μια μεγάλης διάρκειας ακολουθία διαδοχικών ατόμων του. Τα άτομα άνθρακα συνδέονται σειριακά μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς. Μια πολυμερική αλυσίδα

μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργείται από μικρές επαναλαμβανόμενες μονάδες μέσα στην αλυσίδα. Αυτές οι μονάδες ονομάζονται μονομερή και αποτελούν τις δομικές μονάδες ενός πολυμερούς. Η μοναδική ιδιότητα των **συζυγών πολυμερών** οφείλεται στην παρουσία συζυγών διπλών δεσμών κατά μήκος της πολυμερικής αλυσίδας. Επιπλέον, οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων του άνθρακα είναι διαδοχικά μονοί και διπλοί. Κάθε απλός δεσμός συνδέεται με έναν δεσμό σ που αποτελεί τον ισχυρό δεσμό, ενώ κάθε διπλός δεσμός συνδέεται περιέχει έναν ασθενέστερο, τον δεσμό π .



Σχήμα 7.2.2.1: Είδη αγώγιμων οργανικών πολυμερών

7.2.3 Ηλεκτρικές Ιδιότητες των Συζυγών Πολυμερών

Τα συζυγή πολυμερή θεωρούνται ηλεκτρικοί μονωτές ή ημιαγωγοί. Οι ενεργειακές ζώνες τους έχουν ανάλογη δομή με των ανόργανων υλικών. Οι ιδιότητες των συζυγών πολυμερών ως προς την ημιαγωγική τους συμπεριφορά, συσχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των δεσμών τύπου π-. Οι δεσμοί π- είναι διεσπαρμένοι σε ολόκληρο το μόριο και η κβαντομηχανική επικάλυψη των τροχιακών p_z - σε δύο άτομα του άνθρακα χωρίζει τον εκφυλισμό τους και παράγει δύο τροχιακούς, μια συνδετική τροχιά π- και μια μη συνδετική τροχιά π-. Το τροχιακό π- με την χαμηλότερη ενέργεια παράγει τη ζώνη σθένους, ενώ το τροχιακό π*- με την υψηλότερη ενέργεια διαμορφώνει τη ζώνη αγωγιμότητας. Τα διάφορα ηλεκτρόνια σε μια πολυμερή αλυσίδα, συμβάλλουν στο σύστημα π- και οι συνδεδεμένες και μη συνδεδεμένες τροχιές εκφυλίζονται περαιτέρω. Αναλόγως με τη ζώνη σθένους και αγωγιμότητας στους ανόργανους ημιαγωγούς, η κατειλημμένη ζώνη π- διαμορφώνει το υψηλότερο κατειλημμένο μοριακό τροχιακό HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) και οι ελεύθερες μορφές ζωνών π*- διαμορφώνουν το χαμηλότερο μη κατειλημμένο μοριακό τροχιακό, το LUMO του πολυμερούς (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Καθώς η επικάλυψη μεταξύ των γειτονικών τροχιακών p_z και του αριθμού ηλεκτρονίων συμμετέχουν στις αυξήσεις συστημάτων π, τα πλάτη των ενεργειακών ζωνών γίνονται ευρύτερα και το κενό ενέργειας μεταξύ τους μειώνεται. Χάσμα ζώνης είναι διαφορά στην ενέργεια μεταξύ του HOMO και του LUMO και ονομάζεται ενεργειακό διάκενο. Τα χάσματα ζωνών κυμαίνονται από 1.5 σε 3.5 eV, δείχνοντας ότι τα περισσότερα από τα πολυμερή είναι ενεργά στην περιοχή του ορατού μήκους κύματος. Διεγείροντας ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ισοδύναμο με τη μεταφορά ηλεκτρονίου από ένα δεσμικό τροχιακό σε ένα αντί-δεσμικό τροχιακό, παρέχοντας του ενέργεια μεγαλύτερη από το χάσμα ζώνης. Σε μια πραγματική πολυμερή αλυσίδα η συζυγία είναι απίθανο να επεκταθεί στο πλήρες μήκος της, καθώς οι ατέλειες και τα ελαττώματα διακόπτουν τις τροχιακές επικαλύψεις. Στη θέση αυτού θα υπάρξει μια σειρά τμημάτων αλυσίδων, κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από έναν διαφορετικό αριθμό επανάληψης μονάδων και έχουν ένα διαφορετικό ενεργειακό χάσμα. Σε γενικές γραμμές τα μικρά τμήματα της αλυσίδας θα έχουν ένα ευρύ ενεργειακό διάκενο (χάσμα), ενώ τα μεγάλα τμήματα θα έχουν ένα στενότερο. Στα στερεούς κρυστάλλους υπάρχει μια τρισδιάστατη ηλεκτρονική δομή ζωνών που ανταποκρίνεται στη τρισδιάστατη φύση του κρυστάλλου. Τα πολυμερή είναι ουσιαστικά μονοδιάστατα συστήματα. Αυτό είναι λόγω της πολύ μακριάς κύριας στήλης των ατόμων άνθρακα. Εκεί οι δεσμοί είναι ισχυρά δεμένοι μεταξύ τους και η αλληλεπίδραση με τις γειτονικές πολυμερείς αλυσίδες είναι μικρή. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει μια ισχυρή ένωση μεταξύ των διεγέρσεων των ηλεκτρονικών και της τοπικής διαμόρφωσης της πολυμερούς αλυσίδας. Αυτή η σχέση οδηγεί σε μια οικογένεια διεγερμένων καταστάσεων όπως είναι τα εξιτόνια, που αντιπροσωπεύουν τις διεγέρσεις των ηλεκτρονίων που παρευρίσκονται στο πολυμερές σώμα, συνδυασμένες με τις σχετικές στρεβλώσεις του δικτυωτού πλέγματος τους.

7.3 Κατηγορίες Οργανικών Φωτοβολταϊκών

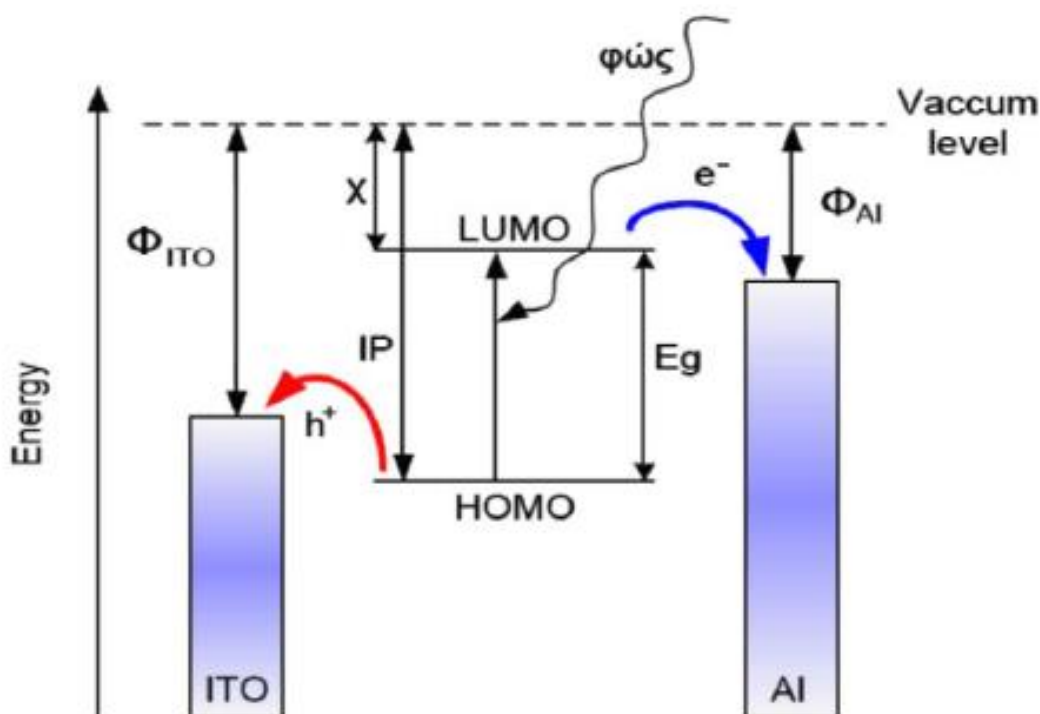
Οι κατηγορίες που θα μας απασχολήσουν σε αυτό το κεφάλαιο είναι οι εξής: **οργανικά φωτοβολταϊκά μονοστρωματικής διάταξης (Single Layer)**, **οργανικά φωτοβολταϊκά διστρωματικής διάταξης (Bilayer)** και **οργανικά φωτοβολταϊκά διεσπαρμένης ετεροεπαφής (Bulk Heterojunction)**

7.3.1 Οργανικά Φωτοβολταϊκά Μονοστρωματικής Διάταξης (Single Layer)

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

Παρατηρήθηκε ότι η διάσπαση των εξιτονίων γινόταν πιο αποτελεσματικά στις επαφές με τα ηλεκτρόδια και λόγω του μικρού μήκους διάχυσης των εξιτονίων στο ενεργό υλικό, η διαδικασία αυτή δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική, επειδή έχουμε μεγάλη πιθανότητα επανασύνδεσης. Δε συμμετέχει δηλαδή στη διαδικασία δημιουργίας των φορέων όλος ο όγκος του ενεργού υλικού, αλλά μόνο η περιοχή του που βρίσκεται σε επαφή με τα ηλεκτρόδια. Αναφέρουμε ότι το μήκος διάχυσης των φορέων είναι της τάξης των 10 nm, με συνέπεια το πάχος του ενεργού υλικού να πρέπει να είναι και αυτό της ίδιας τάξης μεγέθους. Το πολύ λεπτό φιλμ όμως έχει ως αποτέλεσμα την λιγότερη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας. Για πολλούς οργανικούς ημιαγωγούς το πάχος του υμενίου θα πρέπει να είναι της τάξης των 100 nm, ώστε να απορροφούν ικανοποιητικά. Η αύξηση στο πάχος του υμενίου θα έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη απορρόφηση του φωτός, αλλά μόνο ένα μικρό μέρος από τα δημιουργούμενα εξιτόνια θα μπορούν να φτάσουν στη διεπιφάνεια και να διαχωριστούν.

Ένα από τα μειονεκτήματα αυτών των διατάξεων είναι ότι κάποιες φορές το ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διάσπαση των εξιτονίων, δεν είναι τόσο ισχυρό όσο απαιτείται, με συνέπεια η όλη διαδικασία να μην είναι αρκετά αποτελεσματική.

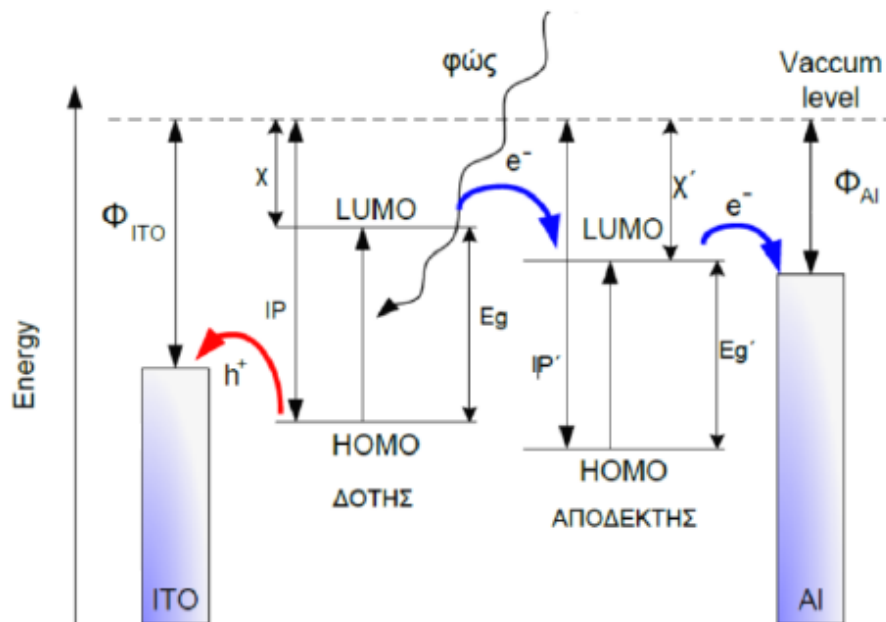


Σχήμα 7.3.1.1: Ενεργειακό διάγραμμα οργανικού φωτοβολταϊκού
μονοστρωματικής διάταξης

7.3.2 Οργανικά Φωτοβολταϊκά Διστρωματικής Διάταξης (BiLayer)

Λόγω των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στις μονοστρωματικές διατάξεις, έγινε αναγκαία η παρασκευή νέων ενεργών υλικών τα οποία αποτελούνται από μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών (heterojunctions), όπου το ένα συμπεριφέρεται σαν δότης ηλεκτρονίων και το άλλο σαν δέκτης. Η χρήση αυτών των διατάξεων οφείλεται στον Tang, ο οποίος χρησιμοποίησε ενεργό υλικό αποτελούμενο από δύο διαφορετικές χρωστικές και είχε σαν αποτέλεσμα μια σημαντική αύξηση στην απόδοση. Το κοινό χαρακτηριστικό με τις μονοστρωματικές διατάξεις είναι ότι πάλι το ενεργό υλικό τοποθετείται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με διαφορά δυναμικού, λόγω των οποίων οι δημιουργούμενοι, από τη διάσπαση των εξιτονίων, φορείς συλλέγονται στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Η διάσπαση όμως των εξιτονίων οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών λόγω διαφοράς στην ηλεκτρονική συγγένεια (χ) και το δυναμικό ιονισμού (IP) μεταξύ των δύο υλικών. Για τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου που θα ευνοεί το διαχωρισμό των φορτίων, θα πρέπει η ηλεκτρονική συγγένεια όσο και το δυναμικό ιονισμού να είναι μεγαλύτερα στο ένα υλικό (δέκτης ηλεκτρονίων) από ότι στο άλλο (δότης ηλεκτρονίων), με την προϋπόθεση

αυτή η διαφορά της δυναμικής ενέργειας να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια δεσμού του εξιτονίου. Η απορρόφηση του φωτός γίνεται από το δότη. Η διέγερση του δότη έχει σαν αποτέλεσμα ένα ηλεκτρόνιο να μεταβεί από το τροχιακό LUMO στο τροχιακό HOMO αφήνοντας πίσω μια οπή. Το ηλεκτρόνιο με την οπή μπορούν να επανασυνδεθούν έχοντας σαν αποτέλεσμα την εκπομπή φωτός ή μπορούν να διαχωριστούν. Ο διαχωρισμός αυτός ευνοείται αν υπάρχει διαφορά στα τροχιακά LUMO μεταξύ του δότη και του δέκτη, οπότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταφερθεί. Βασικό πλεονέκτημα των διατάξεων αυτών είναι ότι η δημιουργία και η διάσπαση των εξιτονίων γίνεται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών που συνθέτουν το ενεργό υλικό και στη συνέχεια οι φορείς που δημιουργούνται, μεταφέρονται σε διαφορετικά υλικά. Η μορφολογία λοιπόν της διεπιφάνειας των δύο υλικών διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευή αποδοτικών διατάξεων. Η καλύτερη ρύθμιση του ενεργειακού χάσματος (bandgap) και συνάμα η βελτιστοποίηση της απορρόφησης του φωτός μπορεί να ρυθμιστεί καλύτερα χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς ημιαγωγούς. Τα υλικά της διεπιφάνειας μπορεί να αποτελούνται από κάποιο πολυμερές σε επαφή με φουλερένιο ή κάποιο παράγωγό του, πολυμερές σε επαφή με άλλο πολυμερές, πολυμερές σε επαφή με κάποιο άλλο μόριο, επαφή δύο χρωστικών κ.α. Στην περίπτωση της επαφής με το φουλερένιο, στο πολυμερές γίνεται η απορρόφηση του φωτός, η δημιουργία του εξιτονίου στη διεπιφάνεια και ο διαχωρισμός του με την εισαγωγή του ηλεκτρονίου στο φουλερένιο. Επομένως ο δέκτης ηλεκτρονίων είναι το φουλερένιο και ο δότης το πολυμερές. Όπως φαίνεται λοιπόν η καλή αγωγιμότητα στη μεταφορά οπών ή ηλεκτρονίων είναι βασικό χαρακτηριστικό για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις αυτές. Τέλος, σημαντικό ρόλο στην κατασκευή αποδοτικών διατάξεων παίζει ο καλός έλεγχος της διεπιφάνειας μεταξύ δότη και δέκτη.

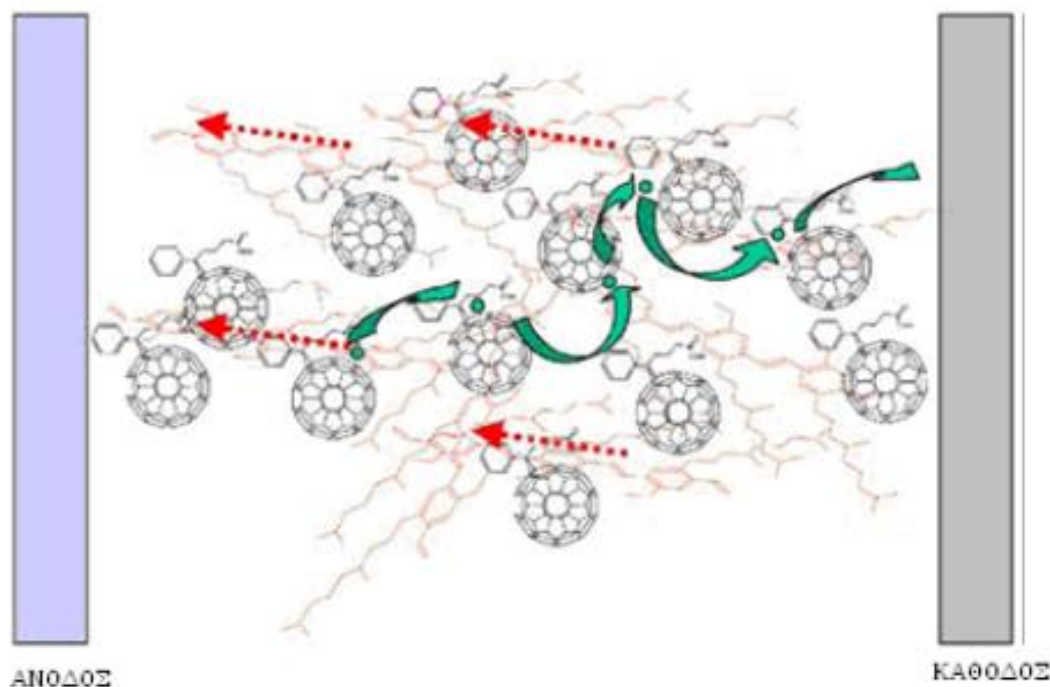


Σχήμα 7.3.2.1: Ενεργειακό διάγραμμα οργανικού φωτοβολταϊκού
 διστρωματικής διάταξης

7.3.3 Οργανικά Φωτοβολταϊκά Διάταξης Διεσπαρμένης Ετεροεπαφής (Bulk Heterojunction)

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

Προϋπόθεση ώστε να γίνει αυτό είναι η διαφορά στα δυναμικά των δύο υλικών του bulk heterojunction να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια σύζευξης του εξιτονίου ώστε αυτό να μπορεί να διασπαστεί. Ο διαχωρισμός του εξιτονίου γίνεται στις διεπιφάνειες των συζυγών πολυμερών και είναι πολύ πιο δύσκολος όταν υπάρχουν προσμίξεις (π.χ. οξυγόνο), όπου οι προσμίξεις ενεργούν ως παγίδες ηλεκτρονίων, στις διεπιφάνειες πολυμερούς / μετάλλου ή ανάμεσα στα υλικά με διαφορετική συγγένεια ηλεκτρονίων. Αυτά τα ελεύθερα πλέον φορτία έχουν τώρα μια σχετικά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής ώστε να μπορέσουν να φτάσουν στα ηλεκτρόδια όπου θα συλλέγουν και η πιθανότητα επανασύνδεσης είναι μικρότερη αλλά όχι μηδενική. Απαιτούμενο χαρακτηριστικό για ένα αποδοτικό ηλεκτρόδιο είναι η επιλεκτική συλλογή φορτίων, η δημιουργία δηλαδή μιας Ωμικής επαφής για το ένα φορτίο και ο ταυτόχρονος αποκλεισμός του άλλου.



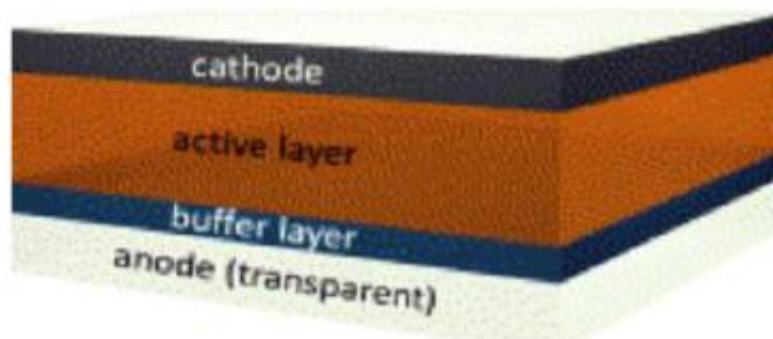
Σχήμα 7.3.3.1: Τυπική δομή οργανικού φωτοβολταϊκού διάταξης
διεσπαρμένης ετεροεπαφής (Bulk Heterojunction)

7.4 Τυπική Δομή Οργανικών Φωτοβολταϊκών (OPV)

Η τυπική δομή ενός οργανικού φωτοβολταϊκού περιέχει τα εξής "συστατικά":

- ⊙ **Ηλεκτρόδιο Καθόδου (Διαφανές):** Το ηλεκτρόδιο αυτό είναι το πρώτο στοιχείο που συναντά η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Είναι το στοιχείο που αφομοιώνει την ακτινοβολία και η περιοχή όπου συγκεντρώνονται οι δημιουργούμενες οπές (ζώνη σθένους).
- ⊙ **Οργανικό Στρώμα:** Είναι το ενδιάμεσο "στάδιο" μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων (ανόδου & καθόδου) και συνεπώς η περιοχή όπου συγκεντρώνονται τα δημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών (ενεργειακό διάκενο).

- ⊙ **Ηλεκτρόδιο Ανόδου:** Το ηλεκτρόδιο αυτό είναι η περιοχή όπου συγκεντρώνονται τα κινούμενα (μεταφερόμενα) ηλεκτρόνια (ζώνη αγωγιμότητας). Είναι μεταλλικό στοιχείο παραγόμενο συνήθως από χαλκό, αλουμίνιο κλπ.



Σχήμα 7.4.1: Σχηματική διάταξη δομής οργανικού φωτοβολταϊκού (OPV)

7.5 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Οργανικών Φωτοβολταϊκών (OPV)

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται λόγος για τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα που αφορούν στην τεχνολογία των οργανικών φωτοβολταϊκών (πολυμερή).

Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό κόστος παραγωγής & συντήρησης.
- Περιορισμένο βάρος.
- Είναι διαφανή και εύκαμπτα μηχανικά.
- Το ενεργειακό χάσμα ζωνών στα οργανικά υλικά μπορεί να 'ρυθμιστεί' χημικώς με την ενσωμάτωση διαφόρων λειτουργικών ομάδων.

- Εφαρμόζονται σε μεγάλο εύρος λειτουργιών.
- Αισθητά μειωμένο κόστος συγκριτικά με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά.
- Οικονομικά αλλά και κυρίως οικολογικά πλεονεκτήματα.
- Εξ' αιτίας της ευκαμψίας αλλά και της εύκολης προσαρμογής τους, δύναται να ενσωματωθούν σε επιφάνειες με μικρή σκληρότητα.

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

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

Μειονεκτήματα

- Μικρή μεταφορά (κινητικότητα) φορτίου.
- Η παρουσία οδηγούσας δύναμης για την διάσπαση του εξιτονίου.
- Περιορισμένος χρόνος ζωής (λιγότερο από 5 χρόνια), καθώς και περιορισμένη απόδοση συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνολογίες πυριτίου (περίπου 5%).
- Ευαισθησία στις περιβαλλοντικές συνθήκες (αέρας, υγρασία κλπ) και κατά συνέπεια λειτουργικές αστάθειες.

- Βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο (πανεπιστήμια, ιδρύματα ερευνών) αλλά δεν υπάρχει ακόμη σε παραγωγική διαδικασία.
- Μελλοντική πιθανότητα και προοπτική για μικρό κόστος κατασκευής αλλά και μαζικής παραγωγής.

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

7.6 Βελτιώσεις Οργανικών Φωτοβολταϊκών (OPV)

Με τη λειτουργία δύο στοιβαγμένων κυττάρων παράλληλα, τα επίπεδα αποδοτικότητας μπορούν να αυξηθούν περισσότερο. Το 2007, ο Alan Heeger και οι συνάδελφοι του, νικητές του βραβείου Νόμπελ, μαζί με τον Lee, έναν ερευνητή Νότιας Κορέας, παρουσίασαν ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο με την προσθήκη ενός διπλού στρώματος που απορροφά ένα ευρύτερο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας σε σύγκριση με τα μονού επιστρώματος ηλιακά κύτταρα και επιτυγχάνει μια αποδοτικότητα 6,5%. Ένα polymerfullerene σύνθετο και ένα πολυθειοφένιο σύνθετο ήταν τα κύρια οργανικά συστατικά. Ο Olle Inganäs στο Πανεπιστήμιο Linköping, δηλώνει ότι τα ανώτατα όρια για μια φωτοβολταϊκή κυψέλη με βάση P3HT αναμεμιγμένο με ένα παράγωγο fullerene θα μπορούσαν να είναι περίπου 9%. Ωστόσο υψηλότερες προσμείξεις μπορεί να απαιτήσουν τελικά πιο πολύπλοκες συσκευές. Το εντυπωσιακά λεπτό υλικό που μπορεί να επιτευχθεί από υμένιο OPV απεικονίζεται με ένα προϊόν της έρευνας του Ηνωμένου Βασιλείου. Οι επιστήμονες στο Cambridge University Cavendish Laboratory έχουν κατορθώσει να τοποθετήσουν δύο ημιαγώγιμα πολυμερή σε ένα υμένιο πάχους 100 νανόμετρα, σε σύγκριση με τα περίπου 200 μικρά από πυρίτιο, στα συμβατικά ηλιακά κύτταρα. Υποστηρίζουν ότι η τεχνολογία τους υπόσχεται αποδόσεις έως 5%. 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 κρίσιμο US \$ 1,00 ανά watt, όριο που απαιτείται για την ισοτιμία του δικτύου. (Πηγές του κλάδου δείχνουν ότι μπορεί να πάρει άλλη μια δεκαετία για το πυρίτιο να πέσει στο US \$ 1,00 / watt, από το σημερινό επίπεδο του US \$ 2.3/ watt). Η σκέψη είναι ότι το OPV θα μπορούσε να πάρει αυτή τη τιμή νωρίτερα. Σύμφωνα με

εκπρόσωπο της εταιρείας Plextronics, η τεχνολογία OPV υπόσχεται κόστος φωτοβολταϊκών τέσσερις ή πέντε φορές χαμηλότερο από αυτό των συστημάτων κρυσταλλικού πυριτίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ & ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ)

8.1 Εφαρμογές συμβατικών φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να βρουν αντικείμενο σε πληθώρα λειτουργιών καθώς και στην κάλυψη των καθημερινών αναγκών μας.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δύνανται να χρησιμοποιηθούν σε σπίτια (οικίες) ή ακόμη και σε κτήρια (βιομηχανικά/εμπορικά). Είναι εφικτό να τοποθετηθούν σε οροφές και στέγες σπιτιών για οικιακή χρήση εκμεταλλευόμενα την ηλιακή ακτινοβολία, αλλά και ως δομικά υλικά με την μορφή των πλαισίων σε τοίχους μειώνοντας αισθητά το κόστος τους. Επιπροσθέτως, τα κτήρια που δεν χρησιμοποιούνται για οικίες (εργοστάσια, καταστήματα κλπ) και τα οποία λειτουργούν κυρίως τις ώρες που υπάρχει διαθέσιμος ο ήλιος σε αφθονία μπορούν να παράξουν αρκετή ισχύ για την κάλυψη των αναγκών τους και να μειώσουν έτσι το κόστος αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος από τον πάροχο (δίκτυο).

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να δώσουν πνοή ακόμα και σε χώρες οι οποίες δεν έχουν τόσο ανεπτυγμένο ηλεκτρικό δίκτυο όπως και πρόσβαση σε αυτό. Αυτή η έλλειψη έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζουν μεγάλο κόστος οι υπόλοιπες προσφερόμενες πηγές ενέργειας. Συγκεκριμένα, σε περιοχές με μεγάλες εκτάσεις και υψηλή ηλιακή ακτινοβολία τα φωτοβολταϊκά μπορούν να παίξουν ζωτικό ρόλο στις ανάγκες του ανθρώπου όπως πχ. φωτισμό σε οδικά δίκτυα, ηλεκτροδότηση κατοικιών, άρδευση. Το σχέδιο του Ηνωμένου Βασιλείου με την ονομασία Power of the World και το οποίο προυποθέτει την άριστη συνεργασία αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών, έχει σκοπό να παρέχει 10 W για κάθε άτομο, σε απομακρυσμένα χωριά και σε περιοχές όπου δεν μπορούν να ικανοποιηθούν βασικές ανθρώπινες ανάγκες όπως φωτισμός, επιμόρφωση, επικοινωνία και υγεία.

Στις περισσότερες περιοχές των αναπτυγμένων χωρών, η πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι εύκολη και μπορεί να θεωρηθεί ως εφεδρική πηγή ενέργειας για τα φωτοβολταϊκά και άλλες ΑΠΕ. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, το ηλεκτρικό δίκτυο λειτουργεί ως ένας γιγαντιαίος συσσωρευτής. Η πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο και να διατεθεί σε άλλους καταναλωτές με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγωγή ηλεκτρισμού από τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Επίσης, σε περίπτωση που η παραγόμενη ενέργεια δεν επαρκεί, τότε προσφέρεται ενέργεια από το δίκτυο. Στα διασυνδεδεμένα συστήματα,

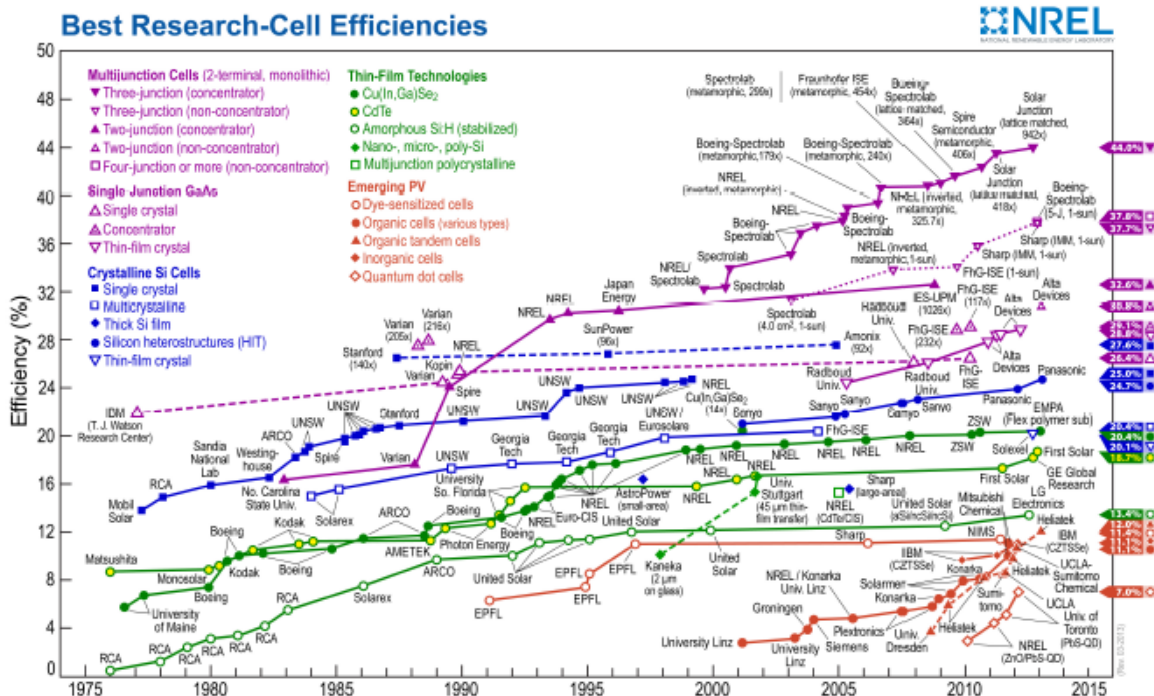
υπάρχει ένας μετατροπέας συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα σε τάση και συχνότητα αποδεκτή από το δίκτυο. Χρησιμοποιούνται επίσης μετρητές χρέωσης και πίστωσης για τον προσδιορισμό της ενέργειας που αγοράστηκε και πουλήθηκε στην εκάστοτε εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής.

8.2 Εφαρμογές οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων(OPV)

Οι εφαρμογές στις οποίες βρίσκουν αντικείμενο τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι συνώνυμες με αυτές των συμβατικών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για παράδειγμα, η χρήση φωτοβολταϊκών συστοιχιών τοποθετημένη στις στέγες και στις ταράτσες των σπιτιών για την κατανάλωση ενέργειας μέσω της αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας, η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών πάρκων σε περιοχές με μεγάλες ανεκμετάλλευτες εκτάσεις κυρίως στην επαρχία κλπ.

Όλες οι έρευνες που πραγματοποιούνται σε αυτόν τον τομέα έχουν ως κοινό σκοπό την ανάδειξη αυτών των στοιχείων μέσω της βελτίωσης των βιώσιμων χαρακτηριστικών τους τα οποία είναι το φθινό κόστος κατασκευής, η προσπάθεια για αύξηση του βαθμού απόδοσης τους καθώς και η ανάπτυξη του ορίζοντα εφαρμογών τους. Ως αποτέλεσμα αυτών θα έχουμε ραγδαία ανάπτυξη όσον αφορά τη χρήση τους στην κινητή τηλεφωνία, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στους τοίχους των σπιτιών μας και γενικότερα σε οποιαδήποτε συσκευή βρίσκεται στην ύπαιθρο, χρήζει ενέργειας και μπορεί να την μετατρέψει μέσω του ήλιου.

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



Σχήμα 8.2.1: Αποδοτικότητα όλων των ειδών φωτοβολταϊκών στοιχείων στο πέρασμα των χρόνων (1975-2011)

8.3 Οικονομικά Συμπεράσματα

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΦΙΑ

1. J.K. Kaldellis, M. Simotas, D. Zafirakis, E. Kondili, Optimum autonomous photovoltaic solutions for the Greek islands on the basis of energy pay-back analysis.
2. J.K. Kaldellis, D. Zafirakis, E. Kondili, Energy Pay-back period analysis of stand-alone photovoltaic systems.
3. J.K. Kaldellis, P. Koronakis, K. Kavadias, Energy balance analysis of a stand-alone photovoltaic system, including variable system reliability impact. Renewable energy.
4. J.K. Kaldellis, Optimum techno economic energy autonomous photovoltaic solution for remote consumers throughout Greece
5. Shell Solar, Product information sheet of Shell SQ75, photovoltaic solar module
http://www.oksolar.com/pdf/solar_energy-catalog/shell-sq75.pdf
6. “Ένας πρακτικός οδηγός για τα φωτοβολταϊκά” site :
http://www.arestipower.gr/xmsAssets/File/Pdf%20links/PV_Guide_Feb07_V1.pdf
7. Ι. Κωνσταντίνου, «Οργανικά Ηλεκτρονικά Υλικά για Φωτοβολταϊκές Εφαρμογές,» Λεμεσός, 2011.
8. C. J. Brabec, «www.sciencedirect.com,» 2004. [Ηλεκτρονικό]. Available:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702480400100X>.
9. Μ. Γαργανουράκης, «Ανάπτυξη Προηγμένων Transparent Conductive Oxides (TCOs) και Μελέτη των Διεπιφανειών τους με Οργανικούς Ημιαγωγούς και Εύκαμπτα Υποστρώματα,» Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2008.
10. S. Berkley, The Fabrication and Characterization of Organic Solar Cells, 2009.
11. G. Marsh, «www.sciencedirect.com,» July-August 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471084608701367>.
12. Γ. Βισκαδούρος, «Ανάπτυξη Καινοτόμων Οπτοηλεκτρονικών Διατάξεων Πολυμερούς-Νανοδομών για Εφαρμογές σε Οργανικά Φωτοβολταϊκά και Εκπομπή Πεδίου,» Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2011.
13. Ν. Παλιάτσας, «Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών,» Πάτρα, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.

14. Σ. Κουρελή, «Παρασκευή Υμενίων Αγώγιμων Πολυμερών μέσω Ηλεκτροπολυμερισμού για Εφαρμογή τους σε Φωτοβολταϊκά Κελιά,» Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
15. Π. Κουντουράκης, «Πλασμονικές Φωτοβολταϊκές Διατάξεις,» Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, 2012.
16. Π.-. Μ. Παπασάββα, «Σύγχρονες Ηλεκτρονικές Διατάξεις με Οργανικά Ημιαγώγιμα Υλικά,» Ηράκλειο, 2010.