



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Φωτοβολταϊκά συστήματα τρίτης γενιάς

Γιάννης Χατζόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος

ΑΘΗΝΑ 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Μανωλάκο Δημήτριο για την ανάθεση της εργασίας και την βοήθειά του.

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει τα φωτοβολταϊκά συστήματα τρίτης γενιάς, τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν για αντικατάσταση όχι μόνο για των ορυκτών καυσίμων, αλλά και των φωτοβολταϊκών συστημάτων πρώτης γενιάς βασιζόμενα στο πυρίτιο τα οποία αυτήν την στιγμή καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της αγοράς των φωτοβολταϊκών.

Κρίθηκε αναγκαίο να πραγματοποιηθεί μια εκτενής εισαγωγή στον τρόπο λειτουργίας και την εξέλιξη των φωτοβολταϊκών και των ημιαγωγών γενικότερα με έμφαση στα φωτοβολταϊκά πυριτίου.

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η ομαδοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ακολούθως στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια εισαγωγή στους ημιαγωγούς και τις βασικές αρχές τους. Στα επόμενα δύο κεφάλαια παρουσιάζονται οι βασικότερες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών τρίτης γενιάς. Τέλος παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα.

Abstract

The aim of this diploma thesis is to present third-generation photovoltaic systems, which can be used to replace not only fossil fuels but also the first generation silicon-based photovoltaic systems that currently occupy the largest part of the market photovoltaics.

It was considered necessary to carry out an extensive introduction to the operation and evolution of photovoltaic and semiconductors in general with an emphasis on silicon photovoltaics.

The introductory chapter of the paper presents the solar radiation, the photovoltaic phenomenon and the grouping of the photovoltaic systems. Subsequently, the third chapter gives an introduction to semiconductors and their basic principles. The next two chapters present the most important third generation photovoltaic technologies. Finally some conclusions are made.

Αφιερώνεται στην σύζυγο και στην κόρη μου

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	5
Περιεχόμενα.....	8
Κατάλογος Σχημάτων	10
1 Εισαγωγή.....	13
1.1 Σκοπός Εργασίας.....	13
1.2 Δομή Εργασίας.....	16
2 Εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά συστήματα.....	Error! Bookmark not defined.
2.1 Ηλιακή ακτινοβολία.....	13
2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και ιστορική αναδρομή... Error! Bookmark not defined.	
2.3 Ομαδοποίηση των φωτοβολταϊκών	21
3 Περί ημιαγωγών.....	24
3.1 Σχετικά με το πυρίτιο	25
3.2 Η ένωση pn σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος	26
3.3 Η ένωση pn σε κατάσταση ορθής και ανάστροφης πόλωση	28
3.4 Ενεργειακές ζώνες	29
3.5 Άμεση και έμμεση επανασύνδεση	31
3.6 Οπτική διέγερση δίοδου	31
3.7 Ενεργειακές ζώνες	29
3.8 Είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων	31
3.8.1 Φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Singlecrystalline Silicon, sc – Si)	38
3.8.2 Φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multicrystalline Silicon, mc – Si).....	39
3.8.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon).....	40
3.8.4 Φωτοβολταϊκά συστήματα ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon).....	41
3.8.5 Φωτοβολταϊκά συστήματα τρίτης γενιάς.....	44
4 Οργανικά φωτοβολταϊκά.....	47
4.1 Ημιαγώγιμα πολυμερή	47

4.2	Το φωτοχημικό φαινόμενο στους οργανικούς ημιαγωγούς.....	48
4.3	Υλικά οργανικών φωτοβολταϊκών.....	49
4.4	Διεργασίες κατασκευής οργανικών φωτοβολταϊκών	50
4.4.1	Επίστρωση εκ περιστροφής.....	50
4.4.2	Εναπόθεση οργανικών υλικών με Doctor Blending	51
4.4.3	Εναπόθεση οργανικών υλικών με εκτύπωση.....	52
4.5	Διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών	53
4.5.1	Μονοστρωματικές διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών	53
4.5.2	Διστρωματικές διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών.....	54
4.5.3	Διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών διεσπαρμένης ετεροεπαφής	55
4.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα οργανικών φωτοβολταϊκών διατάξεων	56
5	Νεότερα είδη Φωτοβολταϊκών τρίτης γενιάς.....	57
5.1	Φωτοευαίσθητα φωτοβολταϊκά υλικά (Dye sensitized solar cells - DSSC)	57
5.2	Δομή φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών υλικών	58
5.3	Αρχές λειτουργίας φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών υλικών.....	59
5.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών	59
5.5	Πρόσφατες εξελίξεις στα χρομοευαίσθητα φωτοβολταϊκά	60
5.6	Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά.....	31
5.7	Φωτοβολταϊκά στοιχεία με Κβαντικές Τελείες	61
6	Συμπεράσματα.....	62
	Βιβλιογραφία	63

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας (BP: Statistical Review of World Energy, Workbook (xlsx), London, 2016).....	14
Σχήμα 1-2. Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή για το 2014.....	14
Σχήμα 1-3. Φωτοβολταϊκά σε πρόσοψη κτιρίου (EMD performance materials).....	15
Σχήμα 2-1. Το χρωματικό φάσμα.....	18
Σχήμα 2-2. Το εύρος φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας.....	19
Σχήμα 2-3. Οι τιμές του αργού πετρελαίου ανά βαρέλι.....	20
Σχήμα 2-4. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η αρχή λειτουργίας των πολυστρωματικών φωτοβολταϊκών (Solar Junction).....	22
Σχήμα 2-5. Διάγραμμα κατάταξης κόστους και απόδοσης των τριών γενεών φωτοβολταϊκών (http://environmentalresearchweb.org/).....	23
Σχήμα 2-6. Διάγραμμα απεικόνισης της εξέλιξης των σημαντικότερων γενεών τεχνολογιών φωτοβολταϊκών (NREL).....	24
Σχήμα 3-1. Πυρίτιο και γερμάνιο.....	25
Σχήμα 3-2. Περιοχή απογύμνωσης ένωσης pn (Physics and Radio-Electronics).....	28
Σχήμα 3-3. Ένωση pn σε ορθή πόλωση (Daenotes).....	29
Σχήμα 3-4. Ένωση pn σε ανάστροφη πόλωση (Daenotes).....	29
Σχήμα 3-5. sp^3 υβριδισμένο άτομο πυριτίου (grandinetti).....	30
Σχήμα 3-6. Ανάλογα με την τιμή του εύρους ενεργειακού διακένου τα υλικά χωρίζονται σε μονωτές, ημιαγωγούς και μεταλλικούς αγωγούς (sch).....	31
Σχήμα 3-7. Σχηματική παράσταση οπτικά διεγερόμενου ημιαγωγού όπου τα φωτόνια προσπίπτουν από την πλευρά τύπου – p. Δέρβος et al.....	34
Σχήμα 3-8. Ισοδύναμο κύκλωμα οπτικά διεγερόμενου ημιαγωγού.....	36
Σχήμα 3-9. Πλάγια τομή φωτοβολταϊκής κυψέλης.....	37
Σχήμα 3-10. Συνδεσμολογίες φωτοβολταϊκών κυψελών (Τετελένης).....	38
Σχήμα 3-11. Φωτοβολταϊκή κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	39
Σχήμα 3-12. Ράβδος μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	40
Σχήμα 3-13. Φωτοβολταϊκή κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	40
Σχήμα 3-14. Μπάρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	41
Σχήμα 3-15. Φωτοβολταϊκό σύστημα ταινίας πυριτίου.....	41
Σχήμα 3-16. Φωτοβολταϊκό σύστημα λεπτού υμενίου άμορφου πυριτίου.....	42
Σχήμα 3-17. Φωτοβολταϊκές κυψέλες τελλουριούχου κάδμιου.....	43

Σχήμα 3-18. Φωτοβολταϊκές κυψέλες αρσενικούχου γάλλιου.....	43
Σχήμα 3-19. Φωτοβολταϊκές κυψέλες Δισεληνοϊνδιούχου Χαλκού με πρόσμιξη Γαλλίου (CIGS).....	44
Σχήμα 3-20. Ορυκτό περοβσκίτη.....	45
Σχήμα 3-21. Οργανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	46
Σχήμα 3-22. Φωτοευαίσθητο (χρωμοευαίσθητοποιημένο) φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	47
Σχήμα 4-1 Παράδειγμα π - δεσμού και σ – δεσμού.....	49
Σχήμα 4-2 Σχηματική παράσταση εφαρμογής του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε οργανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	50
Σχήμα 4-3 Διαδικασία επίστρωσης εκ περιστροφής.....	52
Σχήμα 4-4 Διαδικασία εναπόθεσης με doctor blading.....	52
Σχήμα 4-5 Διαδικασία εναπόθεσης μέσω εκτύπωσης.....	53
Σχήμα 4-6 Σχηματικό διάγραμμα δομής και λειτουργικό διάγραμμα διάταξης μονοστρωματικού οργανικού φωτοβολταϊκού.....	54
Σχήμα 4-7 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας διάταξης διστρωματικού οργανικού φωτοβολταϊκού.....	55
Σχήμα 4-8 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας διάταξης διεσπαρμένης ετεροεπαφής οργανικού φωτοβολταϊκού.....	57
Σχήμα 5-1 Σχηματικό διάγραμμα κατασκευής διάταξης φωτοευαίσθητου φωτοβολταϊκού.....	58
Σχήμα 5-2 Διάγραμμα κατασκευής διάταξης φωτοευαίσθητου φωτοβολταϊκού.....	59
Σχήμα 5-3 Φωτοβολταϊκό στοιχείο κβαντικών τελείων.....	62

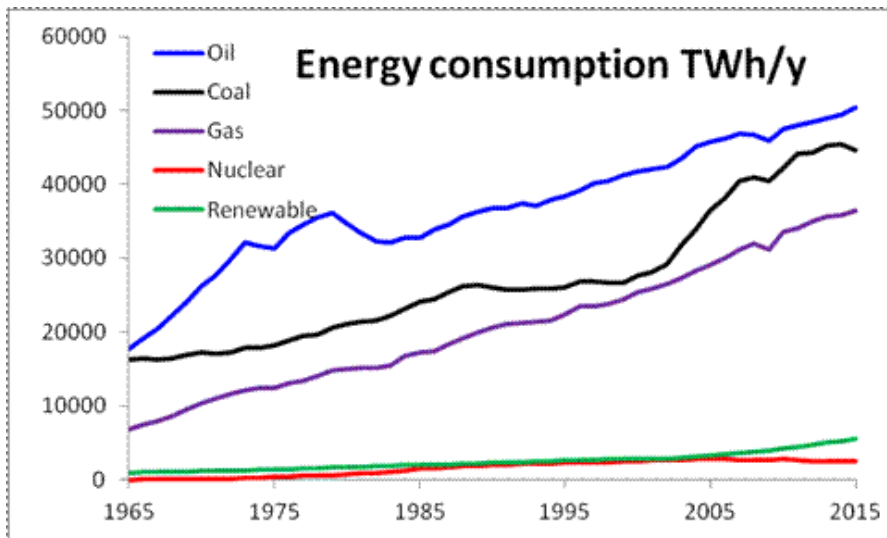
1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Οι δραστηριότητες της ανθρωπότητας τους τελευταίους δύο αιώνες έχουν οδηγήσει σε κάθετη αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων. Η κλιμάκωση των ενεργειακών απαιτήσεων προήλθε από την δημιουργία νέων αναγκών καθώς και λόγω της αύξησης του πληθυσμού του πλανήτη. Αρχικά ο άνθρωπος κάλυψε τις ανάγκες του με ορυκτά καύσιμα όπως τα διάφορα είδη γαιανθράκων και στη συνέχεια το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η αύξηση του πληθυσμού της γης και η παράλληλη αύξηση των υλικών και ενεργειακών απαιτήσεων του ανθρώπου έχει οδηγήσει στην κατασπατάληση των πρώτων υλών του πλανήτη καθώς και στην εκτεταμένη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Για την αντιμετώπιση της εξάντλησης των παραδοσιακών πηγών ενέργειας, την κάλυψη των αυξημένων μελλοντικών αναγκών ενέργειας καθώς και την αναστροφή των αποτελεσμάτων της οικολογικής καταστροφής η ανθρωπότητα στρέφεται σε νέες μορφές παραγωγής ενέργειας, οι μορφές αυτές ονομάζονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.).

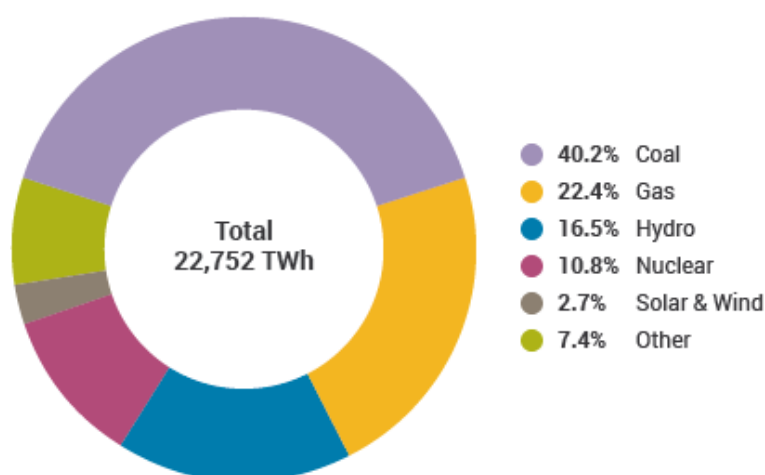
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υπάγονται σε ένα πλαίσιο αειφόρου και βιώσιμης ανθρώπινης ανάπτυξης το οποίο προβλέπει ότι λαμβάνεται υπόψη η προστασία του περιβάλλοντος κατά τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Βασικός κανόνας της αειφορίας και βιωσιμότητας είναι η μέγιστη δυνατή παραγωγή αγαθών και ενέργειας από το περιβάλλον, χωρίς όμως να εξαντλείται η φυσική ανανέωση των πρώτων υλών. Η βιωσιμότητα υπονοεί ότι οι φυσικοί πόροι καταναλώνονται με μικρότερο ρυθμό από αυτόν με τον οποίον παράγονται, σε αντίθετη περίπτωση πραγματοποιείται υποβάθμιση και καταστροφή του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1-1. Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας (BP: Statistical Review of World Energy, Workbook (xlsx), London, 2016).

Σε παγκόσμιο επίπεδο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές ξεπερνάει το 70%. Η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα κυρίως λόγω του χαμηλού ρυθμού μετάβασης από τις παραδοσιακές μορφές παραγωγής ενέργειας σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η καθυστέρηση αλλαγής των μέσων παραγωγής ενέργειας οφείλεται σε μεγάλο βαθμό και στο υψηλό κόστος που παρουσιάζουν τα συστήματα παραγωγής Α.Π.Ε. . Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, η επίτευξη οικονομικών κλίμακας και η αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των

World Electricity Production 2012



Source: IEA Electricity Information 2014

Σχήμα 1-2. Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή για το 2014.

πολιτών αναμένονται να προσδώσουν περαιτέρω ώθηση στην αύξηση της χρήσης συστημάτων Α.Π.Ε. .

Παρόλο το σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης συστημάτων Α.Π.Ε. οι πρωταρχικές πηγές ενέργειάς τους είναι ανεξάντλητες, αφού αποτελούνται από διάφορα στοιχεία της φύσης όπως: η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, τα κύματα κ.τ.λ. . Χαρακτηριστικά η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην γη μέσα σε μία ώρα είναι περισσότερη από όλη την ενέργεια που καταναλώνει ο πλανήτης κατά την διάρκεια ενός έτους.

Τα συστήματα παραγωγής Α.Π.Ε. διαχωρίζονται ανάλογα με την πηγή τους σε διάφορες κατηγορίες:

- Φωτοβολταϊκά
- Αιολικά
- Υδροηλεκτρικά
- Βιοαέριου
- Γεννήτριες παραγωγής ενέργειας από κύματα

Τα παραπάνω συστήματα διαχωρίζονται σε διάφορες υποκατηγορίες π.χ. αιολικά της στεριάς ή της θάλασσας, μικρά υδροηλεκτρικά κ.τ.λ.. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς και διαχωρίζονται σε αρκετά είδη, ορισμένα από αυτά είναι: μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου, άμορφου πυριτίου, thin film (λεπτών υμενίων), ribbon silicon (ταινίας) , φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών στρωμάτων (δισεληνοϊδούχου χαλκού, τελουριούχου κάδμιου, αρσενικούχου γάλλιου καθώς και τα οργανικά φωτοβολταϊκά.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μας απασχολούν τα οργανικά φωτοβολταϊκά.



Σχήμα 1-3. Φωτοβολταϊκά σε πρόσοψη κτιρίου (EMD performance materials)

1.2 Δομή Εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει πέντε κεφάλαια, το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά η ισχύουσα κατάσταση στο χώρο της ενέργειας και παρατίθεται ένα περίγραμμα της διπλωματικής εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή σε βασικές έννοιες (ηλιακή ακτινοβολία, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Πραγματοποιείται μια ιστορική αναδρομή των φωτοβολταϊκών συστημάτων και των διάφορων τεχνολογιών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της δομής των ημιαγωγών, παρουσίαση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου καθώς και παρουσίαση των φωτοβολταϊκών πρώτης και δεύτερης γενιάς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς και ειδικότερα τα οργανικά φωτοβιταϊκά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φωτοευαίσθητα φωτοβολταϊκά, καθώς και κάποιες νέες τεχνολογίες.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2

Εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά συστήματα

2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης αποτελεί μία από τις βασικότερες πηγές ενέργειας του πλανήτη, παρέχει ενέργεια σε όλα τα όντα και φυτά . Αρχικά η ηλιακή ακτινοβολία θεωρήθηκε ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αυτή η θεώρηση δεν επεξηγούσε το σύνολο των παρατηρούμενων φαινομένων. Η εξέλιξη της επιστήμης της κβαντομηχανικής οδήγησε στην ανακάλυψη του φωτονίου και στην επεξήγηση της κυματικής και σωματιδιακής του φύσης. Τα φωτόνια αποτελούν «πακέτα ενέργειας» με κυματικό και χωρικό προσδιορισμό. Τα φωτόνια χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος, την συχνότητά και την ενέργειά τους ως εξής:

$$c = f \cdot \lambda$$

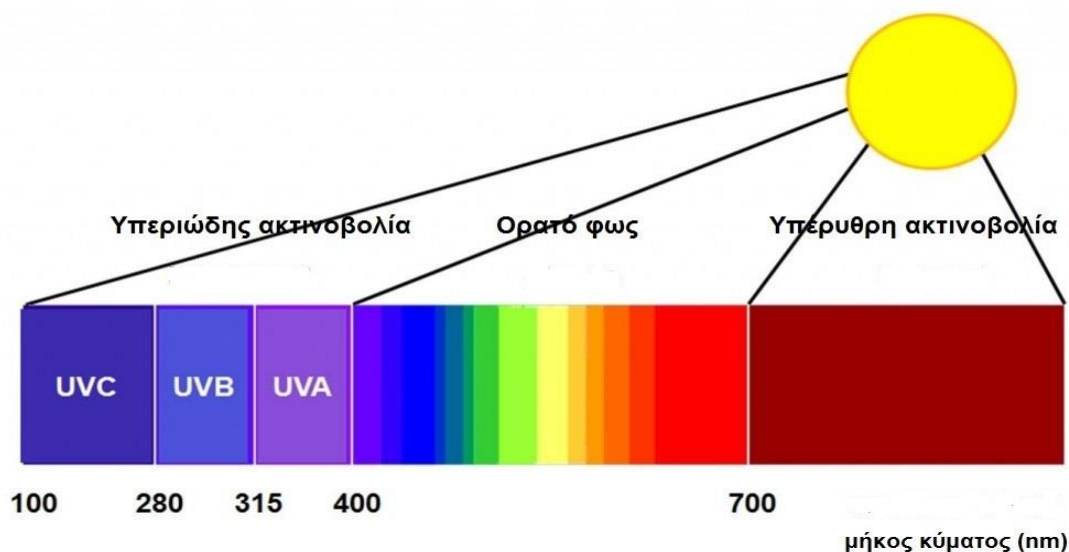
όπου c η ταχύτητα του φωτός, f η συχνότητα και λ το μήκος κύματος

Η ενέργεια ενός φωτονίου προκύπτει από την εξής σχέση:

$$E = h \cdot f$$

όπου h η σταθερά του Planck ($4.14 \cdot 10^{-15}$ eV·s)

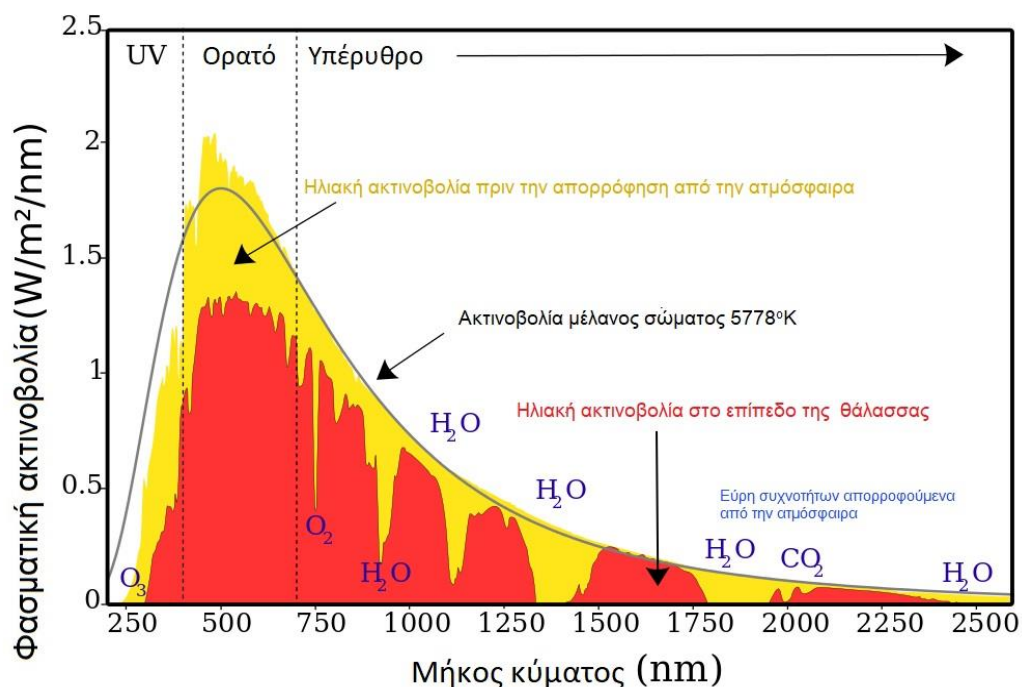
Η πυκνότητα ισχύος (ένταση φωτισμού) της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης ανέρχεται στα 1367 kW/m^2 , η ενέργεια αυτή θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε δέσμη ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στο εξωτερικό της γήινης ατμόσφαιρας και θεωρείται ως η ηλιακή σταθερά. Το σύνολο των φωτονίων με διαφορετικά επίπεδα ενέργειας διατεταγμένο ως προς την ενέργεια ονομάζεται ηλιακό φάσμα. Τα φωτόνια διαφορετικών χρωμάτων διαθέτουν διαφορετικά επίπεδα ενέργειας.



Σχήμα 2-1. Το χρωματικό φάσμα

Η ηλιακή ακτινοβολία εκπέμπεται από την φωτόσφαιρα του ηλίου, όπου η θερμοκρασία ανέρχεται στους 6000°K και η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας συγκλίνει με αυτήν του μέλανος σώματος στην αντίστοιχη θερμοκρασία. Διαπερνώντας την γήινη ατμόσφαιρα η πυκνότητα της φωτεινής ισχύος εξασθενεί και μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται απορρόφηση. Όταν ένα φωτόνιο προσπίπτει σε ένα υλικό και απορροφάται τότε μπορεί να ακολουθήσει εκπομπή ενός άλλου φωτονίου χαμηλότερης ενέργειας, από το υλικό. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διασπορά. Ένα ακόμη φαινόμενο που λαμβάνει χώρα κατά την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα από την γήινη ατμόσφαιρα είναι αυτό της σκέδασης. Κατά τη σκέδαση η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μερική ανάκλαση στα όρια κάθε υλικού που διαπερνά. Ο βαθμός σκέδασης εξαρτάται από την πυκνότητα των υλικών αλλά και από την ενέργεια (συχνότητα) των φωτονίων. Η ηλιακή ακτινοβολία που διαπερνά τη γήινη ατμόσφαιρα απορροφάται από μόρια αερίων και αιωρούμενα σωματίδια. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνει χώρα στα στρώματα της ατμόσφαιρας έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλεται το εύρος φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας (η κόκκινη περιοχή στο σχήμα 2-7).

Ηλιακό φάσμα



Σχήμα 2-2. Το εύρος φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας

Στο σχήμα 2-7 παρατηρούμε ότι μόνο ένα μικρό κλάσμα του ηλιακού φάσματος είναι ορατό και ότι πάνω από το 50% του εύρους φάσματος βρίσκεται στο υπέρυθρο φάσμα. Πρέπει να αναφερθεί ότι η ολική ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης αποτελείται από την συνισταμένη των συνιστωσών της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας. Η άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας προέρχεται με απευθείας από τον ήλιο και η έμμεση δεν διαθέτει συγκεκριμένη κατεύθυνση, αφού σκεδάζεται από την ατμόσφαιρα. Από το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας μόνο το 51% απορροφάται από το έδαφος, το 19% απορροφάται από την ατμόσφαιρα και το 30% ανακλάται.

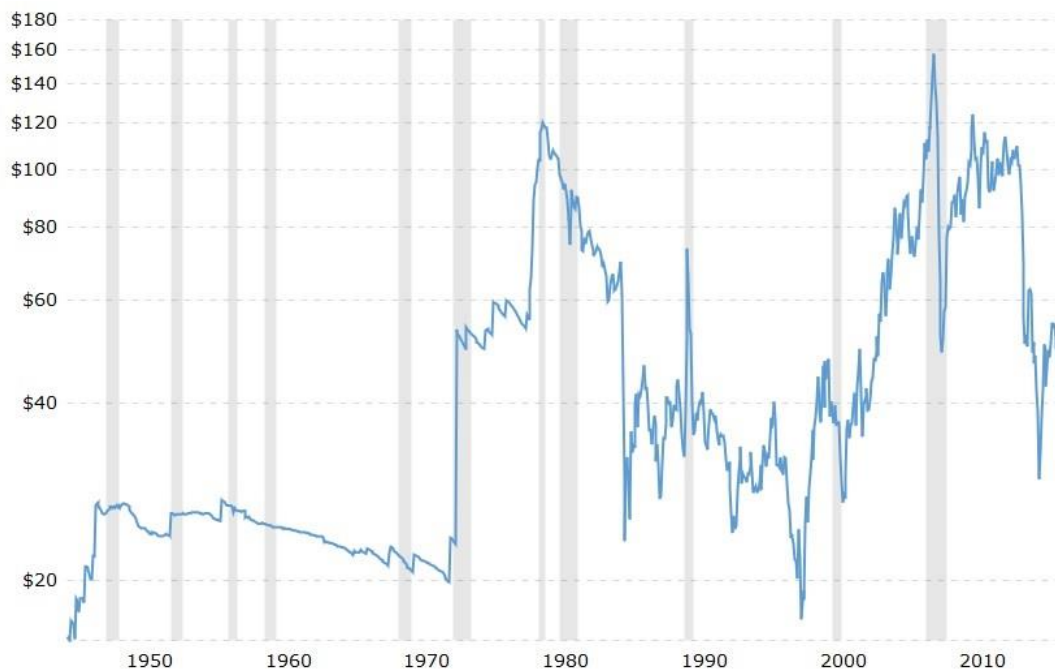
2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και ιστορική αναδρομή

Πρώτος ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο το 1839. Όπου παρατήρησε, ότι όταν η συσκευή που κατασκεύασε από ηλεκτρόδια πλατίνας και ηλεκτρολύτη, φωτιζόταν, τότε εμφανιζόταν μεταβολή της τάσης στα άκρα των ηλεκτροδίων. Κατά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο τα φωτόνια που απορροφούνται προκαλούν την διέγερση ηλεκτρονίων. Μερικές δεκαετίες αργότερα το 1871 οι W. Adams και R. Day παρατήρησαν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε συσκευή που περιλάμβανε ποσότητα σεληνίου ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια. Το 1883 ο C. Fritts εφηύρε το πρώτο

μεγάλου μεγέθους φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχοντας ως βάση το σελήνιο, με απόδοση μόλις 1% και υψηλό κόστος κατασκευής. Τελικά στα τέλη της δεκαετίας του 40 και τις αρχές της δεκαετίας του 50 τα εργαστήρια Bell προχώρησαν σε έρευνα, εφευρέσεις και κατασκευές εξαρτημάτων ημιαγωγών όπως το transistor και τα πρώτα υψηλής απόδοσης φωτοβολταϊκά (απόδοση 5 ~ 6%). Για πρώτη φορά το 1958 χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά στοιχεία, με επιτυχία, στον αμερικανικό διαστημικό δορυφόρο Vanguard 1. Από την πρώτη χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων το 1958 και ύστερα, η πλειονότητα των διαστημικών οχημάτων και δορυφόρων είναι εξοπλισμένα με φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Στο παρελθόν, ταυτόχρονα με την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών με βάση το πυρίτιο αναπτύχθηκαν φωτοβολταϊκά συστήματα με βάση άλλα στοιχεία, όπως το Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe), το Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs) και το Φωσφίδιο του Ινδίου (InP), όμως η τοξικότητα του καδμίου, η υψηλή τιμή των φωτοβολταϊκών Αρσενικούχου Γάλλιου και η περιορισμένη χρήση του Ινδίου ανέδειξαν τα φωτοβολταϊκά πυριτίου ως μία από τις ιδανικότερες λύσεις για ευρεία χρήση.

Οι ενεργειακές κρίσεις που ακολούθησαν την δεκαετία του 1970 και η κατακόρυφη αύξηση των τιμών του πετρελαίου προσέδωσαν νέα ώθηση στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.



Σχήμα 2-3. Οι τιμές του αργού πετρελαίου ανά βαρέλι

Την περίοδο της δεκαετίας του 1970 και 1980 αναπτύχθηκαν τεχνολογίες που επέτρεψαν αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών με βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων και των διεργασιών παρασκευής. Αυτήν την περίοδο πραγματοποιήθηκαν έρευνες στις ιδιότητες της περιοχής απογύμνωσης των ημιαγωγών και τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά κύτταρα.

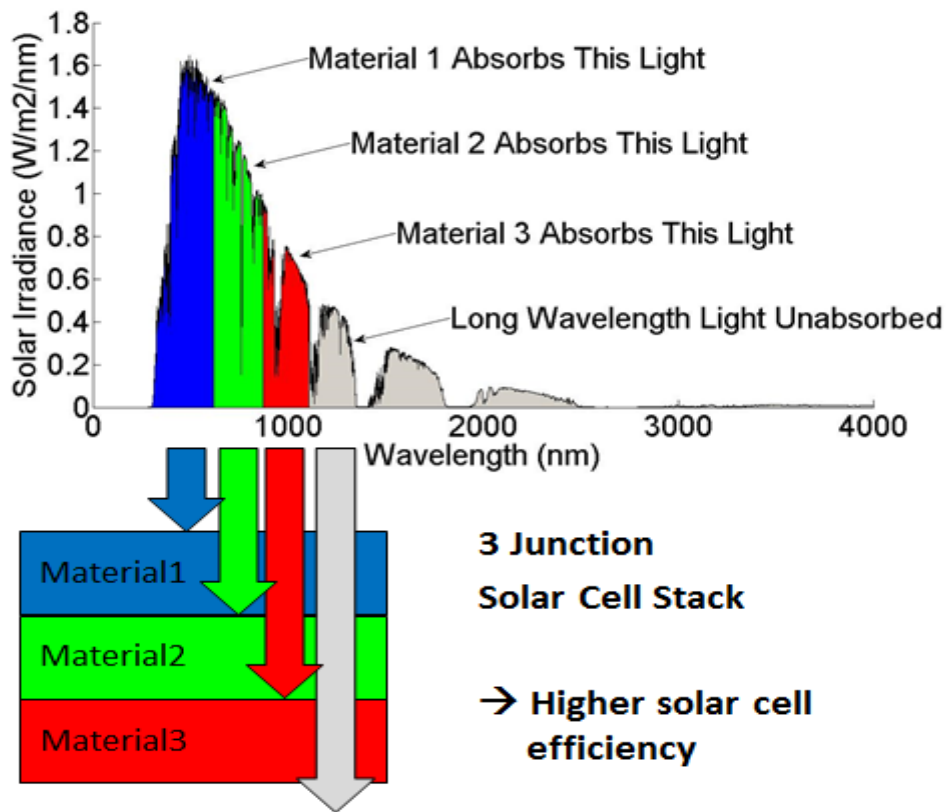
Το 1988 εφευρέθηκαν τα χρωμοευσθητοποιημένα φωτοβολταϊκά από τους M. Gratzel και B. O'Regan. Τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά περιέχουν μια οργανική βαφή και παρουσιάζουν αρκετά χαμηλότερο κόστος από ότι τα φωτοβολταϊκά με βάση το πυρίτιο.

Κατά τις δεκαετίες του 1990 και 2000 το παγκόσμιο ενδιαφέρον απάνω στα φωτοβολταϊκά αυξήθηκε κατακόρυφα λόγω των περιβαλλοντικών θεμάτων που σχετίζονται με υπερθέρμανση του πλανήτη και την απορρύθμιση της αγοράς ενέργειας, έτσι η παγκόσμια κοινότητα ξεκίνησε να αναζητά την μετάβαση προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Το έτος 2000 οι ερευνητές MacDiarmid, Heeger και Shirikawa κέρδισαν το βραβείο Nobel για την ανακάλυψη ενός πολυακετυλενίου νοθευμένου με άτομα βρωμίου το οποίο αποτέλεσε τη βάση για την κατασκευή οργανικών ημιαγωγών.

Το έτος 2013 η εταιρία Spectrolab, θυγατρική της Boeing στον τομέα αεροδιαστημικών εφαρμογών, κατασκεύασε πολυστρωματική φωτοβολταϊκή κυψέλη απόδοσης 38,8% υπό συνθήκες AM0

Λίγο αργότερα η εταιρία Solar Junction σε συνεργασία με το National Renewable Energy Laboratory ανακοίνωσε την κατασκευή πολυστρωματικού φωτοβολταϊκού με βαθμό απόδοσης 42% υπό συνθήκες AM0 (Air Mass 0, δηλαδή χωρίς η ηλιακή ακτινοβολία να έχει διαπεράσει την γήινη ατμόσφαιρα). Οι νέες φωτοβολταϊκές κυψέλες βασίζονται πάνω σε τρία στρώματα ημιαγώγιμων υλικών που συλλαμβάνουν διαφορετικό μήκος κύματος του ηλιακού φωτός το καθένα και συνδυάζονται με συγκεντρωτικά κάτοπτρα τα οποία αυξάνουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 2-4. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η αρχή λειτουργίας των πολυστρωματικών φωτοβολταϊκών (Solar Junction).

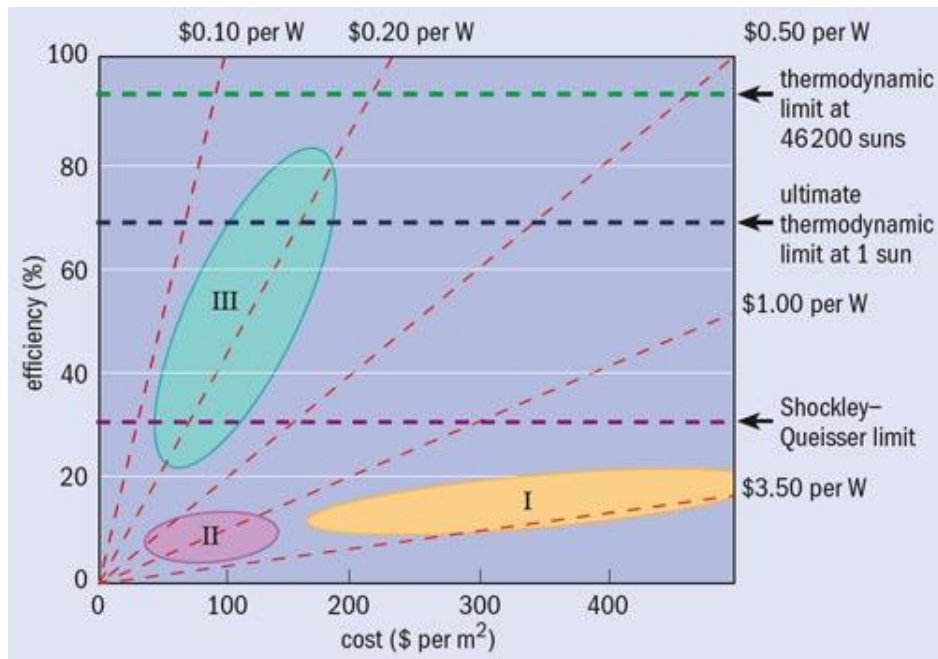
2.3 Ομαδοποίηση των φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά την πορεία της ανάπτυξής τους έχουν ομαδοποιηθεί σε τρεις γενιές.

Στα συστήματα πρώτης γενιάς εντάσσονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με βάση τα wafer πυριτίου (πολυκρυσταλλικά και μονοκρυσταλλικά) τα οποία εμφανίζουν ευρεία χρήση με απόδοση περίπου 15%. Τα συστήματα αυτής της γενιάς απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την κατασκευή τους, επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι η τελική του μορφή είναι άκαμπτη.

Τα συστήματα δεύτερης γενιάς έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής και στην τελική τους μορφή παρουσιάζουν κάποια ελαστικότητα. Η απόδοση των συστημάτων δεύτερης γενιάς κυμαίνεται από 10% έως 15% και σε αυτήν περιλαμβάνονται φωτοβολταϊκά συστήματα από άμορφο πυρίτιο, Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe) και Δισεληνοϊδούχο Χαλκό (copper indium gallium selenide - CIGS solar cell). Βασικό μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεύτερης γενιάς αποτελεί το υψηλό ποσό ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή τους, η οποία περιλαμβάνει τεχνικές εναπόθεσης υψηλών

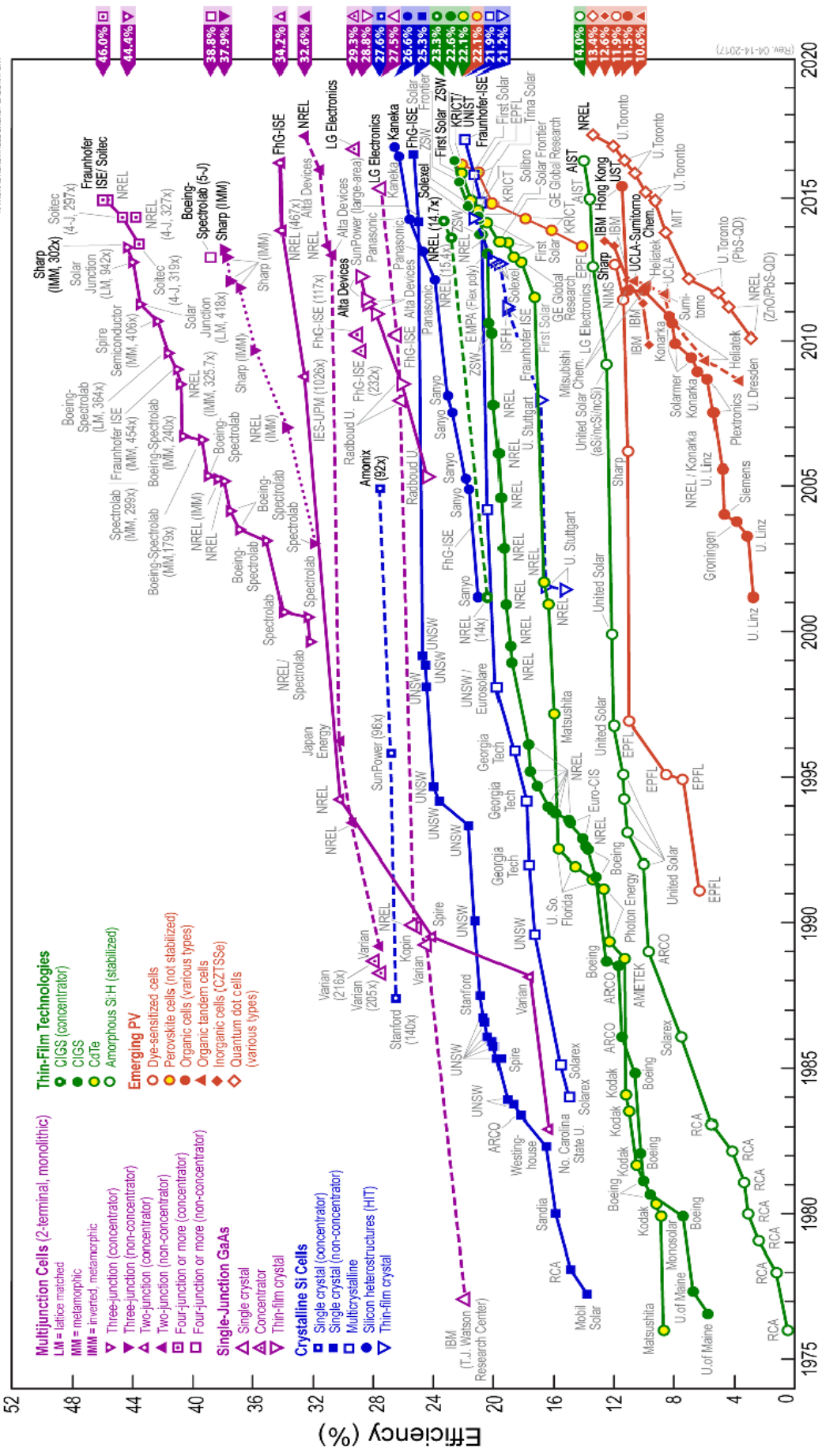
θερμοκρασιών. Πλέον αναπτύσσονται τεχνικές εναπόθεσης χαμηλών θερμοκρασιών, ώστε να αντιμετωπισθεί το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της γενιάς.



Σχήμα 2-5. Διάγραμμα κατάταξης κόστους και απόδοσης των τριών γενεών φωτοβολταϊκών (<http://environmentalresearchweb.org/>)

Τέλος στα συστήματα τρίτης γενιάς γίνεται χρήση οργανικών υλών όπως πολυμερή ή διάφορα οργανικά μόρια. Πολλά από τα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς χρησιμοποιούν ήδη γνωστά υλικά χαμηλού κόστους, παραδείγματος χάριν τα πολυμερή φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να κατασκευαστούν με διεργασίες παρόμοιες με αυτές της εκτύπωσης μιας εφημερίδας. Τα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς διαθέτουν ακόμα μεγάλα περιθώρια ανάπτυξης και συνεχώς εφευρίσκονται νέες τεχνολογίες (π.χ. φωτοβολταϊκά περοβσκήτη) με το κόστος ανά παραγόμενο Watt να συμπιέζεται διαρκώς.

Best Research-Cell Efficiencies



Σχήμα 2-6. Διάγραμμα απεικόνισης της εξέλιξης των σημαντικότερων γενεών τεχνολογιών φωτοβολταϊκών (NREL)

Κεφάλαιο 3

Περί ημιαγωγών

Οι εξέλιξη των επιστημών και ιδιαίτερα της φυσικής και της χημείας οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων υλικών. Μία κατηγορία υλικών που σχετίζεται με την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής είναι οι ημιαγωγοί. Στους ημιαγωγούς εντάσσονται το γερμάνιο, το πυρίτιο, το αρσενικόχο γάλλιο κ.α. Η σημασία των ημιαγωγών είναι μεγάλη διότι από ημιαγωγούς (πολυκρυσταλλικό πυρίτιο) κατασκευάζεται το μεγαλύτερο μέρος των φωτοβολταϊκών.

Στη συνέχεια, για την επεξήγηση της λειτουργίας των ημιαγωγών παρουσιάζεται η περίπτωση του πυριτίου και ειδικότερα της ένωσης sp^3 . Το πυρίτιο χρησιμοποιείται κατά κόρον στην κατασκευή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων όπως οι δίοδοι, τα τρανζίστορ, οι τελεστικοί ενισχυτές, οι επεξεργαστές αλλά και τα φωτοβολταϊκά.



Σχήμα 3-1. Πυρίτιο και γερμάνιο

3.1 Σχετικά με το πυρίτιο

Ο κρύσταλλος του καθαρού (μη νοθευμένου) πυριτίου διαθέτει τετραεδρική δομή. Αναλυτικότερα τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας σχηματίζουν τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς με ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων. Σε χαμηλές θερμοκρασίες οι ομοιοπολικοί δεσμοί δεν διασπώνται, με αποτέλεσμα να μην παρατηρούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια που θα επέτρεπαν τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Υπό κανονικές συνθήκες παρουσιάζεται το φαινόμενο της διάσπασης κάποιων δεσμών λόγω θερμικού ιονισμού με αποτέλεσμα την απελευθέρωση κάποιων ηλεκτρονίων. Κατά την διάσπαση των δεσμών και την απελευθέρωση ηλεκτρονίων το άτομο πυριτίου παρουσιάζει θετικό φορτίο, ίσο προς τα ηλεκτρόνια που αποχώρησαν από το άτομο, σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούνται οπές στην κρυσταλλική δομή. Λόγω του θετικού ατομικού φορτίου του πυριτίου γίνεται εφικτή η έλξη ηλεκτρονίων άλλων ατόμων ώστε να καλυφθούν οι κενές θέσεις των οπών. Η διαδικασία της μετακίνησης οπών και ηλεκτρονίων, λόγω θερμικού ιονισμού, στο εσωτερικό της κρυσταλλικής δομής του πυριτίου ονομάζεται επανασύνδεση και έχει σαν αποτέλεσμα την εξαφάνιση των ελεύθερων φορτίων. Εάν η συγκέντρωση κάποιου φορτίου (π.χ. των ηλεκτρονίων) είναι υψηλότερη σε κάποια περιοχή του πυριτίου σε σχέση με κάποια άλλη, τότε παρατηρείται διάχυση φορέων φορτίου από την περιοχή υψηλότερης συγκέντρωσης προς την περιοχή χαμηλότερης συγκέντρωσης, η διαδικασία αυτή καλείται διάχυση. Η ροή φορέων φορτίου κατά την διάχυση καλείται ρεύμα διάχυσης (diffusion current). Εάν εφαρμοσθεί ηλεκτρικό πεδίο κατά πλάτος ενός τμήματος πυριτίου οι φορείς ηλεκτρικού φορτίου (ηλεκτρόνια και οπές) επιταχύνονται εξ αιτίας του ηλεκτρικού πεδίου και αποκτούν μια συνιστώσα ταχύτητας που υπερτίθεται στη ταχύτητα λόγω θερμικού ιονισμού και καλείται ταχύτητα ολίσθησης. Οι συνιστώσες ρεύματος οπών και ηλεκτρονίων καλούνται ρεύματα ολίσθησης.

Η εισαγωγή ατόμων πρόσμιξης με διαφορετικό αριθμό σθένους από αυτόν του πυριτίου οδηγεί στην νόθευση της κρυσταλλικής δομής. Η εισαγωγή ατόμων πεντασθενών στοιχείων - δότες (π.χ. φώσφορος) έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πυριτίου τύπου-n διότι από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους των εισαγόμενων ατόμων φωσφόρου τα τέσσερα σχηματίζουν δεσμούς με τα ηλεκτρόνια σθένους γειτονικών ατόμων πυριτίου, ενώ το ένα παραμένει ελεύθερο και διατίθεται στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Για την κατασκευή πυριτίου τύπου-p γίνεται πρόσμιξη με στοιχεία τρισθενών ατόμων - αποδέκτες (π.χ. βόριο). Κάθε άτομο προσμίξεως δέχεται ηλεκτρόνια και δημιουργεί ομοιοπολικούς δεσμούς με τα άτομα πυριτίου. Επειδή τα άτομα προσμίξεως διαθέτουν τρία ηλεκτρόνια σθένους και τα άτομα πυριτίου διαθέτουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους,

παραμένει μια σπή στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου λόγω της απουσίας του τέταρτου ηλεκτρονίου από την εξωτερική στοιβάδα του ατόμου προσμίξεως.

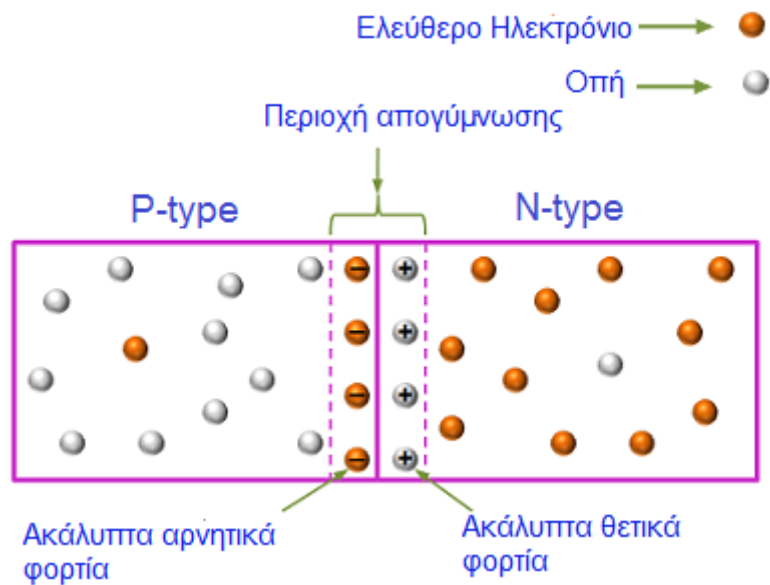
3.2 Η ένωση pn σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος

Σε αρκετές διατάξεις ημιαγωγών χρησιμοποιούνται ενώσεις πυριτίου τύπου - p και τύπου - n (ενώσεις pn). Στις περιοχές τύπου - p η συγκέντρωση των σπών είναι υψηλή και χαμηλή στις περιοχές τύπου - n. Οι σπές διαχέονται από τις περιοχές τύπου - p προς τις περιοχές τύπου - n, μέσω της επαφής της ένωσης pn. Αντιστοίχως τα ηλεκτρόνια διαχέονται από την περιοχή τύπου - n προς την περιοχή τύπου - p. Από τα ανωτέρω παρατηρούμε την ύπαρξη δύο συνιστωσών ρευμάτων, του ρεύματος διάχυσης σπών και του ρεύματος διάχυσης ηλεκτρονίων. Από την άθροιση των δύο ρευμάτων προκύπτει το ρεύμα διάχυσης, το οποίο έχει φορά από την πλευρά τύπου - p προς την πλευρά τύπου - n.

Το θετικό φορτίο των σπών που διαχέονται, μέσω της επαφής της ένωσης pn, στην περιοχή τύπου - n εξαλείφεται από κάποια ηλεκτρόνια πλειονότητας, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξουδετέρωση κάποιων αρνητικών φορτίων της περιοχής τύπου - n. Κατα συνέπεια κάποια από τα θετικά δεσμευμένα φορτία παύουν να εξουδετερώνονται από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και χαρακτηρίζονται ως ακάλυπτα, το φαινόμενο λαμβάνει χώρα τοπικά στην περιοχή της ένωσης, όπου παρατηρείται απογύμνωση από ελεύθερα ηλεκτρόνια.

Αντίστοιχα στην περιοχή τύπου - p το φορτίο των ηλεκτρονίων που διαχέονται, μέσω της επαφής της ένωσης pn, στην περιοχή τύπου - p εξουδετερώνεται από κάποιες σπές πλειονότητας, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξουδετέρωση ορισμένων σπών πλειονότητας. Συνεπώς κάποια δεσμευμένα αρνητικά φορτία παύουν να εξουδετερώνονται και χαρακτηρίζονται ως ακάλυπτα, το φαινόμενο λαμβάνει χώρα εντός της περιοχής τύπου - p στην περιοχή της ένωσης και παρατηρείται απογύμνωση από σπές.

Τόσο στην περιοχή τύπου - p όσο και στην περιοχή τύπου - n παρατηρείται η ύπαρξη περιοχών όπου οι φορείς πλειονότητας εξουδετερώνονται, το άθροισμα των δύο περιοχών καλείται περιοχή απογύμνωσης. Στα δύο άκρα της περιοχής απογύμνωσης εμφανίζεται μια τάση φράγματος



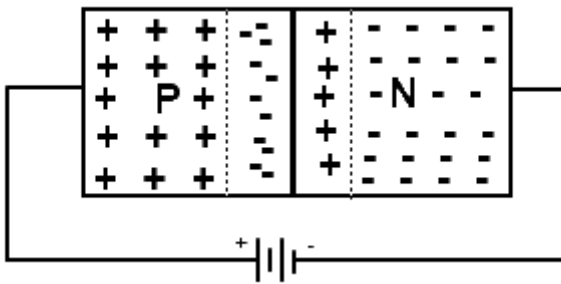
Σχήμα 3-2. Περιοχή απογύμνωσης ένωσης pn (Physics and Radio-Electronics)

Πέρα από το ρεύμα διάχυσης των φορέων πλειονότητας υπάρχει και μια συνιστώσα ρεύματος που οφείλεται στη διάχυση φορέων μειονότητας μέσω της επαφής της ένωσης pn, το ρεύμα αυτό καλείται ρεύμα ολίσθησης. Συγκεκριμένα κάποιες οπές που γεννούνται λόγω θερμικού ιονισμού διαρρέουν την περιοχή τύπου $-n$ μόλις πλησιάσουν την περιοχή απογύμνωσης επιταχύνονται στην περιοχή τύπου $-p$, λόγω του ηλεκτρικού πεδίου. Αντίστοιχα κάποια ελεύθερα ηλεκτρόνια που προκύπτουν λόγω θερμικού ιονισμού διαρρέουν την περιοχή τύπου $-p$ και επιταχύνονται στην περιοχή τύπου $-n$ μόλις φθάσουν στην περιοχή απογύμνωσης, πάλι λόγω της ύπαρξης ηλεκτρικού πεδίου. Παρατηρούμε ότι το ρεύμα ολίσθησης παρουσιάζει εξάρτηση από την θερμοκρασία, αλλά είναι ανεξάρτητο από την τιμή της τάσης στα άκρα της περιοχής απογύμνωσης.

Το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης συνήθως δεν είναι το ίδιο στις δύο περιοχές (τύπου $-p$ και τύπου $-n$), αυτό οφείλεται στα διαφορετικά επίπεδα νόθευσης του ημιαγωγού. Στην περιοχή με μικρότερη συγκέντρωση προσμίξεων η περιοχή απογύμνωσης παρουσιάζει μεγαλύτερο πλάτος.

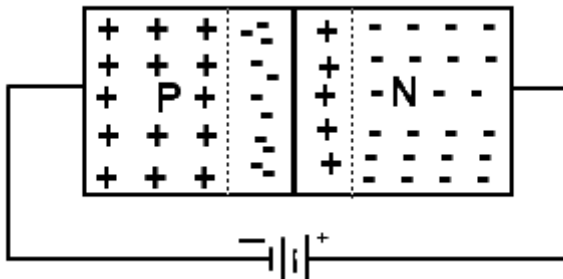
3.3 Η ένωση pn σε κατάσταση ορθής και ανάστροφης πόλωση

Κατά την ορθή πόλωση μίας ένωσης pn ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται στην περιοχή τύπου – p ενώ ο αρνητικός πόλος της πηγής στην περιοχή τύπου – n. Σε αυτήν κατάσταση ηλεκτρόνια ρέουν από την περιοχή τύπου – p προς την περιοχή τύπου – n, με αποτέλεσμα να εξάγονται οπές από την περιοχή τύπου – n και ηλεκτρόνια από την περιοχή τύπου – p. Δηλαδή παρέχονται φορείς πλειονότητας στις δύο περιοχές και εξουδετερώνονται ακάλυπτα δεσμευμένα φορτία, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της περιοχής απογύμνωσης της ένωσης pn



Σχήμα 3-3. Ένωση pn σε ορθή πόλωση (Daenotes)

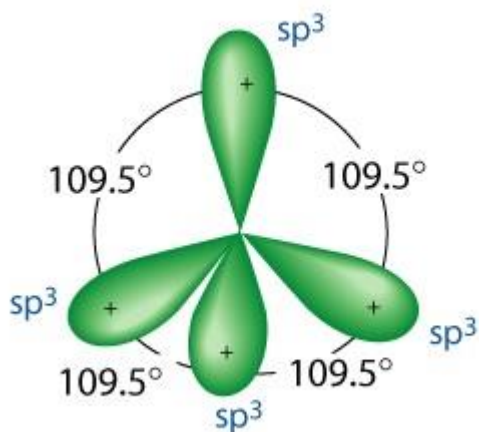
Κατά την ανάστροφη πόλωση μίας ένωσης pn ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται στην περιοχή τύπου – n και ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται στην περιοχή τύπου – p. Σε αυτήν την κατάσταση ηλεκτρόνια ρέουν από την περιοχή τύπου – n προς την περιοχή τύπου – p, με αποτέλεσμα να εξάγονται ηλεκτρόνια από την περιοχή τύπου – n και οπές από την περιοχή τύπου – p. Δηλαδή εξάγονται φορείς πλειονότητας από τις δύο περιοχές και αυξάνονται τα ακάλυπτα δεσμευμένα φορτία, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της περιοχής απογύμνωσης της ένωσης pn



Σχήμα 3-4. Ένωση pn σε ανάστροφη πόλωση (Daenotes)

3.4 Ενεργειακές ζώνες

Το άτομο του πυριτίου διαθέτει 14 ηλεκτρόνια τα οποία κατανέμονται σε διάφορα ενεργειακά επίπεδα. Οι δύο πρώτες στιβάδες ($n=1$, $n=2$) που βρίσκονται κοντύτερα στον πυρήνα του ατόμου παρουσιάζουν σταθερότητα και παραμένουν στην στιβάδα τους κατά την σύνθεση της κρυσταλλικής δομής. Τα τέσσερα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην εξωτερική στιβάδα βρίσκονται κατανεμημένα σε δύο υποστιβάδες την 3s (2 ηλεκτρόνια) και την 3p (άλλα 2 ηλεκτρόνια) οι οποίες βρίσκονται μακρύτερα από τον πυρήνα του ατόμου και τα ηλεκτρόνιά τους αλληλεπιδρούν εντονότερα. Παρόλο που το 3s τροχιακό είναι πλήρες τα δύο ηλεκτρόνιά του αλληλεπιδρούν με άλλα άτομα. Τα ενεργειακά επίπεδα των υποστιβάδων 3s και 3p βρίσκονται κοντά με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνιά τους να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και τα τέσσερα τροχιακά Ψ_{3s} , Ψ_{3px} , Ψ_{3py} , Ψ_{3pz} να αναμιγνύονται και δημιουργούνται τέσσερα υβριδικά τροχιακά με κατευθύνσεις τι γωνίες ενός τετραέδρου, όταν πέντε άτομα πυριτίου βρίσκονται μαζί. Τα τέσσερα νέα τροχιακά τείνουν να απομακρυνθούν όσο το δυνατόν περισσότερο το ένα από το άλλο. Η διαδικασία αυτή καλείται υβριδισμός sp^3 . Τα νέα υβριδικά τροχιακά διαθέτουν από ένα ηλεκτρόνιο και κατά συνέπεια βρίσκονται σε θέση να σχηματίσουν δεσμούς.



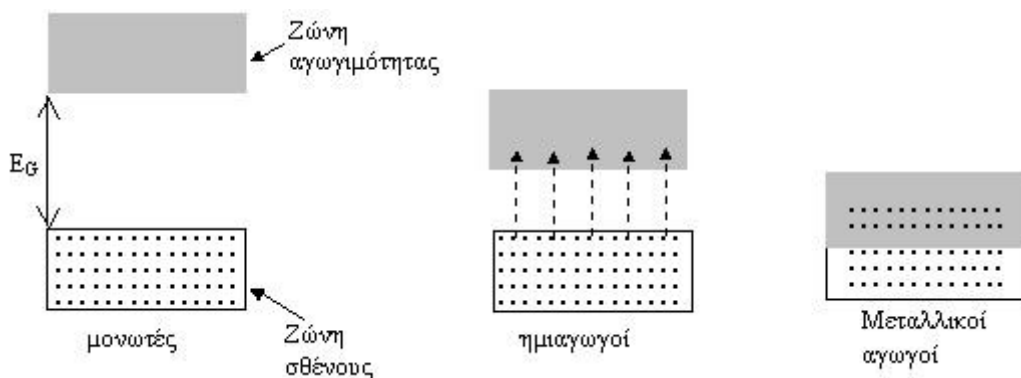
Σχήμα 3-5 sp^3 υβριδισμένο άτομο πυριτίου (<http://www.grandinetti.org>)

Οι τρόποι με τους οποίους τα υβριδικά τροχιακά ενός ατόμου σχηματίζουν δεσμούς με τα τροχιακά ενός γειτονικού ατόμου είναι δύο:

α. Τα δύο τροχιακά που υπερτίθενται να βρίσκονται σε συμφωνία φάσης (είτε και τα δύο θετικά είτε και τα δύο αρνητικά).

β. Τα δύο τροχιακά που υπερτίθενται να βρίσκονται σε διαφορετική φάση (θετικό με αρνητικό).

Στην πρώτη περίπτωση καλούμε το μοριακό τροχιακό αντιδεσμικό Ψ_A και στη δεύτερη περίπτωση καλείτε δεσμικό μοριακό τροχιακό Ψ_D , στα οποία αντιστοιχούν ενέργειες E_A και E_D . Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των Ψ_D τροχιακών εντός του στερεού έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ενεργειακής ζώνης η οποία, λόγω του ότι περιέχει ηλεκτρόνια σθένους, ονομάζεται ζώνη σθένους. Η αλληλεπίδραση των Ψ_A τροχιακών εντός του στερεού έχει ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του ενεργειακού επιπέδου E_A και τη δημιουργία μίας ενεργειακής ζώνης, τέτοια ώστε να μην έχει επαφή με την ζώνη σθένους και ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας. Η απόσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες ονομάζεται ενεργειακό διάκενο (E_g), σε αυτήν την ενεργειακή περιοχή δεν δύναται να βρεθεί ηλεκτρόνιο με ενέργεια. Γενικότερα, όλες οι ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών, όπως οι αγωγοί, οι ημιαγωγοί και οι μονωτές οφείλονται στην ύπαρξη συγκεκριμένων ζωνών με επιτρεπτές ενέργειες και στο ότι οι ζώνες αυτές διαχωρίζονται ή μη από ενεργειακά διακένα.



Σχήμα 3-6. Ανάλογα με την τιμή του εύρους ενεργειακού διακένου τα υλικά χωρίζονται σε μονωτές, ημιαγωγούς και μεταλλικούς αγωγούς (<http://users.sch>)

Στους ημιαγωγούς το ενεργειακό επίπεδο E_V αντιστοιχεί στην κορυφή της ζώνης σθένους ενώ το ενεργειακό επίπεδο E_C αντιστοιχεί στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας.

3.5 Άμεση και έμμεση επανασύνδεση

Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτήν του απόλυτου μηδενός, η θερμική διέγερση των ηλεκτρονίων συνεπάγεται την μεταβολή της ενεργειακής τους κατάστασης και τη μετάβασή τους από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτή η μεταπήδηση ενεργειακής κατάστασης δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Η διαδικασία όπου ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στη ζώνη αγωγιμότητας μεταπέσει σε ενέργεια και συναντήσει μία οπή ονομάζεται επανασύνδεση. Μπορούμε να πούμε ότι η διαδικασία της επανασύνδεσης αποτελεί την κατάληψη ενός κενού δεσμού (οπή) από ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο του κρυστάλλου. Έτσι το ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους. Η πλεονάζουσα ενέργεια από την μετάπτωση του ηλεκτρονίου από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους μετατρέπεται σε ενέργεια φωτονίου όπου $h\nu = E_g$. Η επανασύνδεση των ηλεκτρονίων στους ημιαγωγούς γίνεται είτε άμεσα, είτε έμμεσα. Κατά την άμεση επανασύνδεση ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μία οπή συναντώνται και επανασυνδέονται, αυτό συμβαίνει σε μη στοιχειακούς αγώγιμους κρυστάλλους, όπως το Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs). Κατά την έμμεση επανασύνδεση η διαδικασία διαφοροποιείται. Για την επανασύνδεση ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου με μια οπή απαιτείται κάποιο «τρίτο σώμα» το οποίο είτε είναι κάποιο άτομο πρόσμιξης είτε κάποια κρυσταλλική ατέλεια. Το «τρίτο σώμα» καλείτε κέντρο επανασύνδεσης, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δεσμεύονται από τα κέντρα επανασύνδεσης και γίνονται εντοπισμένα σε αυτά τα σημεία του κρυστάλλου.

Από ενεργειακή άποψη το κέντρο δέσμευσης βρίσκεται υψηλότερα από την EV της ζώνης σθένους και χαμηλότερα της EC της ζώνης αγωγιμότητας. Η έμμεση επανασύνδεση λαμβάνει χώρα σε στοιχειακούς ημιαγώγιμους κρυστάλλους.

3.6 Οπτική διέγερση διόδου

Όταν το φως προσπίπτει από την πλευρά του ημιαγωγού τύπου – n, τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους. Εάν η ενέργεια των φωτονίων είναι υψηλότερη από την ενέργεια του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού τότε μπορούν να απορροφηθούν από τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους που βρίσκονται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Η ενέργεια ενός απορροφούμενου φωτονίου μπορεί να διεγείρει το ηλεκτρόνιο προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω στο πλέγμα μια κενή ενεργειακή κατάσταση (οπή). Με τον τρόπο αυτόν η οπτική διέγερση εισάγει ταυτόχρονα ζεύγη οπών (στη ζώνη σθένους) και ηλεκτρονίων (στη ζώνη

αγωγιμότητας) καθ'όλο το εύρος της επαφής $p - n$, συμπεριλαμβανομένου και του ηλεκτροστατικού φράγματος.

Καθώς το υλικό απορροφάει μέρος από το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δεν μπορεί να περιέλθει σε κατάσταση θερμοδυναμικής ακτινοβολίας λόγω της διαρκούς οπτικής διέγερσης που εισάγει συνεχώς ηλεκτρικούς φορείς στην περιοχή απογύμνωσης. Με βάση την προσέγγιση "Quasi – Equilibrium", που προτάθηκε από τους Shockley, Schottky και Brattain για τις περιπτώσεις που εκδηλώνεται διαταραχή της ισορροπίας στην περιοχή απογύμνωσης, η στάθμη Fermi διαχωρίζεται σε δύο διακριτές στάθμες Quasi – Fermi, μια για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (Φ_n) και μια για τις οπές (Φ_p). Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας χρησιμοποιούνται οι διακριτές στάθμες Quasi – Fermi προκειμένου να περιγράφεται ξεχωριστά η ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων από την ενεργειακή κατανομή των οπών στην περιοχή επαφής.

Εκτός της περιοχής απογύμνωσης οι δύο διακριτές στάθμες Quasi – Fermi ταυτίζονται σε μία, (E_F) που αποτελεί τη στάθμη Fermi σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Όταν οι απορροφήσεις των φωτονίων γίνονται εκτός της περιοχής απογύμνωσης και εντός των περιοχών των ημιαγωγών $p - n$ τα δημιουργούμενα ζεύγη οπών ηλεκτρονίων κινούνται γύρω από τις θέσεις δημιουργίας τους, στη συνέχεια επανασυνδέονται και χάνονται. Οι απορροφήσεις φωτονίων σε θέσεις εκτός της περιοχής απογύμνωσης δεν συμβάλουν στη φωτοβολταϊκή μετατροπή ενέργειας, αντιθέτως έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή απόδοσης της διάταξης.

Όταν οι απορροφήσεις φωτονίων γίνονται στην περιοχή απογύμνωσης ή κατά μήκος της διάχυσης των φορέων μειονότητας, τότε τα παραγόμενα ζεύγη οπών - ηλεκτρονίων διαχωρίζονται χωροταξικά λόγω του ηλεκτροστατικού πεδίου της περιοχής απογύμνωσης. Ο αυτόματος διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορέων που γίνεται από το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού εξασφαλίζει ότι η παραγόμενοι φορείς ηλεκτρικού φορτίου εκτρέπονται προς διαφορετικές περιοχές και δεν επανασυνδέονται.

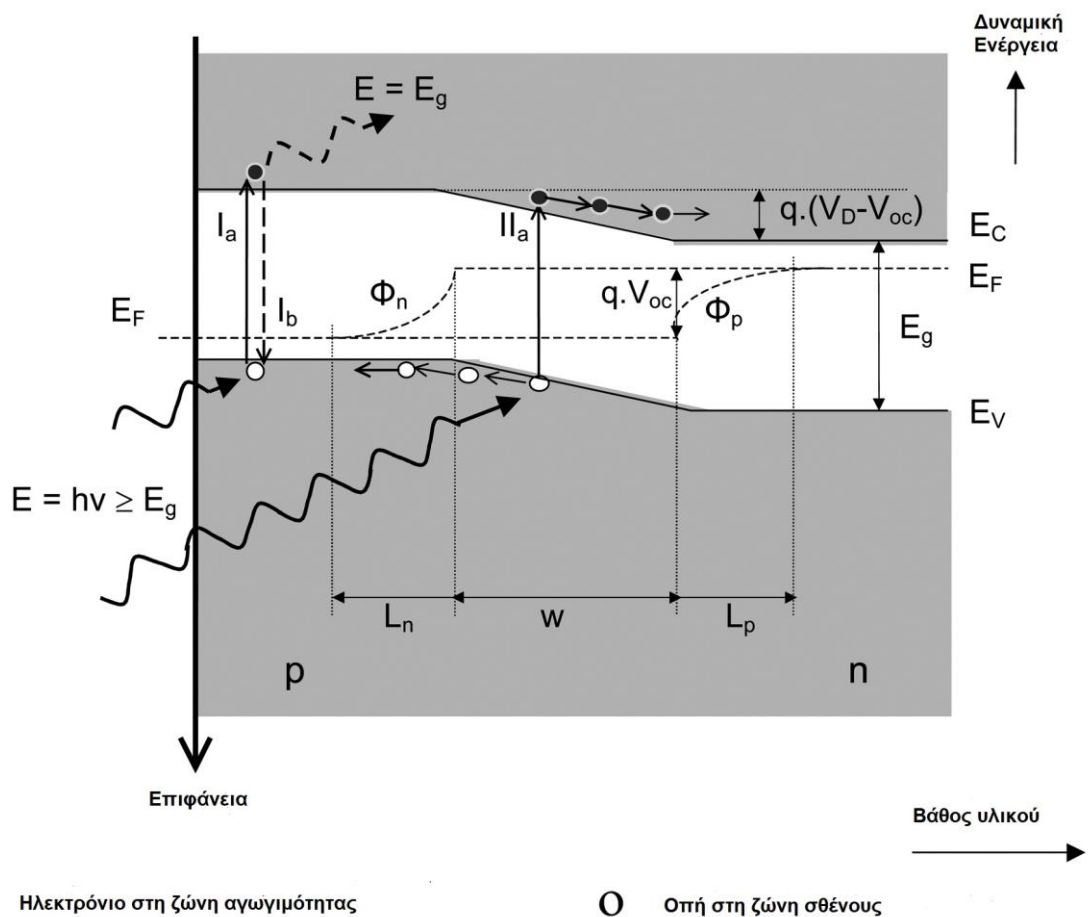
Η επανασύνδεση ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου με μία οπή ουσιαστικά αποτελεί τη διαδικασία της ταυτόχρονης απώλειάς τους. Οι αυξημένοι ρυθμοί επανασύνδεσης μειώνουν δραστικά την απόδοση της φωτοβολταϊκής μετατροπής. Η ιδανική διάταξη για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από τον ελάχιστο δυνατό ρυθμό επανασύνδεσης στις περιοχές εκτός της περιοχής απογύμνωσης. Όπως αναλύθηκε προηγουμένως η επανασύνδεση συνιστά την αντίστροφη φυσική διεργασία της δημιουργίας ενός ζεύγους οπής – ηλεκτρονίου και συνεπώς μειώνει δραστικά τη συνολική απόδοση της φωτοβολταϊκής μετατροπής.

Κατά τη διάρκεια της οπτικής διέγερσης τα ηλεκτρόνια που εισάγονται στην περιοχή απογύμνωσης (ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού) εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n , ενώ οι οπές εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου p . Συνεπώς, ο

ημιαγωγός τύπου – n αποκτά περισσότερα αρνητικά φορτία, ενώ ο ημιαγωγός τύπου – p αποκτά περισσότερα θετικά φορτία. Η δημιουργία αυτών των κατανομών φορτίου ισοδυναμεί με μία ορθά πολωμένη επαφή pn. Στη μόνιμη κατάσταση μιας οπτικά διεγερμένης επαφής pn, οι στάθμες Quasi – Fermi παραμένουν σταθερές σε όλο το εύρος της περιοχής απογύμνωσης και η μεταξύ του ενεργειακή διαφορά δίνεται από την σχέση:

$$\Phi_n - \Phi_p = q V_{\text{TOTAL}} ,$$

Όπου q το στοιχειώδες φορτίο, το V_{TOTAL} αντιστοιχεί στην τιμή της τάσεως εξόδου που θα αναπτυχθεί μεταξύ των εξωτερικών ακροδεκτών της οπτικά διεγερόμενης επαφής pn, Φ_n η στάθμη Quasi – Fermi για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και Φ_p η στάθμη Quasi – Fermi για τις οπές.



Σχήμα 3-7. Σχηματική παράσταση οπτικά διεγερμένου ημιαγωγού όπου τα φωτόνια προσπίπτουν από την πλευρά τύπου – p.

Παρατήρηση:

Στο σχήμα 3-7 παρατηρούμε τις ζώνες σθένους και αγωγιμότητας, τα ενεργειακά επίπεδα E_V και E_C , τη στάθμη Fermi E_F , το ενεργειακό διάκενο E_g , μία σχετική απεικόνιση της περιοχής απογύμνωσης W και τα μήκη διάχυσης φορέων μειονότητας L_n , L_p . Παρατηρούμε στο στιγμιότυπο I_a την πρόσπτωση φωτονίου σε ηλεκτρόνιο εντός της περιοχής p και την μεταπήδησή του από την περιοχή σθένους στην περιοχή αγωγιμότητας, ταυτόχρονα δημιουργείται μια οπή. Στη συνέχεια στο στιγμιότυπο I_b επειδή δεν δέχεται το ηλεκτροστατικό πεδίο της περιοχής απογύμνωσης χάνει την ενέργειά του και επανασυνδέεται με την οπή. Στο στιγμιότυπο I_a φωτόνιο προσπίπτει σε ηλεκτρόνιο εντός της περιοχής απογύμνωσης το οποίο μεταπηδά από την περιοχή σθένους στην περιοχή αγωγιμότητας και ταυτόχρονα δημιουργείται οπή. Το ζεύγος οπής – ηλεκτρονίου δέχεται την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου της περιοχής απογύμνωσης και διαχωρίζεται, το μεν ηλεκτρόνιο οδεύει μέσω του ημιαγωγού τύπου n , ενώ η οπή οδεύει μέσω του ημιαγωγού τύπου p .

Η μαθηματική έκφραση για την τάση ανοικτού κυκλώματος μιας φωτιζόμενης ιδανικής επαφής $p-n$ στην μόνιμη κατάσταση δίνεται από την σχέση:

$$V_{OC} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{L_n + L_p}{\frac{L_n}{\tau_n} \cdot n_p + \frac{L_p}{\tau_p} \cdot p_n} \cdot g_{opt} + 1 \right)$$

Όπου V_{OC} η τάση ανοικτού κυκλώματος, k η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία, q το στοιχειώδες φορτίο, L_n το μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων στην περιοχή τύπου p , L_p το μήκος διάχυσης των οπών στην περιοχή τύπου n , τ_n ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων που αποτελούν φορείς μειονότητας, τ_p ο χρόνος ζωής των οπών που αποτελούν φορείς μειονότητας, n_p η συγκέντρωση των ελευθέρων ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου p , p_n η συγκέντρωση των οπών στον ημιαγωγό τύπου n , g_{opt} ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών οπών ηλεκτρονίων λόγω οπτικής διέγερσης.

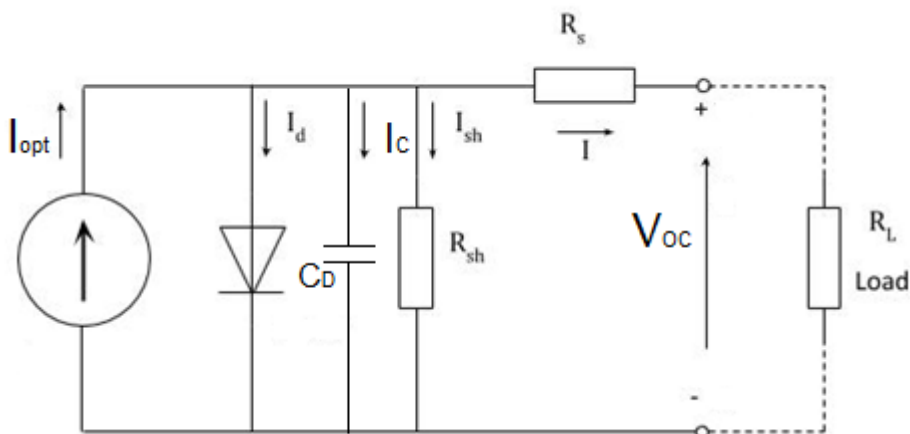
Επιπροσθέτως παρέχεται ηλεκτρικό ρεύμα, του οποίου η ένταση εξαρτάται από την απορροφούμενη φωτεινή ισχύ. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται φωτόρευμα - I_{opt} και διοχετεύεται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα με φορά ίδια με αυτήν που ρέει μία δίοδο σε συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης. Το φωτόρευμα δίνεται από την σχέση:

$$I_{opt} = q \cdot A(L_n + L_p) \cdot g_{opt}$$

Όπου q το στοιχειώδες φορτίο, A το εμβαδόν της επιφάνειας που δέχεται την οπτική διέγερση, L_n το μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων στην περιοχή τύπου $-p$, L_p το μήκος διάχυσης των οπών στην περιοχή τύπου $-n$ και g_{opt} ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών οπών ηλεκτρονίων λόγω οπτικής διέγερσης.

Από την παραπάνω σχέση παρατηρείτε ότι το φωτόρευμα είναι ανάλογο της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, για δεδομένες συνθήκες φωτισμού.

Στο ακόλουθο σχήμα δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας οπτικά διεγερόμενης ένωσης ημιαγωγού pn . Παρατηρούμε ότι το κύκλωμα περιλαμβάνει την πηγή ρεύματος όπου άγεται το φωτόρευμα (I_{opt}), παράλληλα με μια ιδανική δίοδο, μέρος του I_{opt} άγεται μέσω της διόδου και εμφανίζεται η V_D . Η μη ιδανική συνιστώσα της διόδου παρουσιάζεται από ένα παράλληλο κύκλωμα $R_{sh} - C_D$, όπου με C_D συμβολίζεται η χωρητικότητα της διόδου και με R_{sh} συμβολίζεται η αντίσταση μεταφοράς ηλεκτρικών φορέων πλειονότητας εκτός της περιοχής απογύμνωσης. Επίσης λόγω του υποστρώματος και των ωμικών επαφών του ημιαγωγού pn εισάγεται και αντίσταση R_s σε σειρά. Η ιδανική τιμή για την R_{sh} είναι άπειρη, ενώ για την R_s είναι μηδέν.



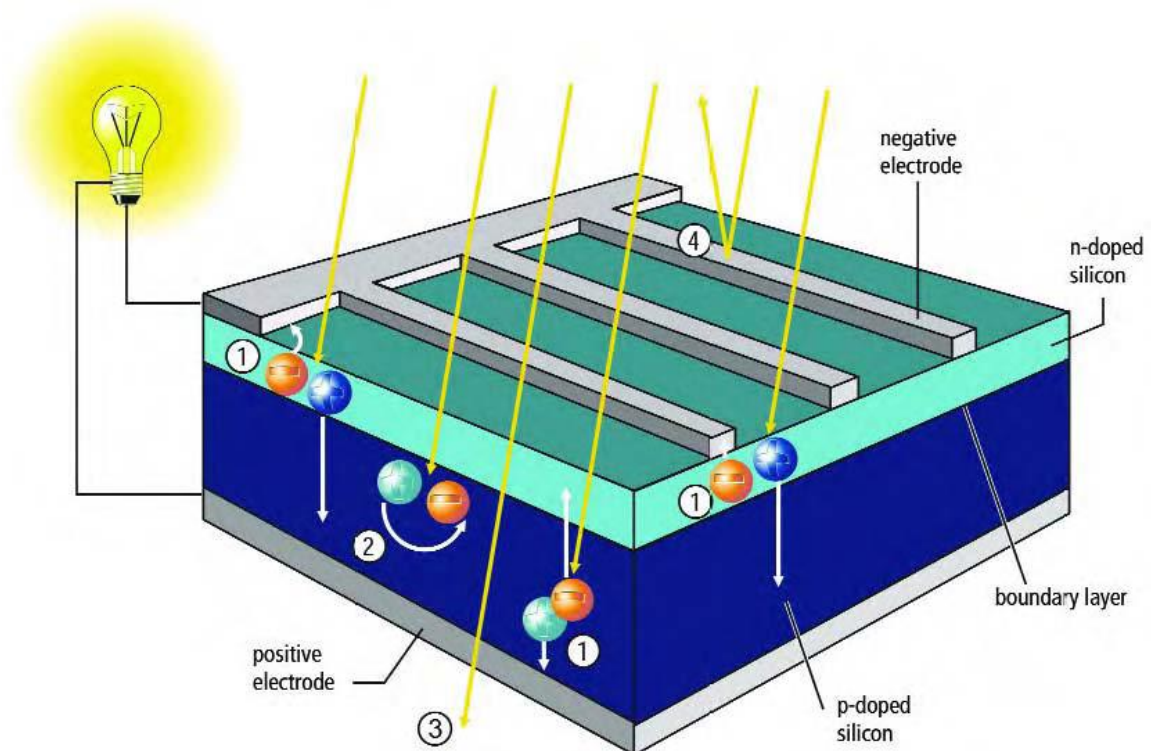
Σχήμα 3-8. Ισοδύναμο κύκλωμα οπτικά διεγερόμενου ημιαγωγού

Στην μόνιμη κατάσταση ο χωρητικός κλάδος δύναται να απαλειφθεί, αφού δεν διαρρέεται από κάποιο ρεύμα. Όμως κατά την μεταβολή της φωτεινότητας, όπου λαμβάνουν χώρα μεταβατικά φαινόμενα απαιτείται ο συνυπολογισμός του, μιας και το προκύπτον ρεύμα είναι χρονομεταβλητό.

3.7 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο παρουσιάστηκε πως με την οπτική διέγερση μιας ένωσης ημιαγωγών ρη παράγεται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα άκρα της περιοχής τύπου $-p$ και τύπου $-n$. Για την εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου ώστε να έχουμε ηλεκτροπαραγωγή σε μεγάλη ισχύ απαιτείται η χρήση διατάξεων ενωσεων ημιαγωγών ρη κατάλληλης διάταξης και μεγέθους.

Η βασική μονάδα κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι φωτοβολταϊκή κυψέλη. Η αγώγιμη κυψέλη αποτελείται από τα κατάλληλα επίπεδα υλικών ώστε να προκύψει μία ένωση ημιαγωγού ρη. Αρχικά στο άνω επίπεδο τοποθετείται ένα αγώγιμο υλικό σε μορφή ελασμάτων όπου συλλέγονται οι εξερχόμενοι από τον ημιαγωγό φορείς φορτίου (ηλεκτρόνια). Στη συνέχεια υπάρχει ένα επίπεδο ημιαγωγού τύπου $-n$, ακολουθεί το επίπεδο με τον ημιαγωγό τύπου $-p$ και στη συνέχεια ένα επίπεδο αγώγιμου υλικού που χρησιμεύει σαν βάση και ως κάθοδος όπου συλλέγονται φορείς φορτίου (π.χ. οπές). Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η δομή ενός φωτοβολταϊκού κατασκευασμένου από πυρίτιο, όπου διακρίνονται τα κατασκευαστικά επίπεδα της φωτοβολταϊκής κυψέλης.



Σχήμα 3-9. Πλάγια τομή φωτοβολταϊκής κυψέλης όπου διακρίνονται: 1) Διαχωρισμούς ζευγών οπών – ηλεκτρονίων , 2) Επανασύνδεση οπών με ηλεκτρόνια , 3) Φωτεινή ακτινοβολία, 4) Αγωγή ελάσματα

Όπως προαναφέρθηκε, για τη δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου υλοποιείται κατάλληλη συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών κυψελών. Οι τρόποι συνδεσμολογίας είναι οι εξής:

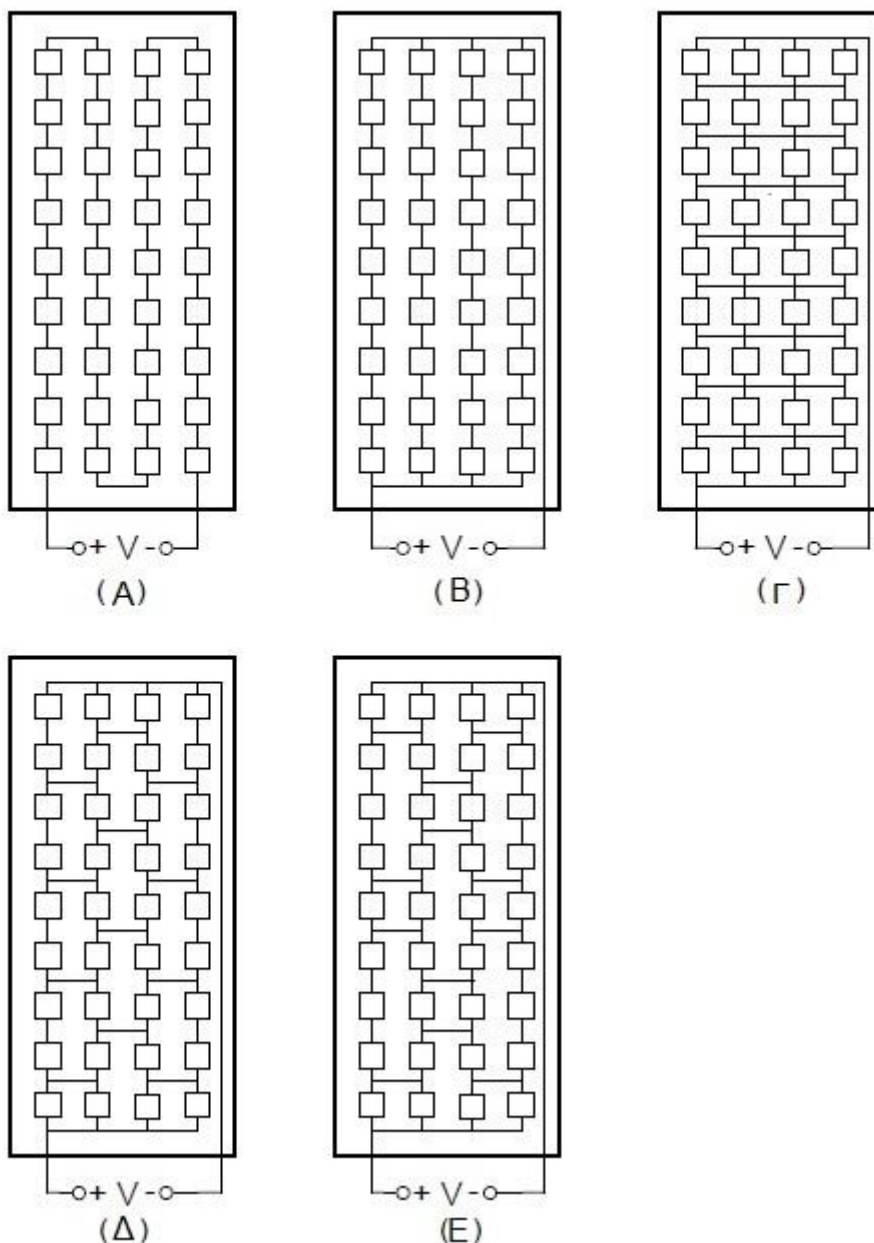
A) Σύνδεση σε σειρά

B) Σύνδεση παράλληλων στηλών

Γ) Συνδεσμολογία σταυρωτού δεσμού όπου οι κυψέλες κάθε σειράς συνδέονται πρώτα παράλληλα και στη συνέχεια συνδέονται σε σειρά με τα κυκλώματα των άλλων σειρών.

Δ) Συνδεσμολογία γεφυρωτής διασύνδεσης, όπου όλα τα στοιχεία συνδέονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται γέφυρες .

E) Συνδεσμολογία τύπου κυψέλης



Σχήμα 3-10. Συνδεσμολογίες φωτοβολταϊκών κυψελών

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται εν σειρά σε κλάδους και οι κλάδοι παράλληλα μεταξύ τους ώστε να δημιουργήσουν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Κατά την εν σειρά σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων παρατηρείται αύξηση της τάσης και κατά την παράλληλη σύνδεση των κλάδων παρατηρείται αύξηση του ρεύματος. Η έξοδος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι συνεχούς ρεύματος, έτσι για την έγχυση ισχύος στο δίκτυο απαιτούνται ηλεκτρονικές διατάξεις μετατροπής του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο.

Μια ακόμη παρατήρη σχετίζεται με την σκίαση κάποιας περιοχής ενός πλαισίου. Εάν κάποια από τις κυψέλες του στοιχείου σκιαστεί, παύει να παράγει ρεύμα. Σε αυτήν την περίπτωση και ανάλογα με τον τύπο συνδεσμολογίας των κυψελών που βρίσκονται στο

εσωτερικό του πλαισίου, λειτουργεί σαν φορτίο για το υπόλοιπο κύκλωμα. Το ρεύμα που διαπερνά την σκιασμένη κυψέλη έχει ως αποτέλεσμα να διαρρέει της ισοδύναμες αντιστάσεις R_{SH} και R_S του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 2-13 με αποτέλεσμα να παράγεται θερμότητα. Ανάλογα με τις συνθήκες ηλιοφάνειας το ρεύμα αυτό μπορεί να πάρει υψηλές τιμές, ικανές να καταστρέψουν την σκιασμένη φωτοβολταϊκή κυψέλη.

Το φαινόμενο της σκίασης προκαλεί μείωση της τάσης εξόδου και ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου, καθώς και καταστροφή του.

Για την αποφυγή των ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων του φαινομένου της υπερθέρμανσης των κυψελών μπορούν να συνδεθούν δίοδοι παράκαμψης ανά 18 – 20 κυψέλες, ώστε το ρεύμα να τις διαπερνά και να μην θερμαίνεται το σκιασμένο στοιχείο.

3.8 Είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων

Όπως αναφέρθηκε και κατά την εισαγωγή τα φωτοβολταϊκά υλικά διαχωρίζονται σε τρεις γενιές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα γνωστότερα φωτοβολταϊκά κάθε γενιάς και τεχνολογίας. Αρχικά τα συστήματα πρώτης γενιάς.

3.8.1 Φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Single crystalline Silicon, sc – Si)



Σχήμα 3-11. Φωτοβολταϊκή κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου διαθέτουν την υψηλότερη απόδοση, αλλά και το υψηλότερο κόστος από όλα τα φωτοβολταϊκά συστήματα με βάση το πυρίτιο. Η κρυσταλλική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου δεν παρουσιάζει ατέλειες και χαρακτηρίζεται από απλότητα και συνέχεια. Η απόδοση των συστημάτων που συναντώνται στην αγορά κυμαίνεται ανάμεσα στο 15% με 18% ενώ αυτή των εργαστηριακών συστημάτων σε πάνω από 24%.

Κατασκευαστικά οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες δημιουργούνται από ράβδους καθαρού μονοκρυσταλλικού πυριτίου, οι οποίες στη συνέχεια τεμαχίζονται σε wafer.

Οι βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι:

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



Σχήμα 3-12. Ράβδος μονοκρυσταλλικού πυριτίου

3.8.2 Φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multicrystalline Silicon, mc – Si)



Σχήμα 3-13. Φωτοβολταϊκή κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι η πιο διαδεδομένη εμπορικά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία. Το πάχος της φωτοβολταϊκής κυψέλης ανέρχεται στα 0,3mm και αποτελείται από λεπτές επιστρώσεις. Στην επιφάνεια της φωτοβολταϊκής κυψέλης πολυκρυσταλλικού πυριτίου διακρίνονται τα όρια μονοκρυσταλλικών περιοχών στα οποία γίνεται επανασύνδεση των φωτιδιεγειρόμενων φορέων (ζευγών οπών και ηλεκτρονίων). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μειωμένη απόδοση σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Η μειωμένη απόδοση αντισταθμίζεται από το μειωμένο κόστος παραγωγής των φωτοβολταϊκών πλαισίων πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι μονοκρυσταλλικές περιοχές, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση του πολυκρυσταλλικού πλαισίου. Η απόδοση των πλαισίων διαθέσιμων στο εμπόριο είναι της τάξης του 13% με 15%, ενώ των αντίστοιχων πειραματικών διατάξεων σε εργαστήρια κυμαίνεται στο 17% με 19%.

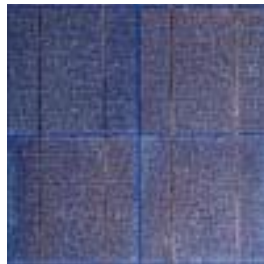
Κατασκευαστικά οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες δημιουργούνται από μπάρες πολυκρυσταλλικού πυριτίου, οι οποίες στη συνέχεια τεμαχίζονται σε wafer. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι:

- Η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification).
- Η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση").
- Η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.



Σχήμα 3-14. Μπάρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου

3.8.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)



Σχήμα 3-15. Φωτοβολταϊκό σύστημα ταινίας πυριτίου

Η τεχνολογία που εφαρμόζεται στα συστήματα ταινίας πυριτίου προσφέρει μέχρι και 50% οικονομία στη χρήση πυριτίου σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές κατασκευής. Η απόδοση των εμπορικών συστημάτων κυμαίνεται στο 13%.

Για την κατασκευή των ταινιών πυριτίου χρησιμοποιείται μια διαδικασία κατά την οποία αγωγή με αντιστάσεις σε υψηλή θερμοκρασία διαπερνούν τηγμένο πυρίτιο έτσι ώστε να δημιουργηθούν πολυκρυσταλλικές ταινίες πυριτίου. Αυτές οι λεπτές ταινίες τεμαχίζονται σε διάφορα μήκη και συγκολλούνται κατάλληλα, για να δημιουργηθούν φωτοβολταϊκές κυψέλες.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται φωτοβολταϊκά συστήματα δεύτερης γενιάς

3.8.4 Φωτοβολταϊκά συστήματα λεπτών υμενίων (Thin film)

Στην κατηγορία φωτοβολταϊκών συστημάτων λεπτών υμενίων περιλαμβάνονται αρκετές υποκατηγορίες φωτοβολταϊκών αποτελούμενες από διάφορα στοιχεία, όπως το άμορφο πυρίτιο, το αρσενικούχο γάλλιο, το τελουριούχο κάδμιο και ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός στοιχεία που χαρακτηρίζονται από την πολύ καλή απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας, λόγω της τιμής του ενεργειακού τους διακένου. Αναλυτικότερα:

Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Thin film Silicon, a – Si)



Σχήμα 3-16. Φωτοβολταϊκό σύστημα λεπτού υμενίου άμορφου πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου παρουσιάζουν χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια πυριτίου. Αποτελούνται από ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες κατασκευάζονται με μεθόδους τυχαίας εναπόθεσης ημιαγωγικού υλικού πάνω σε κάποιο υπόστρωμα υποστήριξης όπως εύκαμπτο πλαστικό, γυαλί ή μέταλλο (αλουμίνιο). Λόγω της λιγότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται κατά την εναπόθεση, καθώς και λόγω της χρήσης υλικών χαμηλού κόστους η τελική τιμή τους είναι μειωμένη.

Οι αποδόσεις που επιτυγχάνουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα πυριτίου κυμαίνονται μεταξύ 6% με 8%, για αυτό και απαιτούν την κάλυψη μεγαλύτερων εκτάσεων. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι ότι παρουσιάζουν χαμηλότερο κόστος και δεν επηρεάζονται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης έχουν εκφραστεί αμφιβολίες σχετικά με την διάρκεια ζωής των πλαισίων που κατασκευάζονται από άμορφο πυρίτιο, μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι νέα.

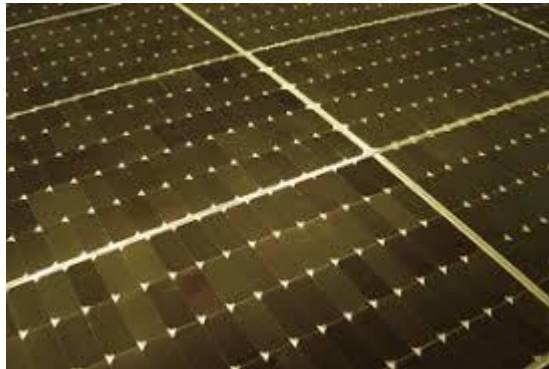
Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)



Σχήμα 3-17. Φωτοβολταϊκές κυψέλες τελλουριούχου κάδμιου

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούμενα από τελλουριούχο κάδμιο παρουσιάζουν αποδόσεις πλαισίου της τάξεως του 6% με 8%. Βασικοί παράγοντες στην περιορισμένη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η σπανιότητα του Τελλούριου και το γεγονός ότι το Κάδμιο είναι μια αρκετά καρκινογόνος ουσία.

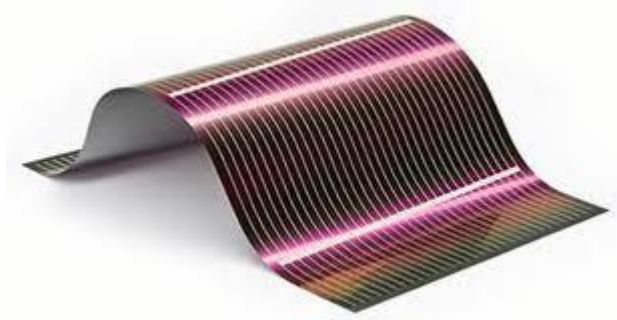
Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)



Σχήμα 3-18. Φωτοβολταϊκές κυψέλες αρσενικούχου γαλλίου

Το Αρσενικούχο Γαλλιο ως ημιαγωγός παρουσιάζει κρυσταλλική δομή παρόμοια με αυτή του πυριτίου, το γάλλιο ως στοιχείο είναι σπανιότερο από τον χρυσό και αποτελεί παραπροϊόν ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευασμένα από GaAs διαθέτουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και παρουσιάζουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτοί οι παράγοντες επιβάλλουν την χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε διαστημικές εφαρμογές. Ενδεικτικά, ο βαθμός απόδοσης που έχει επιτευχθεί είναι της τάξης του 29%. Το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υψηλότερο κόστος και η σπανιότητα του Γαλλίου.

Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός CuInSe_2



Σχήμα 3-19. Φωτοβολταϊκές κυψέλες Δισεληνοϊνδιούχου Χαλκού με πρόσμιξη Γαλλίου (CIGS)

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια Δισεληνοϊνδιούχου Χαλκού παρουσιάζουν υψηλή απορρόφηση και έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, παρόλα αυτά η απόδοσή τους με τις σύγχρονες τεχνικές κατασκευής κυμαίνεται στο 11 % προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση των συστημάτων του εμπορίου κυμαίνεται στο 11%. Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοση μπορεί να αυξηθεί ακόμη περισσότερο (CIGS). Ένα βασικό μειονέκτημα αποτελεί το ότι το Ίνδιο όπως και το Γάλλιο είναι σπάνια στοιχεία.

3.8.5 Φωτοβολταϊκά συστήματα τρίτης γενιάς

Φωτοβολταϊκά συστήματα περοβσκίτη (Perovskite Cell)



Σχήμα 3-20. Ορυκτό περοβσκήτη

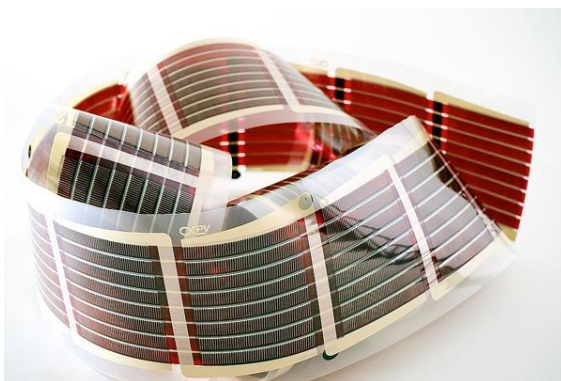
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περοβσκήτη διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά. Οι διεργασίες κατασκευής τους είναι αρκετά απλούστερες και με αρκετά χαμηλότερο κόστος, περιλαμβάνοντας ακόμα και μεθόδους εκτύπωσης. Παρουσιάζουν υψηλό βαθμό απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και πολύ λεπτές επιστρώσεις υλικού της τάξης των 500nm. Αυτά τα χαρακτηριστικά δημιουργούν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την δημιουργία χαμηλού κόστους, υψηλής απόδοσης, λεπτά, ελαφρά και εύκαμπτα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η αντοχή των παραγόμενων στοιχείων στην υγρασία, η μεγαλύτερη διάρκεια που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής είναι της τάξης των 10000 ωρών (Ιούνιος 2017).

Για την κατασκευή φωτοβολταϊκών από περοβσκήτη χρησιμοποιούνται κυρίως δύο διεργασίες. Η μία περιλαμβάνει την θέρμανση αλογονίδιου του μολύβδου παρουσία ατμών ιωδιούχου μεθυλαμμωνίου και η άλλη περιλαμβάνει διάλυμα αλογονίδιου του μολύβδου και μεθυλαμμωνίου που εναποτίθεται σε κάποιο υπόστρωμα.

Στα συστήματα περοβσκήτη είναι δυνατό να ελεγχθεί το πλάτος του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού μέσω της σύστασης των αλογονιδίων που παίρνουν μέρος στην διεργασία κατασκευής.

Η απόδοση απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας των συστημάτων Περοβσκήτη κυμαίνεται κοντά σε αυτήν του Γαλλίου. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα Περοβσκήτη αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογική εξέλιξη με πολλά μελλοντικά περιθώρια ανάπτυξης.

Οργανικά φωτοβολταϊκά



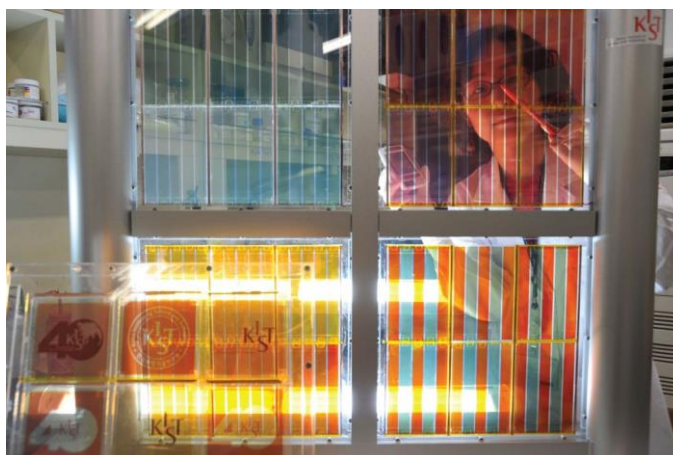
Σχήμα 3-21. Οργανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο

Μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία με πολλά περιθώρια ανάπτυξης είναι τα οργανικά φωτοβολταϊκά. Στα οργανικά φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί κατασκευασμένοι από οργανικά πολυμερή υλικάγια την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολία και την μεταφορά των φορτίων πλειονότητας.

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους των πρώτων υλών και της δυνατότητας μεγάλης παραγωγής. Στα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι εφικτό να μεταβληθεί το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού μεταβάλλοντας το μήκος και τη λειτουργική ομάδα του πολυμερούς. Επίσης ο βαθμός απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι υψηλός, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολύ λεπτές επιστρώσεις ημιαγωγού, συνήθως τάξεως μερικών νανομέτρων. Τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι εύκαμπτα, ελαφρά και πολύ εύκολα στο να κατασκευασθούν, όμως παρουσιάζουν μικρή απόδοση και φθορά.

Επίσης τα πολυμερή οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιούνται σε πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά.

Φωτοευαίσθητα (χρωμοευαίσθητοποιημένα) φωτοβολταϊκά στοιχεία (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSC)



Σχήμα 3-22. Φωτοευαίσθητο (χρωμοευαίσθητοποιημένο) φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα φωτοευαίσθητα (χρωμοευαίσθητοποιημένα) φωτοβολταϊκά αποτελούν φωτοβολταϊκά στοιχεία χαμηλού κόστους που υπάγονται στην κατηγορία των λεπτών υμενίων. Τα DSSC παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως το ότι είναι ημιδιαφανή, σχετικά εύκαμπτα και με αρκετά χαμηλό κόστος. Η απόδοση των DSSC κυμαίνεται γύρω στο 8% και τα συστήματα, μέχρι τώρα, κάνουν χρήση ενός υγρού ηλεκτρολύτη. Η ύπαρξη υγρού εντός της δομής του φωτοβολταϊκού δημιουργεί προβλήματα στις πολύ χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, ακόμη πραγματοποιούνται έρευνες ώστε να αντικατασταθεί ο υγρός ηλεκτρολύτης από κάποιον στερεό. Κατασκευαστικά το DSSC αποτελείται από ένα πορώδες στρώμα διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) επικαλυμμένο από μία οργανική βαφή που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Το στρώμα διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) βρίσκεται εμβαπτισμένο σε ένα ιωδιούχο διάλυμα που λειτουργεί ως ηλεκτρολύτης, πάνω από το οποίο βρίσκεται μια επιστρωση καταλύτη με βάση την πλατίνα. Οι δυνατότητες ανάπτυξης των φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών είναι πολλές και πραγματοποιούνται αρκετές έρευνες σε αυτό το πεδίο.

Κεφάλαιο 4

Οργανικά φωτοβολταϊκά

Τα συνθετικά οργανικά υλικά χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές της καθημερινής ζωής του ανθρώπου. Από τα υφάσματα των ρούχων, τα διάφορα καταναλωτικά προϊόντα, τα χρώματα των τοίχων μέχρι τα υλικά συσκευασίας τα πλαστικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι εφόσον ανακαλύφθηκαν ημιαγώγιμα οργανικά πολυμερή ανοίγουν νέοι δρόμοι για την αντικατάσταση των ανόργανων ημιαγωγών με οργανικούς.

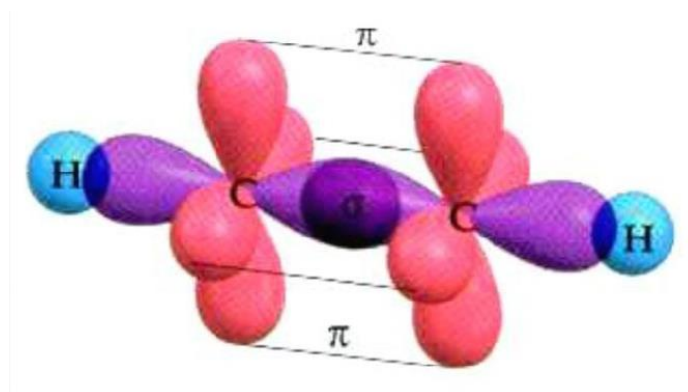
Η δυναμική που αποκτούν τα οργανικά φωτοβολταϊκά σχετίζεται με το όραμα της κατασκευής οργανικών φωτοβολταϊκών χαμηλού κόστους, παραγόμενα σε βιομηχανικό επίπεδο με μαζικούς ρυθμούς παραγωγής και προσαρμοζόμενα σε μόνιμες κατασκευές. Η έρευνα απάνω στον τομέα των οργανικών φωτοβολταϊκών έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια και εκτείνεται σε μεγάλο εύρος υλικών όπως οργανικές βαφές, πολυμερή, κ.α. . Για τους παραπάνω λόγους τα οργανικά φωτοβολταϊκά αναμένεται να διαδραματίσουν σπουδαίο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μελλοντικά.

4.1 Ημιαγώγιμα πολυμερή

Τα πλαστικά είναι γνωστά για το μειωμένο βάρος τους, το χαμηλό κόστος κατασκευής και για τις μονωτικές τους ιδιότητες. Παρόλα αυτά έρευνες κατέληξαν στην επίτευξη κατασκευής ημιαγώγιμων διατάξεων πολυμερών (Βραβείο Νόμπελ 2000 - MacDiarmid, Shirikawa και Heeger). Πολυμερές ημιαγώγιμες διατάξεις χρησιμοποιούνται πλέον σε πληθώρα σύγχρονων εφαρμογών (αισθητήρες, βιο-υλικά, OLED κτλ.), αφού όπως και με τους ανόργανους ημιαγωγούς, έτσι και με τους οργανικούς επιτυγχάνεται η δημιουργία ενώσεων ημιαγωγών pn.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των πολυμερών που χρησιμοποιούνται ως ημιαγωγοί στα φωτοβολταϊκά είναι ότι διαθέτουν μακρές συζυγείς δομές. Μια συζυγής δομή δημιουργείται όταν άτομα άνθρακα σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς με εναλλασσόμενους απλούς και διπλούς δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια στα πz τροχιακά των ατόμων που λαμβάνουν μέρος στην δημιουργία των δεσμών δημιουργούν π δεσμικά μοριακά τροχιακά και π* μη δεσμικά μοριακά τροχιακά. Τα διεσπαρμένα π τροχιακά αποτελούν τα υψηλότερα κατειλημμένα μοριακά τροχιακά (HOMO), ενώ τα διεσπαρμένα π* τροχιακά αποτελούν χαμηλότερα μη κατειλημμένα μοριακά τροχιακά (LUMO). Στους οργανικούς ημιαγωγούς το π τροχιακό (HOMO) αποτελεί τη ζώνη σθένους, ενώ το π*

τροχιακό (LUMO) αποτελεί τη ζώνη αγωγιμότητας. Η διαφορά ανάμεσα στα επίπεδα ενέργειας των HOMO και LUMO αποτελεί το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, το οποίο κυμαίνεται ανάμεσα σε 1 – 4 eV. Όλα τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας με ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή του ενεργειακού διακενου μπορούν να απορροφηθούν. Μετά την απορρόφηση ενός φωτονίου από κάποιο ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από το π τροχιακό στο π^* τροχιακό και δημιουργείται μια οπή στο π τροχιακό.



Σχήμα 4-1. Παράδειγμα π - δεσμού και σ - δεσμού.

4.2 Το φωτοχημικό φαινόμενο στους οργανικούς ημιαγωγούς

Σε αντίθεση με τους ανόργανους ημιαγωγούς, όπου το ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται μετά την απορρόφηση του φωτονίου, στους οργανικούς ημιαγωγούς δημιουργείται ένα ζεύγος οπής ηλεκτρονίου το οποίο συνεχίζει να παρουσιάζει ελκτικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις (Coulomb). Το ζεύγος οπής ηλεκτρονίου ονομάζεται εξιτόνιο και συνεχίζει να κινείται εντός του υλικού ως μία οντότητα. Το τυπικό μήκος διάχυσης ενός εξιτονίου είναι της τάξης των 10 nm.

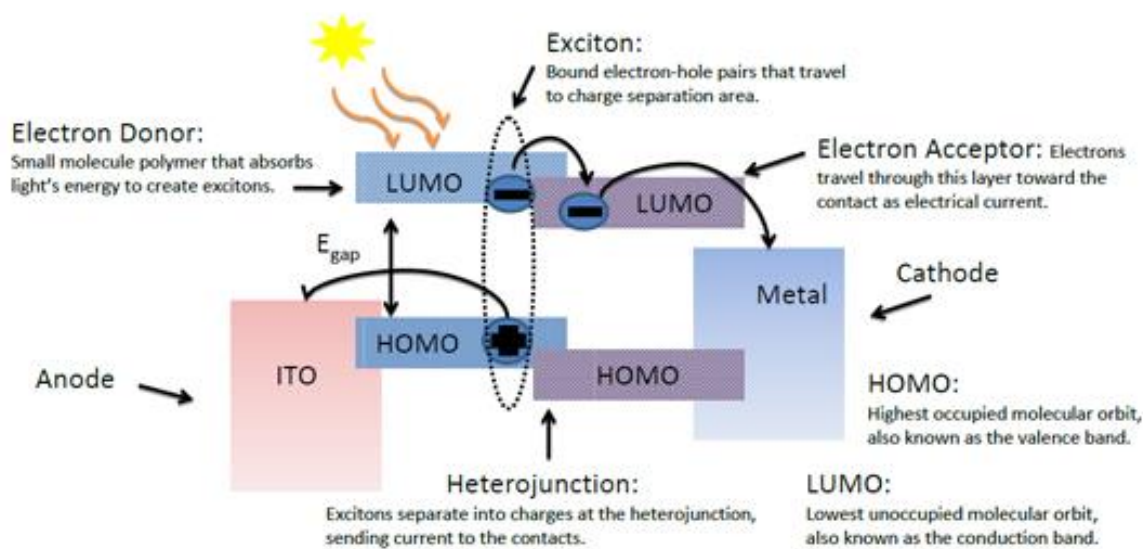
Γενικότερα, τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην ζώνη αγωγιμότητας δέχονται ελκτικές δυνάμεις Coulomb από τις αντίστοιχες οπές. Τα εξιτόνια μπορεί να θεωρηθούν ως εξιτόνια Frenkel, εάν τα ζεύγη οπών – ηλεκτρονίων είναι περιορισμένα σε ένα μόριο ή ως Wannier-Mott εάν έχουν επεκταθεί σε πολλά μόρια. Η ενδιάμεση περίπτωση όπου το εξιτόνιο εντοπίζεται σε μερικά μόνο παρακείμενα μόρια μπορεί να ονομαστεί φορέας φορτίου (charge transfer).

Για την αποτελεσματική λειτουργία μίας οργανικής φωτοβολταϊκής διάταξης απαιτείται να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός του ζεύγους οπής ηλεκτρονίου εντός 10 nm από το σημείο απορρόφησης του φωτονίου. Τα εξιτόνια μπορούν να διαχωριστούν σε ηλεκτρόνια και οπές στις περιοχές ένωσης μετάλλου πολυμερούς ή μεταξύ μορίων που διαθέτουν διαφορετικές ιδιότητες, δέκτη και δότη (ετεροεπαφές). Επίσης ο διαχωρισμός των εξιτονίων μπορεί να πραγματοποιηθεί εντός ενός ηλεκτρικού πεδίου, με ισχύ κατάλληλη

ώστε να υπερνικηθούν οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις Coulomb μεταξύ ηλεκτρονίων και οπών.

Στα πολυμερή φωτοβολταϊκά, για να ενισχυθεί ο διαχωρισμός των εξιτονίων αλλά και να ελαχιστοποιηθεί ο ρυθμός επανασύνδεσης των ζευγών οπών – ηλεκτρονίων, μπορεί να γίνει εισαγωγή ενός ανόργανου ή οργανικού υλικού το οποίο λειτουργεί ως αποδέκτης και αγωγός ηλεκτρονίων. Η ανάμιξη των δύο υλικών, του πολυμερούς δότη, που παρέχει ηλεκτρόνια και του ανόργανου ή οργανικού δημιουργεί επαφές δύο διαφορετικών υλικών που καλούνται ετεροεπαφές (heterojunctions). Σε αυτές τις επαφές δημιουργείται εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί τον διαχωρισμό των εξιτονίων. Κατόπιν το πολυμερές δότης μεταφέρει τις οπές και ο ανόργανος ή οργανικός δέκτης μεταφέρει τα ηλεκτρόνια στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι μια πυκνή δομή ετεροεπαφών στο σύνθετο υλικό εξασφαλίζει υψηλότερη απόδοση κατά τον διαχωρισμό των εξιτονίων και τη μεταφορά φορτίου.

Operation of Organic Solar Cell



Σχήμα 4-2 Σχηματική παράσταση εφαρμογής του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε οργανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.

4.3 Υλικά οργανικών φωτοβολταϊκών

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια κατηγοριοποίηση των υλικών που χρησιμοποιούνται στα οργανικά φωτοβολταϊκά ανάλογα με τις μηχανικές του ιδιότητες και τη μέθοδο επεξεργασίας τους: διαλυτά, μη διαλυτά και υγρά κρυσταλλικά. Στην κατηγορία των διαλυτών περιλαμβάνονται βαφές και πολυμερή, στα υγρά κρυσταλλικά περιλαμβάνονται

επίσης βαφές και πολυμερή, ενώ στα μη διαλυτά περιλαμβάνονται χρωστικές ουσίες και πολυμερή.

Στις χρωστικές ουσίες που λαμβάνουν μέρος στη δημιουργία πολυμερών περιλαμβάνονται το περυλένιο, φθαλοκυανίνη ή διάφορες μεταλλο – φθαλοκυανίνες, φουλερένιο και το πεντακένιο.

Ανάλογα με την μοριακή δομή τους και τη χημική σύστασή τους τα πολυμερή μπορούν να είναι διαλυτά, μη διαλυτά ή υγρά κρυσταλλικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως δότες είτε ως δέκτες στα οργανικά φωτοβολταϊκά.

Μία νεότερη κατηγορία υλικών που χρησιμοποιείται στα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι οι υγροί κρύσταλλοι. Οι υγροί κρύσταλλοι προσφέρουν υψηλή κινητικότητα φορέων φορτίου και μεγαλύτερα μήκη διάχυσης εξιτονίων (100 nm). Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά είναι αρκετά σημαντικά για τα οργανικά φωτοβολταϊκά. Μάλιστα πρόσφατα επιτεύχθηκε απόδοση 9,3% σε οργανικό φωτοβολταϊκό υγρών κρυστάλλων.[]

Για ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών οι υγροί κρύσταλλοι εμφανίζουν μια φάση κατά την οποία διαθέτουν ανάμικτες ιδιότητες. Σε συγκεκριμένη περιοχή θερμοκρασιών τα μόρια των υγρών κρυστάλλων τείνουν να διαταχθούν σε μια κανονισμένη δομή, όπως οι στερεοί κρύσταλλοι, αλλά εμφανίζουν κάποιες μηχανικές ιδιότητες στερεών.

4.4 Διεργασίες κατασκευής οργανικών φωτοβολταϊκών

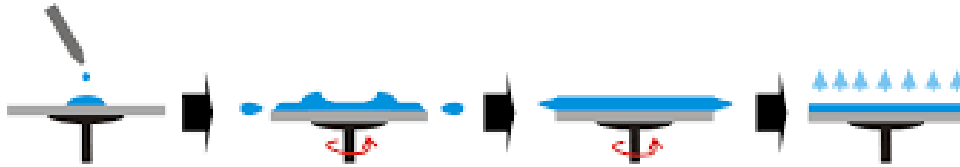
Ακολούθως παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες βασικές μέθοδοι κατασκευής οργανικών φωτοβολταϊκών.

4.4.1 Επίστρωση εκ περιστροφής (spin coating)

Η διεργασία της επίστρωσης εκ περιστροφής περιλαμβάνει τη διάλυση του πολυμερούς σε κατάλληλο διαλύτη και την εναπόθεση του σε περιστρεφόμενο υπόστρωμα (γυαλί , πλαστικό). Κατά την εναπόθεση, το υπόστρωμα μπορεί να είναι είτε ακίνητο είτε να περιστρέφεται με χαμηλή γωνιακή ταχύτητα. Οι συγκολλητικές δυνάμεις στη διεπιφάνεια υγρού – υποστρώματος και οι φυγόκεντρες δυνάμεις που ασκούνται στο περιστρεφόμενο υγρό έχουν σαν αποτέλεσμα το άπλωμα του διαλύματος στο υπόστρωμα, μέσω της ακτινική ροής, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του εξωθείται από το υπόστρωμα.

Συγχρόνως , η εξάτμιση του διαλύτη έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας του διαλύματος και συνεπώς του ιξώδους του. Έτσι, δημιουργείται μια βαθμίδα συγκέντρωσης στο υγρό υμένιο , η οποία μετά την εξάτμιση του εναπομείναντος διαλύτη έχει ως επακόλουθο τη δημιουργία ενός πρακτικά ομοιογενούς και στέρεου λεπτού υμενίου . Το πάχος του λεπτού υμενίου καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του υποστρώματος, τη συγκέντρωση του διαλύματος, την πητικότητα του διαλύτη και το

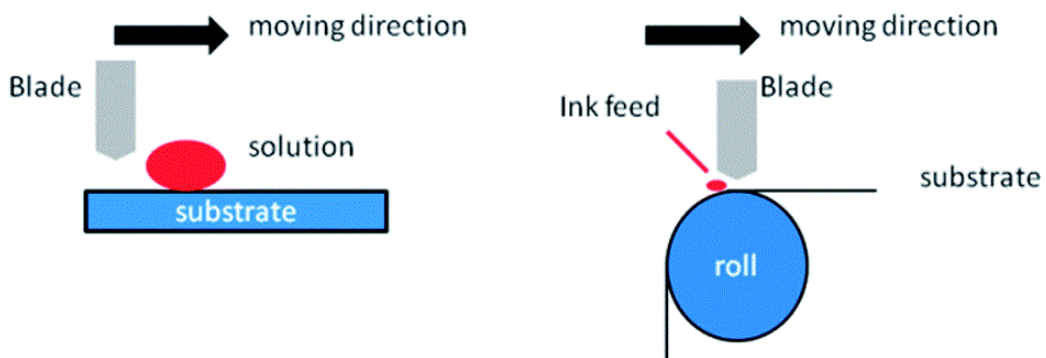
χρόνο περιστροφής . Όσο πιο υψηλή είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του υποστρώματος , τόσο πιο λεπτό υμένιο προκύπτει, ενώ πυκνότερα διαλύματα οδηγούν σε υμένια με μεγαλύτερο πάχος.



Σχήμα 4-3 Διαδικασία επίστρωσης εκ περιστροφής

4.4.2 Εναπόθεση οργανικών υλικών με Doctor Blading

Μία άλλη τεχνική κατάλληλη για μαζική παραγωγή είναι η doctor blading, όπου έχουμε εναπόθεση διαλύματος πάνω σε κάποιο υπόστρωμα και στη συνέχεια κίνηση μιας λεπίδας, η οποία επιτρέπει μόνο μία στρώση πολυμερούς πάχους κάποιον μm να παραμείνει στο υπόστρωμα. Με την κίνηση της λεπίδας εξασφαλίζεται η εναπόθεση διαλύματος πολυμερούς πάνω στο υπόστρωμα. Το πάχος του δημιουργούμενου υμενίου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η συγκέντρωση, το ιξώδες του διαλύματος, η απόσταση της λεπίδας από το υπόστρωμα και η θερμοκρασία.



Σχήμα 4-4 Διαδικασία εναπόθεσης με doctor blading.

4.4.3 Εναπόθεση οργανικών υλικών με εκτύπωση

Με την εναπόθεση οργανικών υλικών μέσω εκτύπωσης επί υποστρωμάτων επιτυγχάνεται η μαζική παραγωγή οργανικών φωτοβολταϊκών με χαμηλό κόστος παραγωγής. Διακρίνονται διάφοροι τύποι εκτύπωσης όπως flexo printing, εκτύπωση μικροεπαφών, νάνο-αποτύπωση, εκτύπωση οθόνης, ψεκασμού μελάνης, εκτύπωση με χρήση laser. Κατά την εκτύπωση οθόνης πραγματοποιείται εναπόθεση διαλύματος μέσω μασκών στοιχείων του οργανικού φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 4-5 Διαδικασία εναπόθεσης μέσω εκτύπωσης.

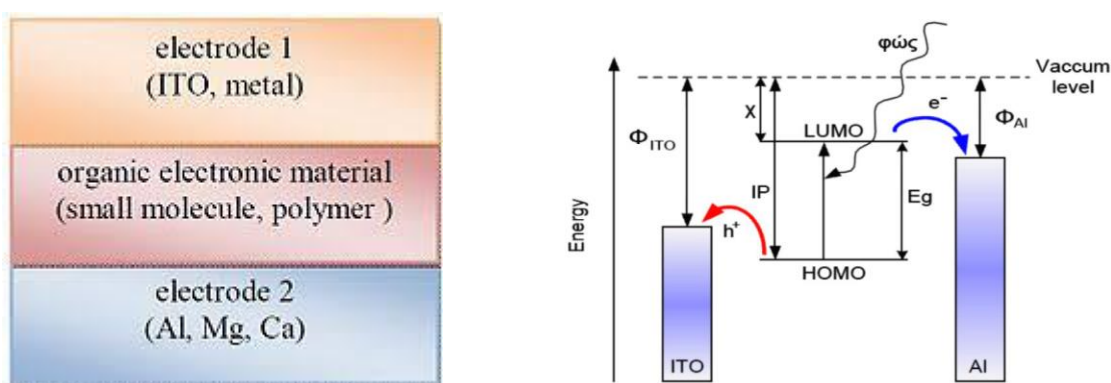
4.5 Διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επικρατέστερες διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών με την σειρά που αναπτύχθηκαν.

4.5.1 Μονοστρωματικές διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών

Κατά την αναπτυξιακή πορεία των οργανικών φωτοβολταϊκών διατάξεων εμφανίστηκαν αρχικά, μονοστρωματικές φωτοβολταϊκές διατάξεις αποτελούμενες από μία επίστρωση πολυμερούς, ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια (οξειδίο ινδίου κασσιτέρου ITO και αλουμίνιο), ένα εκ των οποίων είναι διάφανο (τα λεπτά στρώματα ITO παρουσιάζουν διαφάνεια). Οι διατάξεις αυτές πρωτοεμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1950 χρησιμοποιώντας φθαλοκυανίνη μαγνησίου. Νεότερες διατάξεις χρησιμοποιούν p – φαινυλένιο βινυλένιο (PPV) πάχους 50 – 320 nm ως οργανικό υλικό.

Το ηλεκτρικό πεδίο που απαιτείται για την διάσπαση των εξιτονίων σε σπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια προέρχεται από τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλει στην μεταφορά και συλλογή των φορτίων στα ηλεκτρόδια. Στις φωτοβολταϊκές διατάξεις αυτού του είδους η διάσπαση των εξιτονίων πραγματοποιείται κυρίως στις περιοχές επαφής με τα ηλεκτρόδια, μιας και το μήκος διάχυσης των εξιτονίων δεν ξεπερνά τα 10 nm συμπεραίνουμε ότι μόνο ένα μικρό τμήμα του υλικού λαμβάνει μέρος στην φωτοβολταϊκή μετατροπή. Επίσης διαπιστώνουμε ότι η διαφορά δυναμικού των ηλεκτροδίων δεν δημιουργεί αρκετά ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο ώστε να έχουμε αποδοτική διάσπαση των εξιτονίων.



Σχήμα 4-6 Σχηματικό διάγραμμα δομής και λειτουργικό διάγραμμα διάταξης μονοστρωματικού οργανικού φωτοβολταϊκού.

Ακόμη, στις μονοστρωματικές διατάξεις τα ηλεκτρόνια και οι σπές διαχέονται εντός του ίδιου υλικού με αποτέλεσμα ο ρυθμός επανασύνδεσης να είναι υψηλός. Οι αποδόσεις των

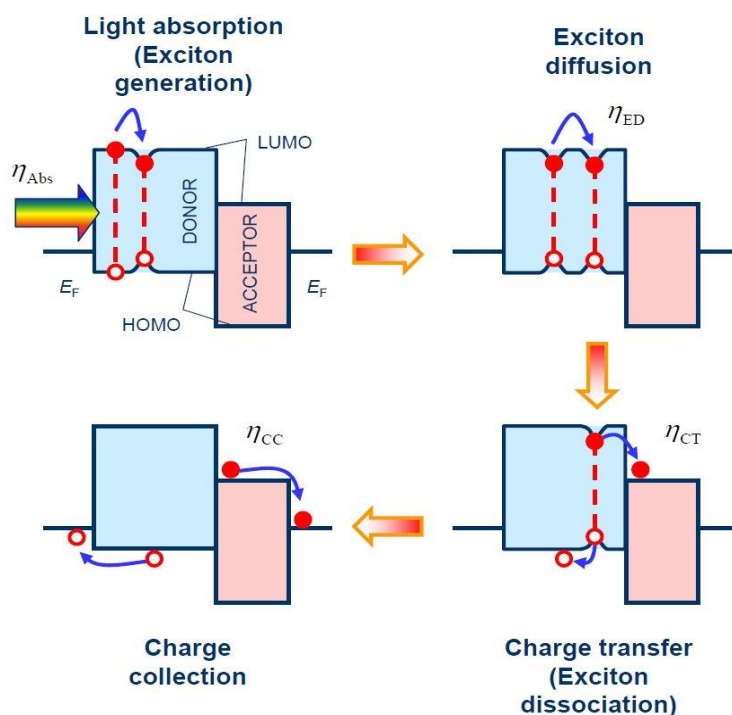
μονοστρωματικών διατάξεων παρουσιάζουν χαμηλότερες αποδόσεις από ότι οι υπόλοιπες κατηγορίες με τιμές από 0,1% μέχρι 4% .

4.5.2 Διστρωματικές διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών

Στη συνέχεια της εξελικτικής πορείας των οργανικών φωτοβολταϊκών διατάξεων κατασκευάστηκαν διστρωματικές οργανικές διατάξεις με ετεροδεσμούς (heterojunctions, 1985, Tang) που περιλαμβάνουν ένα στρώμα δότη και ένα στρώμα δέκτη ηλεκτρονίων ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια. Με αυτήν την τοπολογία αντιμετωπίστηκε, σε κάποιο βαθμό, το πρόβλημα των συχνών επανασυνδέσεων οπών και ηλεκτρονίων μιας και τα φορτία οδεύουν σε δύο διαφορετικά υλικά.

Λόγω της περιοχής ετεροεπαφής δότη και δέκτη αυξήθηκε το μήκος διάχυσης των εξιτονίων στα 20 nm περίπου (10 nm στον δότη και 10 nm στον δέκτη). Με την χρήση διαφορετικών υλικών για τον δότη και δέκτη επιτυγχάνεται καλύτερη ρύθμιση του ενεργειακού κενού με αποτέλεσμα να απορροφάται καλύτερα η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Στις διστρωματικές διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών η απορρόφηση των φωτονίων γίνεται στην περιοχή του δότη με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να μεταβαίνουν από τη ζώνη σθένους (HOMO) στη ζώνη αγωγιμότητας (LUMO) δημιουργώντας οπές. Στη συνέχεια οι φορείς φορτίου οδεύουν προς τα ηλεκτρόδια μέσα από διαφορετικά υλικά.



Σχήμα 4-7 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας διάταξης διστρωματικού οργανικού φωτοβολταϊκού.

Ορισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν δότες και δέκτες στα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι: φθαλοκυανίνη χαλκού (CuPc) σαν δότης σε συνδυασμό με παράγωγα τετρακαρβοξυλικού περυλενίου (PV) σαν δέκτη με απόδοση 1%. Στην περίπτωση Αντικατάστασης του δέκτη με φουλερένιο (C_{60}), όπου το μήκος διάχυσης εξιτονίων είναι 20 nm, η απόδοση του συστήματος ανέρχεται στο 3,5%

4.5.3 Διατάξεις οργανικών φωτοβολταϊκών διεσπαρμένης ετεροεπαφής

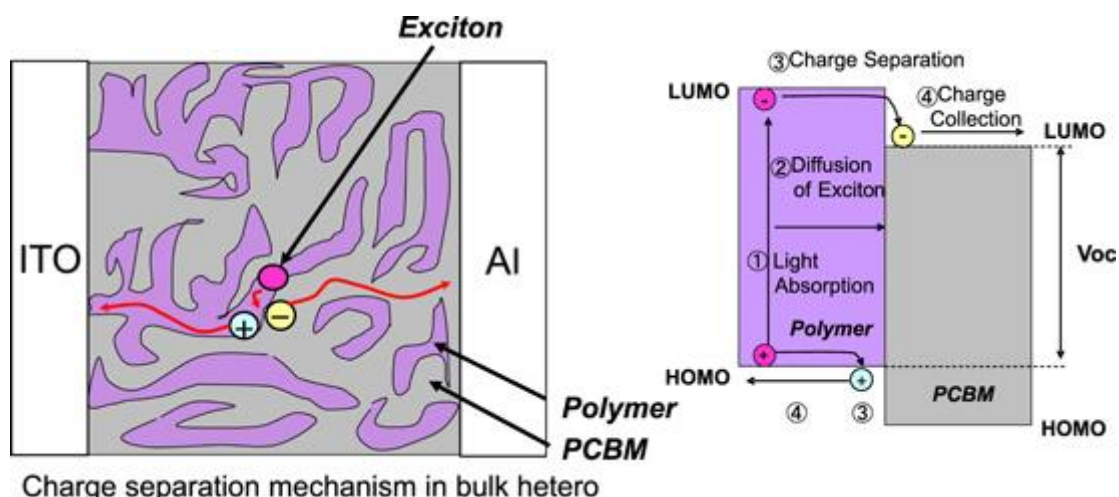
Όπως είδαμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο τα διστρωματικά οργανικά φωτοβολταϊκά περιλαμβάνουν μια περιοχή επαφής ανάμεσα στον δότη και τον δέκτη, με αποτέλεσμα η επιφάνεια όπου διασπώνται τα εξιτόνια να είναι σχετικά περιορισμένη. Σε συνέχεια των ερευνών αναπτύχθηκαν διατάξεις (Yu, 1995) όπου ποσότητες δότη εισήχθησαν στο υλικό δέκτη με αποτέλεσμα η συνολική επιφάνεια επαφής δότη – δέκτη να αυξηθεί κατά πολύ.

Έτσι δημιουργήθηκαν διατάξεις όπου οπουδήποτε μέσα στο υλικό βρίσκονται διεσπαρμένες επαφές δότη – δέκτη σε αποστάσεις nm, τέτοιες ώστε να είναι διπλάσιες της περιοχής διάχυσης εξιτονίων σε πολυμερή ($2 * 10$ nm).

Το στρώμα διεσπαρμένων ετεροεπαφών δημιουργείται συνήθως από ένα διάλυμα που περιέχει τα δύο συστατικά. Στη συνέχεια επέρχεται χύτευση του διαλύματος και ακολούθως επίστρωση εκ περιστροφής (spin coating). Ακολούθως επέρχεται διαχωρισμός συνήθως μέσω σταδίου ανόπτησης. Τα δύο συστατικά αυτο-διατάσσονται διεισδύοντας το ένα εντός του άλλου δημιουργώντας ένα δίκτυο οδεύσεων για τα ηλεκτρόνια και τις οπές.

Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε δομές διεσπαρμένων ετεροεπαφών είναι το μίγμα poly[2-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylene vinylene], [MEH-PPV], σαν δότης ηλεκτρονίων και cyano-PPV σαν δέκτης ηλεκτρονίων. Ένα επόμενο εξελικτικό βήμα ήταν η χρήση πολυ(3-εξυλοθειοφαίνιο) (P3HT) ως πολυμερές μεταφοράς οπών σε συνδυασμό με PCBM.

Τα συστήματα διεσπαρμένων ετεροεπαφών δίνουν την δυνατότητα ρύθμισης του ενεργειακού τους διακένου επιτρέποντας την απορρόφηση ευρύτερου φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και αύξηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 4-8 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας διάταξης διεσπαρμένης ετεροεπαφής οργανικού φωτοβολταϊκού.

4.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα οργανικών φωτοβολταϊκών διατάξεων

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος τα οποία παρουσιάζουν δυνατότητα υψηλού ρυθμού βιομηχανικής παραγωγής (διαδικασίες roll to roll), χαμηλό κόστος πρώτων υλών και παραγωγής, μικρό βάρος, ελαστικότητα, διαφάνεια. Επίσης τα οργανικά φωτοβολταϊκά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μαλακές εφαρμογές (υφάσματα). Η επεξεργασία τους περιλαμβάνει σχετικά απλές μεθόδους που δεν απαιτούν διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών. Ένα ακόμα πλεονέκτημα το οργανικών φωτοβολταϊκών είναι ότι λόγω του ρυθμιζόμενου ενεργειακού διακένου τους μπορούν να λειτουργήσουν και με διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.

Στον αντίποδα, τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα που δεν έχει γίνει να αντιμετωπισθούν ακόμα. Μερικά από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι η μικρή απόδοση των οργανικών φωτοβολταϊκών σε σχέση με τα ανόργανα φωτοβολταϊκά, η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής τους (λιγότερο από μία δεκαετία), η ευαισθησία των οργανικών σε διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως το οξυγόνο και η υγρασία,

Κεφάλαιο 5

Νεότερα είδη Φωτοβολταϊκών τρίτης γενιάς

5.1 Φωτοευαίσθητα φωτοβολταϊκά υλικά (Dye sensitized solar cells – DSSC)

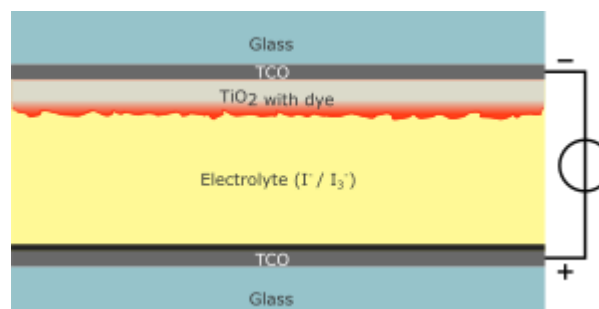
Οι φωτοευαίσθητες (χρωμοευαισθητοποιημένες) φωτοβολταϊκές κυψέλες (DSSC ή DSC) είναι φωτοβολταϊκά υλικά με μορφή λεπτού ιμενίου (thin film). Εντάσσονται και αυτές στις τρίτης γενιάς φωτοβολταϊκές κυψέλες. Αρχικά μελετήθηκαν από τους Gerischer et al στα τέλη της δεκαετίας του 60, οι οποίοι υποστήριξαν ότι μπορεί να εφαρμοσθεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε φωτοβολταϊκά που περιλαμβάνουν οργανικές βαφές .

Μετά την ανακάλυψη των φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών στα τέλη του 1960 και στις αρχές του 1970, συγκέντρωσαν το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών και έγιναν αντικείμενο ί πολλών εργασιών, κυρίως στον τομέα των κατάλληλων ηλεκτροδίων, ηλεκτρολυτών, καθώς και σε νέους τρόπους αύξησης της απόδοσής τους.

Η πρώτη υλοποίηση φωτοευαίσθητου φωτοβολταϊκού πραγματοποιήθηκε σε ένα ηλεκτρόδιο οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) το οποίο είχε καταστεί φωτοευαίσθητο μέσω οργανική βαφής με βάση τη χλωροφύλλη. Σε αυτήν την περίπτωση φωτόνια προσπίπτουν και δημιουργούν ζεύγη οπών – ηλεκτρονίων σε μόρια οργανικής βαφής, που διαθέτουν ένα ευρύ ενεργειακό διάκενο. Τα φωτοευαίσθητα φωτοβολταϊκά έχουν ελαφρώς διαφορετικές ιδιότητες, καθώς και δομή, από τα υπόλοιπα οργανικά φωτοβολταϊκά.

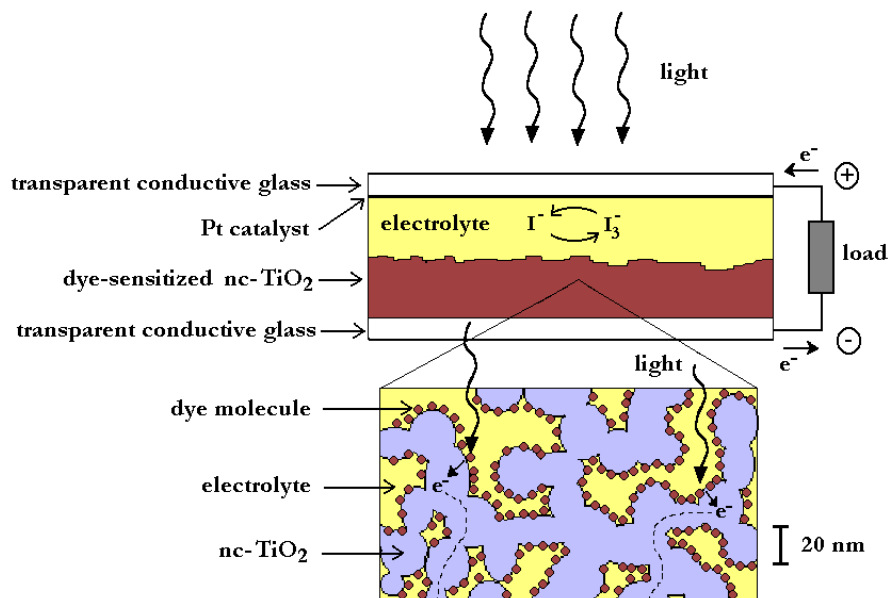
5.2 Δομή φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών υλικών

Η δομή που ακολουθείται στα φωτοευαίσθητα φωτοβολταϊκά διαφέρει στην ύπαρξη στρώματος υγρού ηλεκτρολύτη ανάμεσα στα μόρια οργανικής βαφής, όπου διεγείρονται τα ηλεκτρόνια και στα ηλεκτρόδια της καθόδου.



Σχήμα 5-1 Σχηματικό διάγραμμα κατασκευής διάταξης φωτοευαίσθητου φωτοβολταϊκού.

Τα φωτοευαίσθητα φωτοβολταϊκά αποτελούνται από ένα υπόστρωμα υγρού ιωδιούχου ηλεκτρολύτη και από διαφανές διοξείδιο του Τιτανίου (TiO_2) επικαλυμμένο με μια οργανική φωτοευαίσθητη βαφή που αποτελεί την άνοδο της διάταξης. Για την συλλογή των οπών υπάρχει μια άνοδος πλατίνας.



Σχήμα 5-2 Διάγραμμα κατασκευής διάταξης φωτοευαίσθητου φωτοβολταϊκού

5.3 Αρχές λειτουργίας φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών υλικών

Η διαδικασία της απορρόφησης φωτός και η διαδικασία μεταφοράς φορτίου διαφοροποιείται στα φωτοευαίσθητα φωτοβολταϊκά. Το φως απορροφάται από έναν ευαίσθητοποιητή (βαφή), ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος σε επιφάνεια ημιαγωγού με εύρος ενεργειακού φάσματος 3 eV (στη γενική περίπτωση). Ο διαχωρισμός των φορτίων λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια μέσω της διάχυσης ηλεκτρονίων μεταξύ της βαφής, του ημιαγωγού και του ηλεκτρολύτη.

Όταν ένα DSSC εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, φωτόνια διαπερνούν το διαφανές ηλεκτρόδιο, προσπίπτουν στην επίστρωση βαφής και διεγείρουν ηλεκτρόνια της φωτοευαίσθητης βαφής. Η διέγερση και ο διαχωρισμός των ηλεκτρονίων λαμβάνει χώρα μόνο στην επιφάνεια επαφής της βαφής με το διοξείδιο του τιτανίου. Στη συνέχεια τα διεγυρόμενα ηλεκτρόνια διαχέονται μέσω του διαφανούς ηλεκτροδίου διοξειδίου του

τιτανίου, όπου και συλλέγονται. Ενώ οι οπές διαχέονται εντός του ηλεκτρολύτη και συλλέγονται από το ηλεκτρόδιο (πλατίνα, αλουμίνιο, ή γραφίτη) της καθόδου.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι όσο πιο μεγάλη είναι η επιφάνει επαφής, τόσο αποδοτικότερη είναι η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Λόγω της πορώδους επιφάνειας του διοξειδίου του τιτανίου η επιφάνεια επαφής με την βαφή είναι αυξημένη σε σχέση με προγενέστερες υλοποιήσεις.

Αναλυτικότερα, τα DSSC αποτελούνται από τέσσερα κυρίως μέρη. Ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο, βρίσκονται σωματίδια διοξειδίου του τιτανίου τα οποία είναι επικαλυμμένα με φωτοευαίσθητη επίστρωση. Τα σωματίδια περιβάλλονται από έναν ηλεκτρολύτη.

Η άνοδος είναι διαφανής ώστε να επιτρέπει την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ένας ηλεκτρολύτης, ο οποίος συνήθως είναι ιωδιούχος, συμπληρώνει τα κενά ανάμεσα στα νανοσωματίδια και υποβοηθά τη διάχυση οπών από τα μόρια της επίστρωσης προς το ηλεκτρόδιο της καθόδου.

Η διαδρομή διάχυσης των ηλεκτρονίων από την περιοχή της φωτοευαίσθητης βαφής έως την άνοδο μπορεί να είναι περίπλοκη, καθώς τα ηλεκτρόνια κινούνται τυχαίως μέσω των νανοσωματιδίων. Πρακτικά το μέγεθος και η πυκνότητα των νανοσωματιδίων διοξειδίου του τιτανίου επηρεάζουν τη διαδρομή των ηλεκτρονίων. Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των νανοσωματιδίων τόσο μικρότερη είναι η απόδοση της διάταξης. Παρόλα αυτά όσο μικρότερο το μέγεθος των νανοσωματιδίων σε συγκεκριμένο όγκο τόσο πιο μεγάλη η επιφάνεια της φωτοευαίσθητης επίστρωσης. Η δημιουργία όσο το δυνατόν μεγαλύτερης φωτιζόμενης επιφάνειας και αποδοτικότερων οδεύσεων διάχυσης ηλεκτρονίων προς το ηλεκτρόδιο, αποτελεί μία από τις προκλήσεις της κατασκευής φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών.

5.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών

Τα φωτοευαίσθητα φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα ανόργανα φωτοβολταϊκά:

- Αποτελούν υλικά χαμηλού κόστους.
- Μπορούν να κατασκευασθούν με ρυθμούς μαζικής παραγωγής με διεργασίες που δεν απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες.
- Μπορούν να λειτουργήσουν σε καταστάσεις χαμηλής ηλιακής έντασης. Αυτό το γεγονός τα καθιστά κατάλληλα για χρήση ακόμη και σε εφαρμογές εσωτερικών χώρων.

- Μπορούν να λειτουργήσουν με χαμηλότερη εσωτερική θερμοκρασία ακόμα και σε συνθήκες θερμού περιβάλλοντος.
- Το ενεργειακό διάκενο του φωτοευαίσθητου φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα μεταβάλλοντας τη σύσταση της φωτοευαίσθητης βαφής

Βέβαια, όπως συμβαίνει με όλες τις νέες τεχνολογίες, παρουσιάζονται κάποια μειονεκτήματα τα οποία μένει να αντιμετωπισθούν. Τα βασικότερα εξ αυτών είναι:

- Ότι ο βαθμός απόδοσης των φωτοευαίσθητων φωτοβολταϊκών είναι χαμηλότερος από τον βαθμό απόδοσης των ανόργανων φωτοβολταϊκών,
- Η ύπαρξη η πιθανότητας διάσπασης του υλικού βαφής
- Η ευαισθησία σε ακραίες θερμοκρασίες, όπου μπορεί να επέλθει ρήξη του υλικού ενθυλάκωσης και διαρροή του υγρού ηλεκτρολύτη.

5.5 Πρόσφατες εξελίξεις στα χρομοευαίσθητα φωτοβολταϊκά

Σχετικά πρόσφατα δημιουργήθηκε διάταξη φωτοευαίσθητου φωτοβολταϊκού με απόδοση της τάξης του 6,7%. Η διάταξη αυτή πέρα από τον υλικό δέκτη διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) περιλαμβάνει νανοσωματίδια κρυσταλλικής δομής διοξειδίου του κασσιτέρου.

Η εισαγωγή των νανοκρυστάλλων του κασσιτέρου παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Αύξηση της επιφάνειας στην οποία επικάθεται η φωτοευαίσθητη βαφή, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική επιφάνεια επαφής του δότη (βαφής) και του φορέα.
- Υψηλότερη κινητικότητα φορτίων, η οποία συνεπάγεται υψηλότερη ταχύτητα ηλεκτρονίων.
- Καταστολή επανασύνδεσης φορέων.

5.6 Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες πολλαπλών στρωμάτων (TSC) αναπτύχθηκαν με σκοπό να αντιμετωπίσουν ορισμένα ελαττώματα των συμβατικών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Κάθε υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή φωτοβολταϊκών μπορεί να εκμεταλλευθεί ένα συγκεκριμένο περιοχή φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Για να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση απορρόφησης φωτονίων χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερες επιστρώσεις

υλικών με διαφορετικά ενεργειακά διάκενα τα οποία συνενώνονται για την υλοποίηση ενός πολυστρωματικού φωτοβολταϊκού. Το φωτοευαίσθητο υλικό με μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο συλλέγει φωτόνια με υψηλότερη ενέργεια ενώ το έτερο υλικό με μικρότερο ενεργειακό διάκενο συλλέγει φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας.

Εφόσον χρησιμοποιούνται υλικά με διαφορετικά ενεργειακά διάκενα, αυτά κατανέμονται χωρικά σε φθίνουσα σειρά, με το υλικό που διαθέτει το μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο πρώτο και αυτά με μικρότερα ενεργειακά διάκενα να ακολουθούν στη συνέχεια. Η συνολική τάση εξόδου της διάταξης αποτελείται από τις τάσεις εξόδου των επιμέρους υποστρωμάτων συνδεδεμένες σε σειρά.

5.7 Φωτοβολταϊκά στοιχεία με Κβαντικές Τελείες (Quantum Dot Solar Cell)

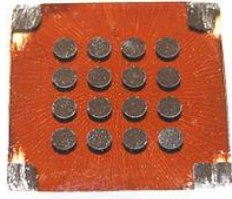
Στην προσπάθεια κατασκευής φωτοβολταϊκών τα οποία δεν κάνουν χρήση υλικών πρώτης (πυρίτιο) και δεύτερης γενιάς (CIGS, CdTe, a-Si) προέκυψαν αρκετές τεχνολογίες. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι κάποιες τεχνολογίες που επηρεάζουν τον τομέα των ημιαγωγών και εφαρμόζονται στον τομέα της ηλεκτρονικής, βρίσκουν εφαρμογή και στον τομέα παραγωγής φωτοβολταϊκών. Μία από τις νεότερες και πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες αποτελεί αυτή των κβαντικών τελείων.

Οι κβαντικές τελείες αποτελούν πολύ μικρά ημιαγωγιμα σωματίδια τα οποία διαθέτουν διαστάσεις λίγων νανομέτρων. Η ιδιαιτερότητα των quantum dot έγκυται στο ότι οι ιδιότητές τους εξαρτώνται από το μέγεθός τους. Έτσι μια σχετικά μεγάλη κβαντική τελεία (ακτίνας 5 – 6 nm) απορροφά υψηλότερης συχνότητας ακτινοβολία, ενώ μια μικρότερη (ακτίνας 2 – 3 nm) απορροφά χαμηλότερης συχνότητας ακτινοβολία.

Σημαντικότερο στοιχείο αποτελεί ότι με την χρήση κβαντικών τελείων μπορεί να γίνει ρύθμιση του ενεργειακού διακένου της φωτοβολταϊκής διάταξης, έτσι ώστε να απορροφάται ηλιακή ακτινοβολία ακόμα και στην υπέρυθη περιοχή. Το γεγονός αυτό προσδίδει αρκετές δυνατότητες ανάπτυξης και εφαρμογής αυτού του τύπου φωτοβολταϊκών.

Επιπροσθέτως τα φωτοβολταϊκά κβαντικών τελείων είναι εύκολα στο να παρασκευαστούν σε ρυθμούς μαζικής παραγωγής, κάποιες από τις διαδικασίες εφαρμογής περιλαμβάνουν επίστρωση εκ περιστροφής και εκτύπωση roll to roll.

Συμπεραίνουμε ότι τα φωτοβολταϊκά κβαντικών τελείων διαθέτουν πολλές δυνατότητες ανάπτυξης και εφαρμογής.



Σχήμα 5-3 Φωτοβολταϊκό στοιχείο κβαντικών τελείων

6 Συμπεράσματα

Στη διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν οι περισσότερες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών συστημάτων. Παρατηρούμε ότι μπορεί η απόδοση των συστημάτων πρώτης γενιάς (μονοκρυσταλλικό – πολυκρυσταλλικό πυρίτιο) να είναι υψηλή, όμως το κόστος και η ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή τους είναι αρκετά υψηλή.

Οι νέες τεχνολογίες που βρίσκονται υπό ανάπτυξη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6, βελτιώνουν διαρκώς τις αποδόσεις τους. Επίσης τα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς παρουσιάζουν αρκετά χαμηλότερο κόστος, ενώ για τις διεργασίες κατασκευής απαιτούνται αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Επίσης τα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς, λόγω της ελαστικότητάς και διαφάνειάς τους μπορούν να ενσωματωθούν σε κτιριακές κατασκευές και να αποτελέσουν αρχιτεκτονικά στοιχεία.

Συμπεραίνουμε ότι η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος αποτελεί μια από τις σημαντικότερες εναλλακτικές της ανθρωπότητας για την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και την αναστροφή των αρνητικών αποτελεσμάτων της κλιματικής αλλαγής

Βιβλιογραφία

- [1] Φωτοβολταϊκά Συστήματα, από τη θεωρία στην πράξη, Δέρβου Παν. Εκδ. Ε.Μ.Π.
- [2] Understanding Organic Photovoltaic Cells: Electrode, Nanostructure, Reliability, and Performance, Myung-Su Kim, 2009
- [3] Dye Sensitized Solar Cells - Working Principles, Challenges and Opportunities Khalil Ebrahim Jasim
- [4] Dye-sensitized nanostructured and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests, Janne Halme, 2002
- [5] Οργανικά Φωτοβολταϊκά, Πελέκη Μαρία Δανάη, 2013
- [6] p-n Junction Photocurrent Modelling Evaluation under Optical and Electrical Excitation, Constantine T. Dervos 1,*, Panayotis D. Skafidas , John A. Mergos and Panayota Vassiliou
- [7] Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών Στοιχείων, Τετελένης Στέφανος, 2011
- [8] Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων, Kasap, Παπασωτηρίου
- [9] Φυσική στερεάς κατάστασης, Οικονόμου, Παν. Εκδ. Κρήτη.
- [10] Μικροηλεκτρονικά κυκλώματα, Sedra Smith, Παπασωτηρίου
- [11] Sun K, Xiao Z, Lu S, Zajaczkowski W, Pisula W, Hanssen E, White JM, Williamson RM, Subbiah J, Ouyang J, Holmes AB, Wong WWH, Jones DJ. A molecular nematic liquid crystalline material for high-performance organic photovoltaics. Nat Commun. 2015;6(6013). doi:10.1038/ncomms7013[Crossref]
- [12] High Efficiency Dye-sensitized Solar Cells Constructed with Composites of TiO₂ and the Hot-bubbling Synthesized Ultra-Small SnO₂ Nanocrystals Xiaoli Mao, Ru Zhou, Shouwei Zhang, Liping Ding, Lei Wan, Shengxian Qin, Zhesheng Chen, Jinzhang Xu, Shiding Miao, 2016

- [13] <http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/depletion-region.html>
- [14] <https://www.chemheritage.org/historical-profile/alan-g-macdiarmid-alan-j-heeger-and-hideki-shirakawa>
- [15] http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D1_Hmiagogoi_1.pdf
- [16] Physics of solar cells from principles to new concepts, Peter Würfel, Wiley-VCH (2005)
- [17] Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Ι.Ε Φραγκιαδάκης, Ζήτη, (2007)
- [18] <http://plasticphotovoltaics.org/lc/lc-solarcells/lc-introduction.html>
- [19] <http://www.sj-solar.com/technology/>
- [20] <https://www.nrel.gov/>
- [21] <http://www.solar-frontier.com/eng/index.html>
- [22] <https://eecs-newsletter.mit.edu/articles/2011-spring/bulovic-lab-eletha-flores/>
- [23] <http://users.sch.gr/avelentz/CD%20METRSH%20h/theor%20imiagogi.htm>
- [24] <http://www.grandinetti.org>