



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΙΔΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελος Μπαρλαγιάννης

Επιβλέπων: Ιωάννης Αβαριτσιώτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS
SCHOOL OF ELECTRICAL AND
COMPUTER ENGINEERING
DEPARTMENT OF COMMUNICATIONS
ELECTRONICS AND INFORMATION
ENGINEERING

ORGANIC SOLAR CELLS

THESIS

Angelos Barlagiannis

Editor: Ioannis Avaritsiotis
NTUA Professor

Athens, October 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΙΔΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελος Μπαρλαγιάννης

Επιβλέπων: Ιωάννης Αβαριτσιώτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π
Μέλους Δ.Ε.Π

.....

Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π
Ιδίοτητα Μέλους Δ.Ε.Π

.....

Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π Ιδίοτητα
Ιδίοτητα Μέλους Δ.Ε.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

.....
Άγγελος Μπαρλαγιάννης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Άγγελος Μπαρλαγιάννης
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι οργανικές ηλιακές κυψελίδες καθώς και οι συμβατικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών. Στην αρχή γίνεται μια ιστορική ανασκόπηση των φωτοβολταϊκών, από την στιγμή ανακάλυψης της πρώτης ηλιακής κυψελίδας μέχρι σήμερα. Στη συνέχεια εξετάζονται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η υπάρχουσα φωτοβολταϊκή τεχνολογία αντίστοιχα. Εν συνεχεία, γίνεται εκτεταμένη αναφορά στα οργανικά φωτοβολταϊκά. Αναφέρονται οι τεχνικές παραγωγής τους, ο τρόπος λειτουργίας τους, η αποδοτικότητα τους, τα μειονεκτήματα – πλεονεκτήματα, τρόποι βελτίωσης και το κόστος τους. Επίσης εξετάζονται τα είδη υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του ηλεκτροδίου και του αντιηλεκτροδίου των οργανικών φωτοβολταϊκών, ενώ παρατηρείται ο μηχανισμός λειτουργίας των κυψελίδων αυτών, η δομή και η σύνθεσή τους. Στο τέλος γίνεται μία συνοπτική σύγκριση μεταξύ όλων των τύπων φωτοβολταϊκών και παραθέτονται τα σχετικά συμπεράσματα.

Άγγελος Μπαρλαγιάννης

Αθήνα, 2014

Λέξεις κλειδιά

Οργανικά Φωτοβολταϊκά, Απόδοση, Επαφή p-n, Χαρακτηριστικές I-V, Φωτοβολταϊκές Τεχνολογίες, Συζυγή Πολυμερή, Ηλιακά Κύτταρα, Ανόργανα, Οργανικά, πλαίσια, συστοιχείες.

Abstract

In the respective thesis project are being closely examined, the organic solar cells and the conventional photovoltaic technologies. Initially, a historical overview of photovoltaics is presented, from the moment of the first solar cell's invention until today's fast moving technology. Throughout the course of the paper the photovoltaic phenomenon and the existing photovoltaic technology are being discussed respectively. Subsequently, there is an extensive reference to organic photovoltaics where their techniques of production, operating methods, efficiency and degradation with time, advantages – disadvantages, improvement techniques and fabrication cost are being mentioned. In addition, the types of substrates and layers used in the manufacture of the electrode and anti-electrode of photovoltaic panels are thoroughly presented, while the operating mechanism of these cells, their structure and their composition are being observed. In the end a concise comparison between all types of the aforementioned photovoltaics is being carried out and respective conclusion are drawn.

Angelos Barlagiannis

Athens, 2014

Key Words

Organic Photovoltaic, Efficiency, p-n Junction, I-V Characteristics, Photovoltaic Technologies, Polymers, Organic, Inorganic, Solar Cells, Solar Panels.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Ε.Μ.Π. Κο Αβαριτσιώτη για όλη τη στηριξή και την καθοδήγηση που μου παρείχε και έκανε δυνατή τη επίτευξη του στόχου μου. Τους γονείς μου Νίκο και Τζουλιάννα, που μου καθέστησαν δυνατές τις σπουδές μου και ήταν εκεί για οτί χρειάστηκα.

Την αδερφή μου Νικολέτα, για τις πολύτιμες συμβουλές της και την ευητητά της.

Τους συμφοιτητές μου Νίκο, Δέσποινα, Πέτρο και Γεωργία για την πραγματική φιλία τους και τα τόσα πολλά που περάσαμε μαζί όλα αυτά τα χρόνια ωραία και άσχημα.

Τέλος, τους φίλους μου εκτός Ελλάδας Ramona, Evelyn και Nick που πίστεψαν τόσο πολύ σε εμένα και με στήριξαν για να φτάσω στο τέλος.

Κατάλογος περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1. Γενικά.....	10
1.2. Ιστορικό υπόβαθρο.....	12
2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	14
2.1. Ηλιακή Ενέργεια.....	14
2.2. Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	19
2.3. Επαφή p-n.....	21
2.4. Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της διόδου.....	24
3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	27
3.1. Παράμετροι στοιχείων και I-V καμπύλες.....	27
3.2. Φωτοβολταϊκά πλαίσια και συστοιχίες.....	37
3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	41
4. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	49
4.1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια Μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	49
4.2. Φωτοβολταϊκά πλαίσια Πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	51
4.3. Φωτοβολταϊκά πλαίσια Άμορφου πυριτίου.....	52
4.4. Φωτοβολταϊκά πλαίσια Δισεληνοϊνδούχου χαλκού.....	53
4.5. Φωτοβολταϊκά πλαίσια Τελουριούχου Καδμίου (CdTe).....	54
4.6. Φωτοβολταϊκά πλαίσια Αρσενιούχου Γαλλίου (GaAs).....	55
4.7. Φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής HIT.....	57
4.8. Σύγκριση Χαρακτηριστικών I-V διαφόρων τύπων ηλιακών κυττάρων.....	59

4.9. Υποβάθμιση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με το χρόνο.....	66
5. ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ.....	70
5.1. Ιστορική Αναδρομή Οργανικών Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.....	70
5.2. Στοιχεία Θεωρίας Οργανικών Φωτοβολταϊκών.....	72
5.3. Συζυγή πολυμερή.....	76
5.4. Ηλεκτρικές ιδιότητες συζυγών πολυμερών.....	80
5.5. Αρχή λειτουργίας Οργανικών Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.....	89
5.6. Οργανικά Φωτοβολταϊκά μονού στρώματος (Single Layer).....	94
5.7. Οργανικά Φωτοβολταϊκά διπλού στρώματος (Bilayer).....	95
5.8. Οργανικά Φωτοβολταϊκά διεσπαρμένης ετεροεπαφής (Bulk Heterojunction).....	98
5.9. Κύριες κατασκευαστικές τεχνικές φωτοβολταϊκών Πλαισίων.....	101
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	110
6.1. Ερμηνεία των I-V χαρακτηριστικών.....	110
6.1.1. Ανόργανα ηλιακά κύτταρα.....	110
6.1.2. Οργανικά ηλιακά κύτταρα.....	114
6.2. Πλεονεκτήματα.....	119
6.3. Μειονεκτήματα.....	121
6.4. Βελτιώσεις.....	122
6.5. Εφαρμογές οργανικών φωτοβολταϊκών.....	124
6.6. Οικονομικά συμπεράσματα.....	125
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	127

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη μείωση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων και οι δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον από την εκτεταμένη χρήση τους, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στην εκμετάλλευση άλλων, συμβατικών πηγών ενέργειας. Η αυξανόμενη αυτή ενεργειακή κρίση που συντελείται παγκοσμίως αλλά και οι δυνατότητες που παρέχονται με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστά αναγκαία την περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη του κλάδου των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε). Μία από τις συμβατικές αυτές πηγές είναι και η ηλιακή ενέργεια, η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο ανακάλυψε ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel το 1839, κατά τη διάρκεια πειραμάτων του με μία ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Η ανακάλυψη στην οποία προέβει, είχε να κάνει με το γεγονός ότι ορισμένα υλικά παρουσίαζαν την ικανότητα παραγωγής μικρών ποσοτήτων ηλεκτρικού ρεύματος, όταν βρισκόνταν εκτεθειμένα σε ηλιακή ακτινοβολία.

Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο Adams και ο φοιτητής του Day, παρατήρησαν ότι μία ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως.

Το 1918 ο Πολωνός Czochralski, πρόσθεσε τη μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si), η οποία χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα.

Μία σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949, όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν τη θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ, η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει.

Τις δεκαετίες του '40 και του '50, πραγματοποιήθηκαν τα πρώτα βήματα προς την κατεύθυνση της εμπορικής αξιοποίησης των φωτοβολταϊκών με την ανάπτυξη της μεθόδου Czochralski για την παραγωγή κρυσταλλικού πυριτίου υψηλής καθαρότητας. Το πρώτο ηλιακό κύτταρο ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson. Κατασκεύασαν ηλιακό στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου με ικανότητα μετατροπής 6%.

Τα ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία, δεν άργησαν να βρουν εφαρμογή. Το 1958, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιήθηκε σε διαστημικές εφαρμογές, όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard I. Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για οχτώ ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα στο διάστημα. Από το χρονικό αυτό σημείο και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία τους να βελτιώνεται συνεχώς.

Το 1962, η πρώτη μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε ένα φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wp.

Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν λοιπόν να κάνουν την εμφάνισή τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής, η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Οι υψηλές τιμές στα φωτοβολταϊκά, ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε μεγαλύτερη αποδοχή από την αγορά. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοσή τους συνεχώς βελτιωνόταν. Κυριότερος χρήστης των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν, ήταν η NASA [1,2].

Η διείσδυση των φωτοβολταϊκών έγινε με πολύ αργό ρυθμό συγκριτικά με την γρήγορη εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, μία τεχνολογία που επίσης στηρίζεται στα ημιαγώγιμα υλικά . Αυτή η καθυστέρηση οφείλεται κυρίως στις τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές στην παραγωγική διαδικασία κατά την προσπάθειά τους να δημιουργήσουν καθαρά ημιαγώγιμα υλικά.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η ποσότητα του απαιτούμενου υλικού είναι πολύ μεγάλη και η παραγωγή του είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρος. Επίσης απαιτούνται υπέρογκα κεφάλαια για το κόστος του εξοπλισμού αλλά και της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την παραγωγική διαδικασία. Για το λόγο αυτό άλλωστε, προβλέπεται ένα μεγάλο μερίδιο στην αγορά των φωτοβολταϊκών, να καταλάβουν οι τεχνολογίες λεπτού φιλμ (thin film). Στις τεχνολογίες αυτές,

επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της απαιτούμενης ποσότητας του υλικού και συνεπώς μείωση στις τιμές των φωτοβολταϊκών.

Για περαιτέρω εξάπλωση της αγοράς των φωτοβολταϊκών, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η συνεχιζόμενη μείωση του κόστους τους και παράλληλα, η αύξηση της απόδοσής τους. Η μείωση αυτή του κόστους μπορεί να επιτευχθεί κυρίως μέσω της μαζικής παραγωγής, κάτι που ακολουθεί η βιομηχανία των φωτοβολταϊκών καθώς ωριμάζει και μεγεθύνεται. Το κόστος, μπορεί να μειωθεί και μέσω της έρευνας και της ανάπτυξης της τεχνολογίας, οδός που τόσο η βιομηχανία όσο και η κρατική μηχανή επιδιώκουν. Εκτιμάται ότι με την εξάπλωση της αγοράς των φωτοβολταϊκών, είναι δυνατόν να διευρυνθεί η εφαρμογή τους σε όλα τα επίπεδα, από τα απομονωμένα συστήματα έως και τα μεγάλα διασυνδεδεμένα.

Οι προβλέψεις για το άμεσο μέλλον όσον αφορά την αγορά των φωτοβολταϊκών είναι ιδιαίτερα ευοίωνες, τόσο για την καθολική εξάπλωση της τεχνολογίας αυτής παγκοσμίως, όσο και για την καθοδική πορεία στις τιμές τους και την αύξηση της απόδοσής τους [2].

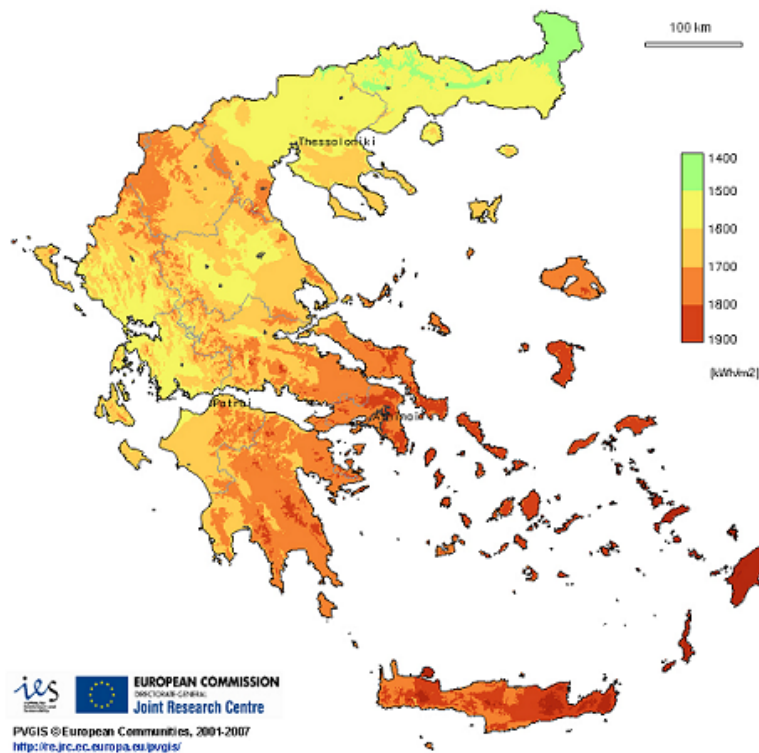
2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

2.1. Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια από τις πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας, δεδομένου ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πολύ μεγάλο εύρος και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ύπαρξη της ζωής στη Γη. Καθορίζει τη θερμοκρασία στην επιφάνειά της και παρέχει ουσιαστικά το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία όλων των φυσικών συστημάτων.

Με μία καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μία τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε μία θερμοκρασία κοντά στους 5.800°K . Η προσπίπτουσα κατά μέσο όρο ροή ενέργειας πάνω σε μία μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα, είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά και ισούται με $S=1367\text{ W/m}^2$. Γενικότερα, η ολική ισχύς από μία πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας, ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας [1].

Η ατμόσφαιρα της γης, μειώνει σημαντικά την ακτινοβολία με τους μηχανισμούς της ανάκλασης, απορρόφησης (από το όζον, τους υδρατμούς, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα) και σκέδασης (από τα μόρια αέρα, σκόνης ή ρύπους). Όταν η ηλιακή ακτινοβολία αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια, συνήθως σε kWh/m^2 . Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία. Στο σχήμα 2.1, φαίνονται τα ποσά πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας ετησίως στην Ελλάδα.

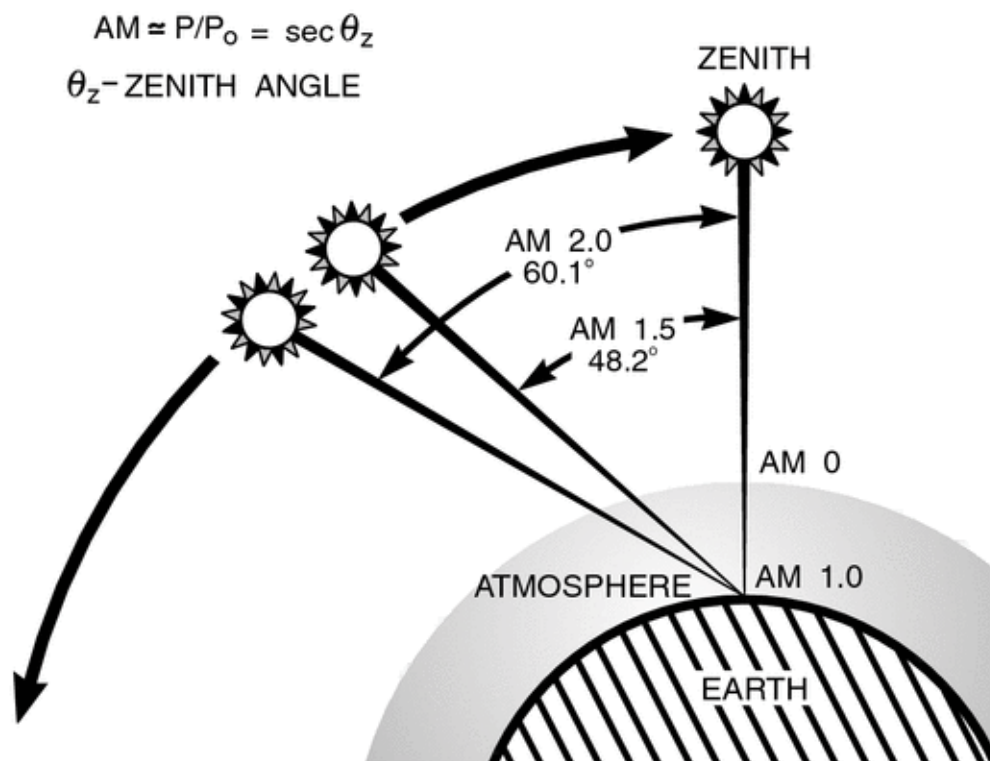


Σχήμα 2.1: Χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα [3]

Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης, συνίσταται από ένα μέρος άμεσης ακτινοβολίας και ένα μέρος διάχυτης. Η άμεση συνιστώσα της ακτινοβολίας, προέρχεται από την κατεύθυνση του ήλιου σε αντίθεση με τη διάχυτη, η οποία σκεδάζεται από τον ουράνιο θόλο και δεν έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση.

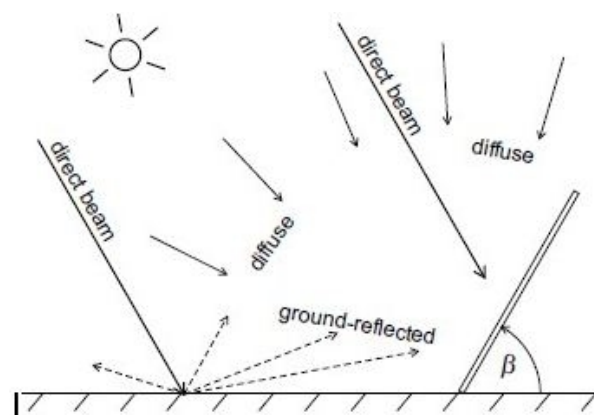
Η ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι φυσικά άκρως μεταβλητή. Επιπλέον, πέρα από την κανονική ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της φαινομένης κίνησης του ήλιου, ακατάστατες μεταβολές (κάλυψη από σύννεφα) προκαλούνται από τις κλιματολογικές συνθήκες καθώς επίσης και τη γενικότερη σύνθεση της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό το λόγο, η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στη λήψη μετρούμενων δεδομένων που

λαμβάνονται στην τοποθεσία εγκατάστασης ή κοντά σε αυτή. Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας στη διαδρομή του ηλιακού φωτός, είναι η μάζα αέρος (A.M), ίση προς το σχετικό μήκος της διαδρομής της απευθείας δέσμης διαμέσου της ατμόσφαιρας. Στη διάρκεια μίας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας στο επίπεδο της θάλασσας, η ακτινοβολία από τον ήλιο, όταν βρίσκεται στο Ζενίθ, αντιστοιχεί σε μάζα αέρος 1. Σε άλλες περιπτώσεις, η μάζα αέρος (A.M), είναι κατά προσέγγιση ίση προς το $1/\cos\theta_z$, όπου θ_z είναι η γωνία του Ζενίθ [1].



Σχήμα 2.2: Ορισμός της μάζας αέρος A.M [4]

Ανάλογα με τις συνθήκες συννεφιάς και την ώρα της ημέρας (γωνία ύψους του ήλιου), η άμεση και διάχυτη ακτινοβολία διαφοροποιούνται σημαντικά. Τις αίθριες ημέρες, η άμεση ακτινοβολία, είναι η μεγαλύτερη συνιστώσα της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, σε πολύ συννεφιασμένες μέρες (κυρίως το χειμώνα), η συνολική ακτινοβολία οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη της διάχυτης συνιστώσας. Όπως προαναφέραμε, όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη γη, κατανέμεται ανομοιόμορφα στις διάφορες περιοχές. Οι περιοχές κοντά στον ισημερινό λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία από οποιεσδήποτε άλλες. Η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εποχές και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, το κλίμα (ιδιαίτερα τα σύννεφα που σκεδάζουν τις ακτίνες του ήλιου) και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν το ποσό της ηλιακής ενέργειας που διατίθεται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

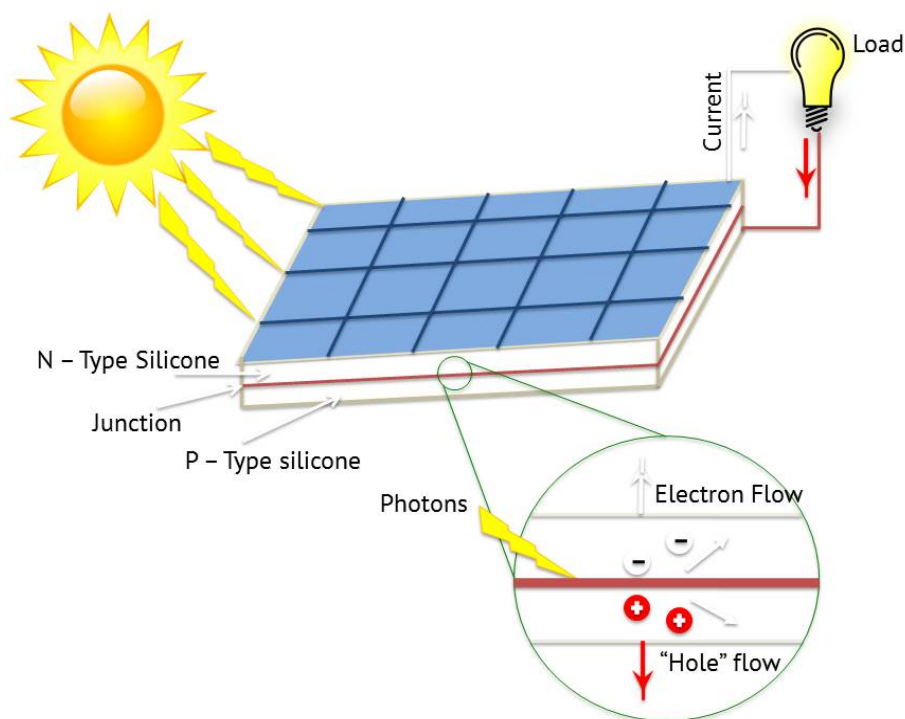


Σχημα 2.3: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας σε αίθριες και συννεφιασμένες ημέρες [5]

Το ποσό της ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία αλλά επηρεάζεται σημαντικά και από την ικανότητα των στοιχείων να μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια (conversion efficiency). Οι επιστήμονες έχουν επικεντρώσει τις προσπάθειες τους τα τελευταία χρόνια στη βελτίωση της ικανότητας μετατροπής των φωτοβολταϊκών στοιχείων με στόχο να γίνουν τα παραπάνω πιο ανταγωνιστικά σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες.

2.2. Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, αποτελεί τη βασική φυσική διαδικασία μέσω της οποίας ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο, το αρσενιούχο γάλλιο, το τελουριούχο κάδμιο, ο δισελνιοϊνδιούχος χαλκός κλπ, χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Το στοιχείο του κρυσταλλικού πυριτίου ωστόσο παραμένει το ευρύτερα διαδεδομένο φωτοβολταϊκό στοιχείο.



Σχήμα 2.4: Λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο [6]

Όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού, τότε ένα μέρος αυτού ανακλάται, ένα άλλο τη διαπερνά και το υπόλοιπο απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός, ουσιαστικά σημαίνει τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας η οποία συνήθως είναι θερμότητα. Παρ' όλα αυτά όμως, υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους, σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται η τεράστια τεχνολογική πρόοδος του τομέα της ηλεκτρονικής και του τομέα της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια - “πακέτα” ηλιακής ενέργειας. Τα φωτόνια αυτά, περικλείουν διαφορετικά ποσά ενέργειας που αντιστοιχούν στα διάφορα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος. Η σύγχρονη τεχνολογία, μας έδωσε τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, με τη χρήση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων, που η λειτουργία τους στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούν διόδους ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n με τη μορφή επίπεδης πλάκας. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο διαρκεί η ακτινοβολία, δημιουργείται περίσσεια φορέων, δηλαδή περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Οι φορείς αυτοί, καθώς

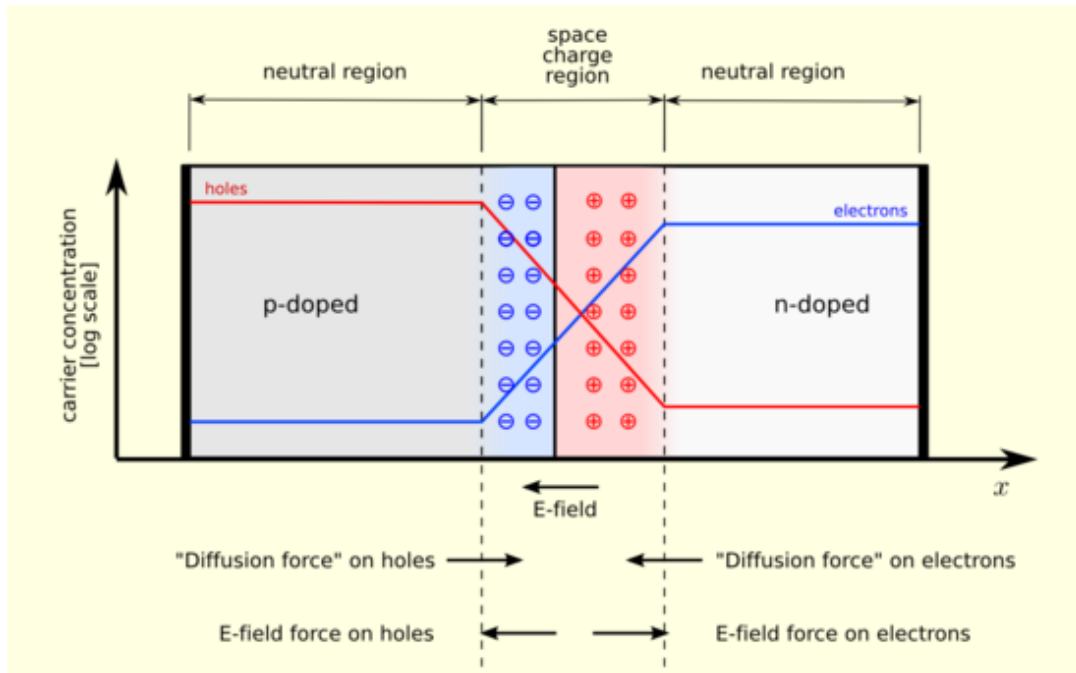
κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, δέχονται την επίδραση ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης p-n.

Εξαιτίας αυτού, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Αν στους ακροδέκτες αυτούς συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο, παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος και ισχύος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο. Συμπερασματικά η όλη διάταξη, αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού κυττάρου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες της παραπάνω διάταξης, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο [2,7].

2.3. Επαφή p-n

Στη συνέχεια, γίνεται μία συνοπτική αναφορά του τρόπου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Κάθε κρυσταλλικός ημιαγωγός, για να έχει ικανοποιητικές ιδιότητες για φωτοβολταϊκές και γενικότερα για ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Τα άτομα των ημιαγωγίμων υλικών, συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς οι οποίοι είναι δυνατόν να σπάσουν υπό την επίδραση της ακτινοβολίας ή θερμότητας, οπότε απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς n) και αφήνουν κενές θέσεις, τις οπές (θετικοί φορείς p).

Οι σημαντικότερες ιδιότητες και εφαρμογές των διατάξεων ημιαγωγών, δεν προέρχονται κυρίως από τη δημιουργία φορέων αλλά οφείλονται περισσότερο στη διάχυση των φορέων τους. Βασική διάταξη για την εκδήλωση των ιδιοτήτων αυτών, είναι η ένωση p-n (positive-negative) που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι σχηματίζεται όταν έλθουν σε στενή επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p με ένα τεμάχιο τύπου n. Αμέσως τότε, ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι επίσης πολύ λιγότερα.

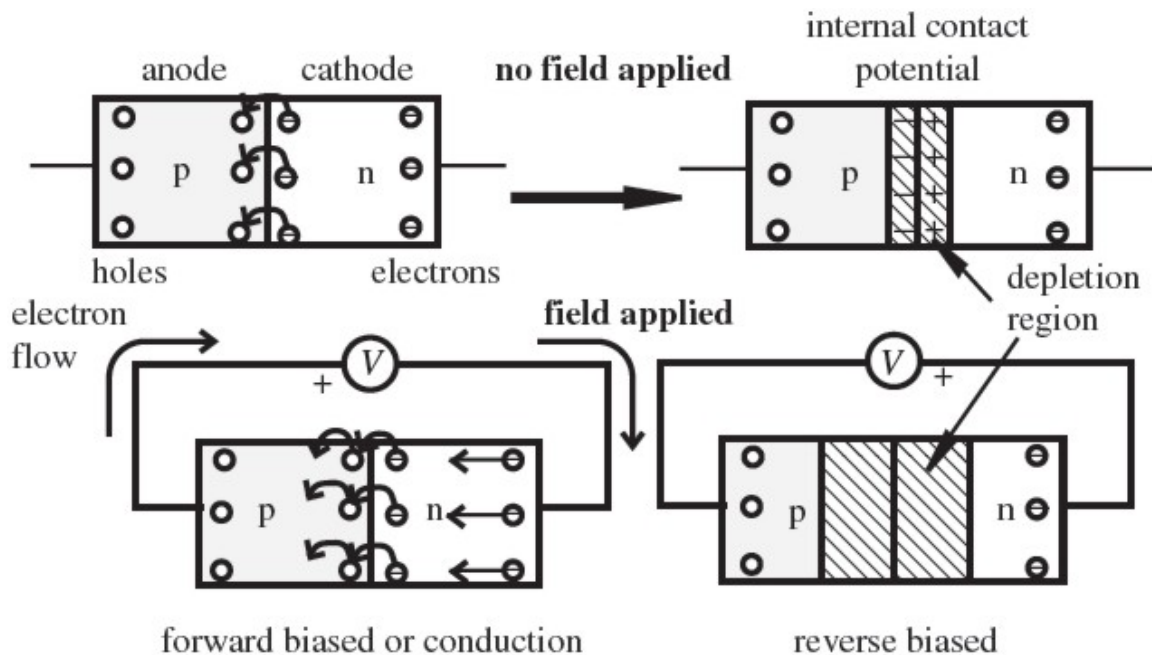


Σχήμα 2.5: Επαφή p-n [8]

Δημιουργείται με αυτό τον τρόπο μία περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας, γνωστή ως ζώνη εξάντλησης φορέων ή περιοχή αραίωσης. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα ωστόσο παραμένουν στη περιοχή n και τα αρνητικά στην περιοχή p. Έτσι, δημιουργείται ένα εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο αντιτίθεται στην κίνηση των φορέων αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα η παραπάνω διάχυση να μη συνεχίζεται επ' άπειρον. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που ικανοποιούν το νόμο δράσης των μαζών. Η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται δίοδος [2].

2.4. Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της Διόδου

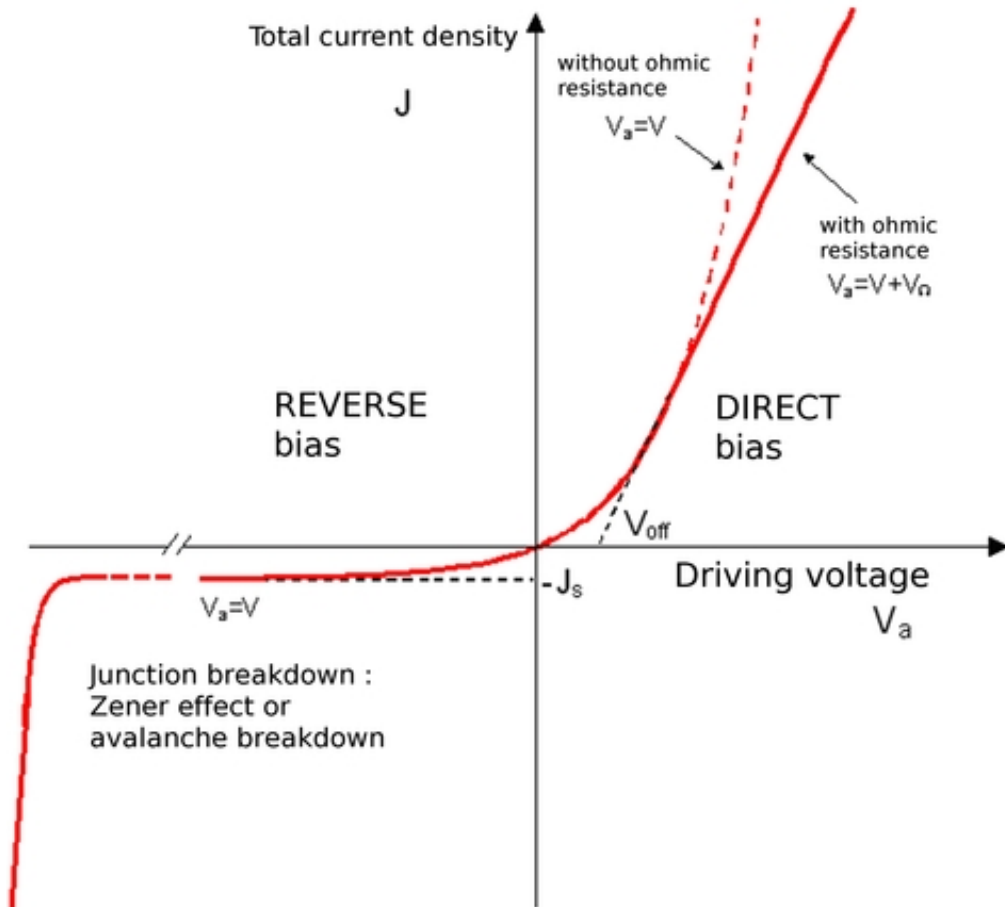
Η μία περίπτωση είναι να επιβληθεί στη διόδο p-n ορθή πόλωση, δηλαδή ο αρνητικός πόλος της πηγής να συνδεθεί με το τμήμα τύπου n της διόδου, και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου p. Τότε, τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή της ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής, διαμέσου του τμήματος τύπου p.



Σχήμα 2.7: Συνδεσμολογία ορθής και ανάστροφης πόλωσης [9]

Αντίθετα, στην ανάστροφη πόλωση, δηλαδή αν ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδεθεί με το τμήμα τύπου p και ο θετικός με το τμήμα τύπου n, γίνεται

επανασύνδεση των οπών του τμήματος τύπου p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, και, από την άλλη μεριά, απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων του τμήματος τύπου n , προς το θετικό πόλο της πηγής.



Σχήμα 2.8: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης διόδου p-n [10]

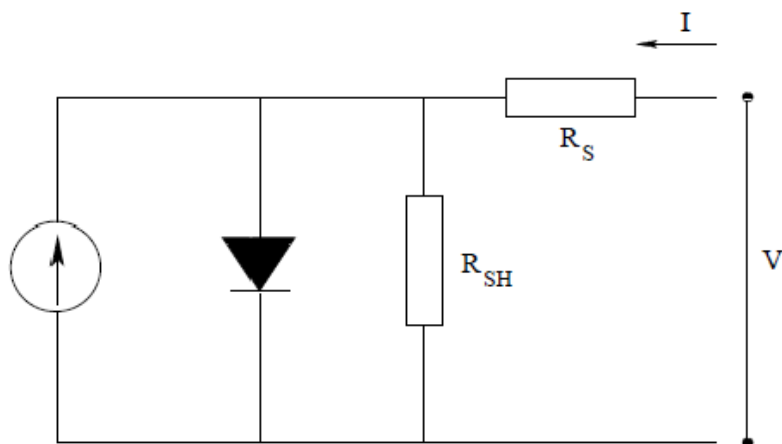
Έτσι, οι συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται πάρα πολύ, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει, και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή. Το αποτέλεσμα είναι ότι τώρα η δίοδος προβάλλει μεγάλη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα.

Δηλαδή μπορεί μια δίοδος που έχει σε ορθή πόλωση αντίσταση μόλις 10 Ω, να την αυξάνει στην αντίστροφη πόλωση σε 100 MΩ, δηλαδή να γίνεται δέκα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη. Το παραπάνω διάγραμμα (σχήμα 2.8) δείχνει ακριβώς την ιδιόμορφη μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια δίοδο ένωσης p-n, σε συνάρτηση με την τιμή της τάσης και το είδος της πόλωσης που εφαρμόζεται [11].

3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1. Η Ισοδύναμη Ισοδύναμη (I-V) Καμπύλες

Για να προχωρήσουμε σε μία εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να το παραστήσουμε με ένα ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφει τη λειτουργία του. Το ισοδύναμο κύκλωμα που ακολουθεί, καλείται πλήρες μοντέλο μίας διόδου και είναι αυτό που χρησιμοποιείται τυπικά για τη μελέτη των φωτοβολταϊκών.



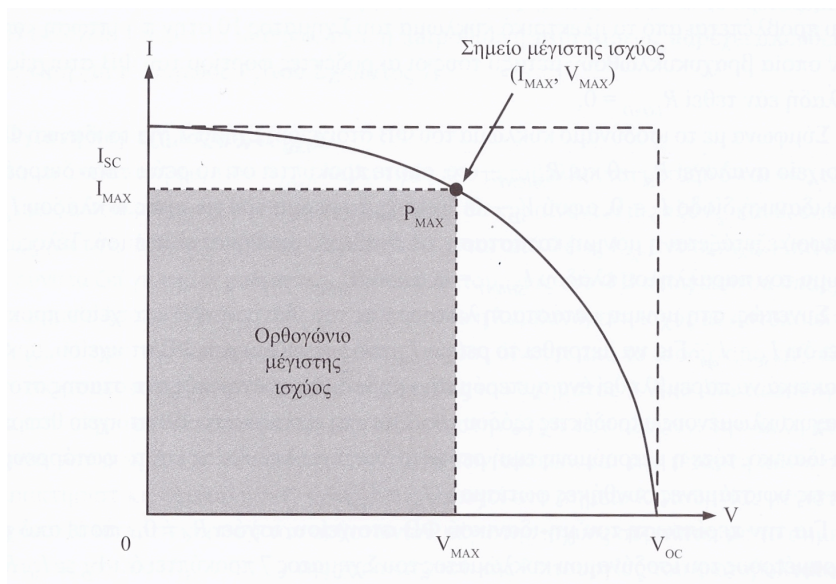
Σχήμα 3.1: Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ηλιακού κυττάρου που περιλαμβάνει μία γεννήτρια ρεύματος στα αριστερά η οποία συνδέεται παράλληλα με μία δίοδο και την αντίσταση R_{SH} . Η συνολική αντίσταση του κυττάρου, συνδέεται σε σειρά και παρίσταται από την ποσότητα R_S .

Χαρακτηριστική I-V φωτοβολταϊκών στοιχείων

Κατά τη μετακίνηση των φορέων αγωγιμότητας, παρατηρείται μία πτώση τάσης από τον ημιαγωγό προς τις ηλεκτρικές επαφές. Η αντίσταση R_S , αντιπροσωπεύει την αντίσταση που οφείλεται στην κίνηση αυτή. Επίσης, η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν είναι άπειρη, αφού λόγω αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος. Για το λόγο αυτό, το ισοδύναμο

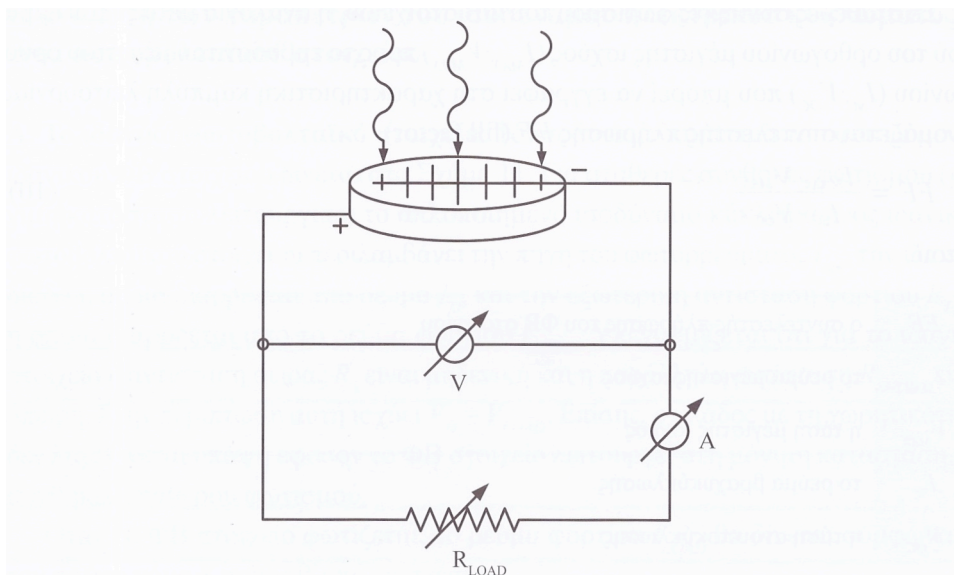
κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση R_{SH} . Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου, η αντίσταση R_S είναι μικρότερη των 5Ω και η αντίσταση R_{SH} είναι μεγαλύτερη από 500Ω [12]. Με τη βοήθεια αυτού του κυκλώματος, είναι δυνατός ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών I-V καμπύλων για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας. Μια χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου παράγεται από τα σημεία λειτουργίας του 4ου τεταρτημορίου της γενικευμένης καμπύλης του I-V [7].

Στο 4ο τεταρτημόριο παράγεται ηλεκτρική ισχύς η οποία μαζί με την καμπύλη I-V του στοιχείου παρουσιάζονται με τη μορφή που έχουν στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2: Για δεδομένες συνθήκες φωτισμού, η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος – τάσεως ενός ΦΒ στοιχείου παρέχει το σημείο λειτουργίας I_{MAX} , V_{MAX} , για το οποίο η παρεχόμενη ισχύς μεγιστοποιείται. Η επιφάνεια του εγγεγραμμένου ορθογωνίου στο σημείο αυτό εκφράζει τη μέγιστη παρεχόμενη ισχύ P_{MAX} [7].

Για την υλοποίηση της γραφικής παράστασης ρεύματος-τάσεως απαιτούνται τα εξής, ένα αμπερόμετρο με χαμηλή εσωτερική αντίσταση, ώστε το I_{sc} να αποδίδεται χωρίς σφάλμα, ένα βολτόμετρο με μεγάλη εσωτερική αντίσταση, μια μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σταθερές διασυνδέσεις καλωδιώσεων. Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα όπως περιγράφεται παρακάτω θα έχει την ακόλουθη μορφή.



Σχήμα 3.3: Το ηλεκτρικό κύκλωμα που απαιτείται για την καταγραφή της χαρακτηριστικής ρεύματος – τάσεως (I-V) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και τον προσδιορισμό της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος [7]

Σε μία δίοδο, μπορεί να παραχθεί ρεύμα στο σκοτάδι, χωρίς να παράγεται κανένας φορέας υπό το φως του ήλιου [11]. Το ρεύμα αυτό δίνεται από την εξίσωση 3.1:

$$I = I_0 * e^{\frac{q*V}{(A*K_B*T)}}^{-1} \quad (3.1)$$

όπου το I_0 είναι το αποκαλούμενο ρεύμα κόρου και δίνεται από τη σχέση 3.2,

$q=(1.6*10^{-19}\text{C})$ το φορτίο του ηλεκτρονίου, V η τάση στην έξοδο του κυττάρου, K_B η σταθερά BOLTZMANN ($=1.38*10^{-23}\text{ J/ K}$), T η απόλυτη θερμοκρασία και A είναι μία σταθερά (σταθερά ιδανικότητας της διόδου) και παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2 που οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής.

$$I_0 = A * T^3 e^{\frac{-E_g}{(K_B*T)}} \quad (3.2)$$

όπου E_g , είναι το ενεργειακό διάκενο.

Όταν ο φωτισμός λαμβάνεται υπόψιν, τότε η εξίσωση 3.1, διαμορφώνεται ως εξής:

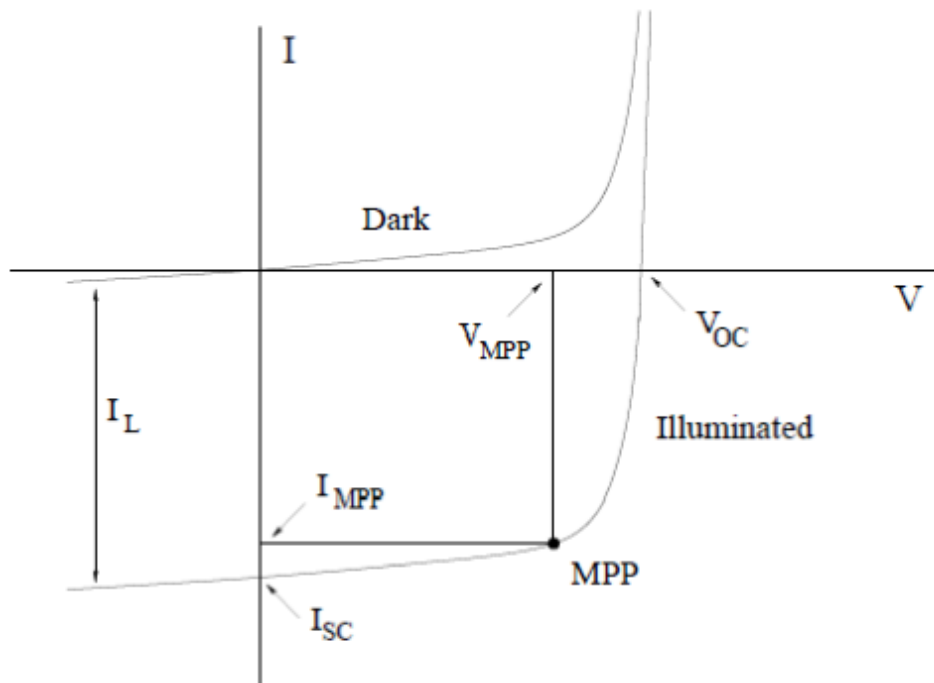
$$I = I_L - I_0 e^{\frac{qV}{(A*K_B*T)}}^{-1} \quad (3.3)$$

όπου το I_L καλείται φωτόρρευμα [11,13] και είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με τη σχέση 3.4.

$$I_L = K * G \quad (3.4)$$

όπου K είναι ένας συντελεστής αναλογίας και G η ηλιακή ακτινοβολία.

Η εξίσωση 3.3, καθορίζει τη σχέση ρεύματος-τάσης ενός ιδανικού ηλιακού κυττάρου με $R_S=0$ και $R_{SH} \rightarrow \infty$. Η χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ και η αντιστοιχία των δύο πιο πάνω εξισώσεων, φαίνονται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} , βρίσκονται στα σημεία τομής των αξόνων και η μέγιστη ισχύς εξάγεται από τα σημεία V_{MPP} και I_{MPP} [79]

Στο σχήμα 3.4, φαίνονται τέσσερις σημαντικές παράμετροι των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το ρεύμα σε μηδενική τάση καλείται ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} , ενώ η τάση σε μηδενικό ρεύμα καλείται τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} . Το σημείο όπου η παραγωγή ισχύος βρίσκεται στο μέγιστο, είναι γνωστό ως το γόνατο της I-V χαρακτηριστικής καμπύλης, MPP (Maximum Power Point). Οι αντίστοιχες τιμές του ρεύματος και της τάσης φαίνονται στο σχήμα 3.4 και είναι οι ποσότητες I_{MPP} και V_{MPP} .

Ρεύμα Βραχυκύκλωσης (I_{sc})

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, για μηδενική τάση ($V=0$) αναλογεί η μέγιστη τιμή ρεύματος, που ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}). Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αναλογεί στην τιμή του ρεύματος που προβλέπεται από το ηλεκτρικό κύκλωμα στην περίπτωση κατά την οποία βραχυκυκλωθούν μεταξύ τους οι ακροδέκτες φορτίου του φωτοβολταϊκού στοιχείου, δηλαδή εάν τεθεί $R_{Load}=0$. Επίσης, το ρεύμα του χωρητικού κλάδου $I_c=0$, αφού εξετάζεται η μόνιμη κατάσταση, με σταθερές συνθήκες φωτισμού. Συνεπώς στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου προκύπτει $I_{sc}=I_{opt}$ [7]

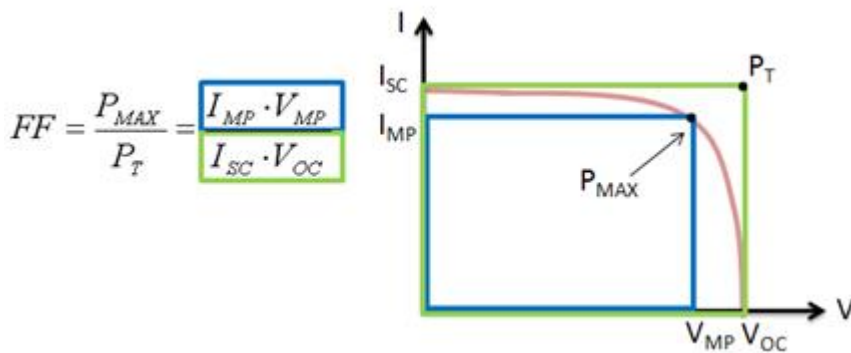
Τάση ανοικτοκύκλωσης (V_{oc})

Όταν οι ακροδέκτες εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου ανοικτοκυκλωθούν τότε η τάση εξόδου (V_{oc}) μεγιστοποιείται. Πρακτικά, η τάση V_{oc} ενός φωτιζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να μετρηθεί εάν συνδεθεί ένα βολτόμετρο με άπειρη εσωτερική αντίσταση απευθείας στους ακροδέκτες εξόδου του χωρίς να συνυπάρχει ο κλάδος με την αντίσταση φορτίου [7].

Μέγιστη Παροχή Ισχύος (P_{MAX})

Όταν η αντίσταση φορτίου R_{LOAD} λάβει τιμές που μεταβάλλονται μεταξύ 0 και $+\infty$, τότε οι τιμές λειτουργίας για την τιμή του ρεύματος θα κυμαίνονται μεταξύ I_{sc} και 0, ενώ οι τιμές για την τάση λειτουργίας θα μεταβάλλονται από 0 έως V_{oc}

αντίστοιχα. Από όλα τα δυνατά ζεύγη τιμών ρεύματος – τάσεως λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου θα υπάρχει ένα σημείο λειτουργίας I_{MAX} , V_{MAX} , για το οποίο η λαμβανόμενη ισχύς μεγιστοποιείται (P_{MAX}). Σε σταθερές συνθήκες φωτισμού του φωτοβολταϊκού στοιχείου η αναλογία $FF = \frac{I_{MAX} \cdot V_{MAX}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$ ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (fill factor) [7].



Σχήμα 3.5: Προσδιορισμός του συντελεστή πλήρωσης FF [14]

FF	ο συντελεστής πλήρωσης του ΦΒ στοιχείου
I_{MAX}	το ρεύμα μέγιστης ισχύος
V_{MAX}	η τάση μέγιστης ισχύος
I_{SC}	το ρεύμα βραχυκύκλωσης
V_{OC}	η τάση ανοικτοκύκλωσης

Πίνακας 3.6 [7]

Για το ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο ($R_S \rightarrow 0$ και $R_{SHUNT} \rightarrow \infty$), ο συντελεστής πλήρωσης εγγίζει τη μονάδα. Οι ηλεκτρικές παράμετροι FF, I_{SC} , V_{OC} , καθορίζουν το συντελεστή απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου και συνιστούν τα κύρια ηλεκτρικά μεγέθη για την αξιολόγηση της λειτουργικής ικανότητάς του. Για

δεδομένη ένταση ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου (W/cm^2), η απόδοση (η) για τη μετατροπή της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{P_{\text{ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ}}}{P_{\text{ΟΠΤΙΚΗ}}} = \frac{P_{\text{MAX}}}{H \cdot A} = \frac{I_{\text{MAX}} \cdot V_{\text{MAX}}}{H \cdot A} = \frac{FF \cdot I_{\text{sc}} \cdot V_{\text{oc}}}{H \cdot A} \quad (3.5)$$

η	ο συντελεστής απόδοσης για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή
P_{MAX}	η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ΦΒ στοιχείο
H	η ένταση (πυκνότητα ισχύος) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
A	το εμβαδόν του φωτοβολταϊκού στοιχείου
FF	ο συντελεστής πλήρωσης του ΦΒ στοιχείου
I_{MAX}	το ρεύμα μέγιστης ισχύος
V_{MAX}	η τάση μέγιστης ισχύος
I_{sc}	το ρεύμα βραχυκύκλωσης
V_{oc}	η τάση ανοικτοκύκλωσης

Πίνακας 3.7 [7]

Συνεπώς, σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση αναμένεται αυξημένη απόδοση φωτοβολταϊκής μετατροπής με την μεγιστοποίηση των FF , I_{sc} , και V_{oc} . Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη φασματική απόκριση της ακτινοβολίας, δηλαδή τη πυκνότητα ισχύος στο κάθε μήκος κύματος. Κατά τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, αποκαθίσταται μία ισορροπία όταν η τάση που αναπτύσσεται ανάμεσα στις δύο όψεις του, προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που αντισταθμίζει το φωτόρευμα [13].

Δηλαδή, θα ισχύει:

$$I_L = I_0 \left[e^{\frac{qV}{A \cdot K_B \cdot T}} - 1 \right] \quad (3.6)$$

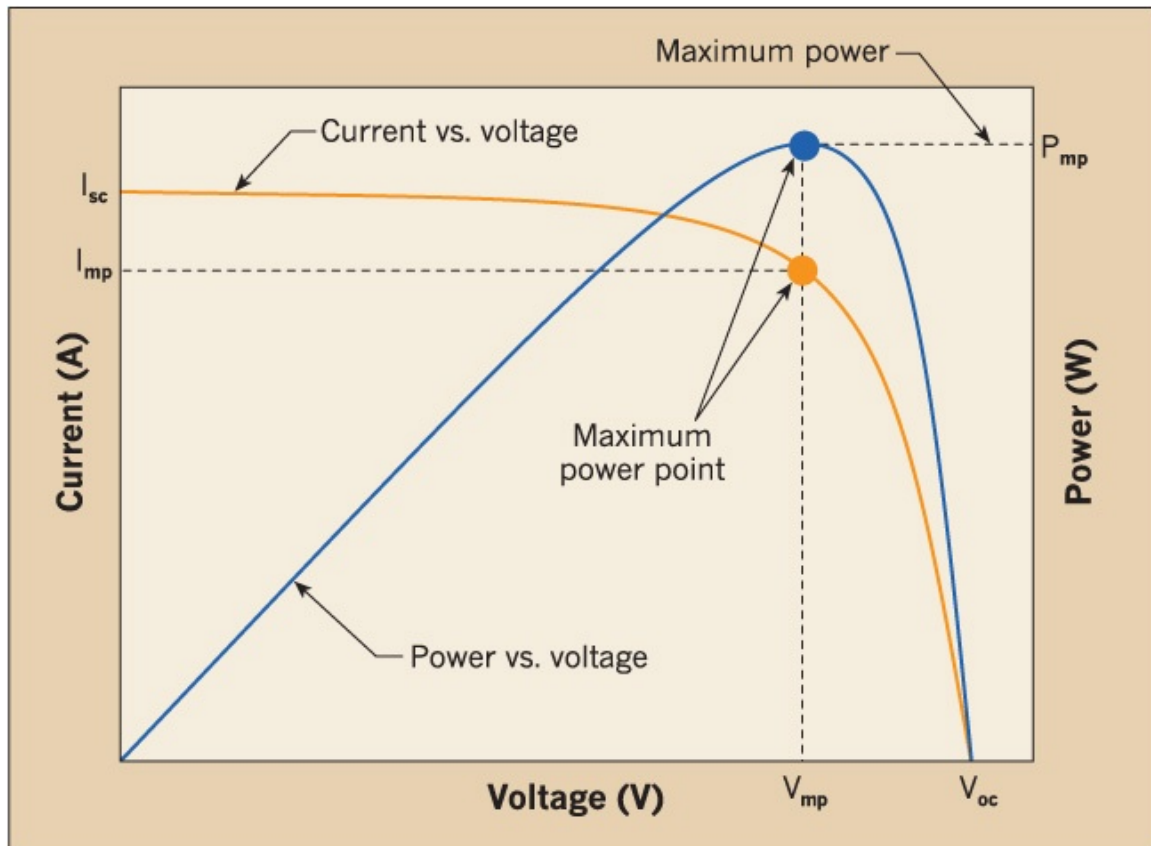
Από τη σχέση 3.6, βρίσκουμε ότι η τιμή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης του στοιχείου V_{OC} θα είναι [6]:

$$V_{OC} = \frac{(A \cdot K_B \cdot T)}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3.7)$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του φωτορεύματος I_L είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή του ρεύματος κόρου I_0 και επομένως η σχέση 3.7 απλοποιείται ως εξής:

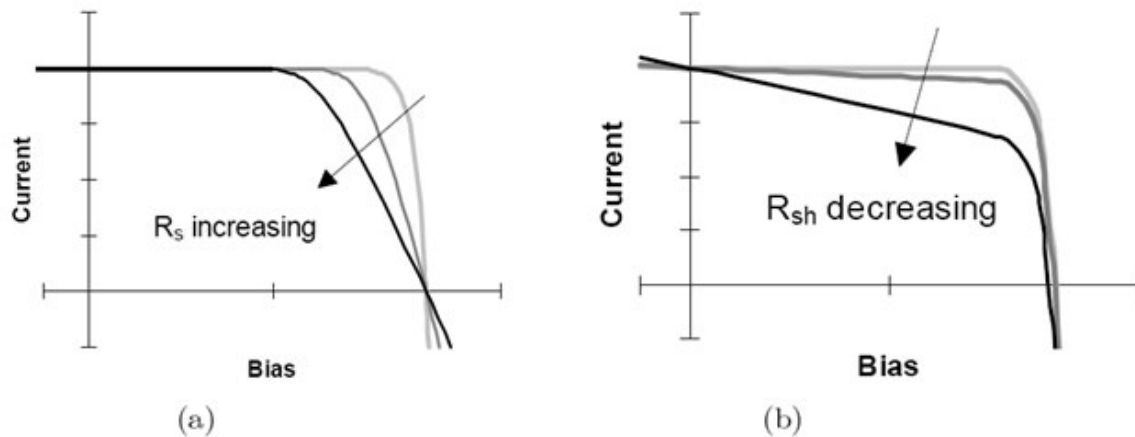
$$V_{OC} = \frac{(A \cdot K_B \cdot T)}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} \right) \quad (3.8)$$

Η σχέση 3.8, δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρευμα, δηλαδή την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο [12].



Σχήμα 3.8: Εξάρτηση ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} και τάσης ανοικτοκυκλώσεως V_{oc} από την ακτινοβολία [16]

Στο σχήμα 3.8, φαίνεται ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται γραμμικά με την ακτινοβολία, ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος μένει πρακτικά σταθερή στις μεταβολές της ακτινοβολίας. Μαθηματικά, η εξάρτηση τάσης- ακτινοβολίας είναι λογαριθμική, σύμφωνα με τη σχέση 3.8.

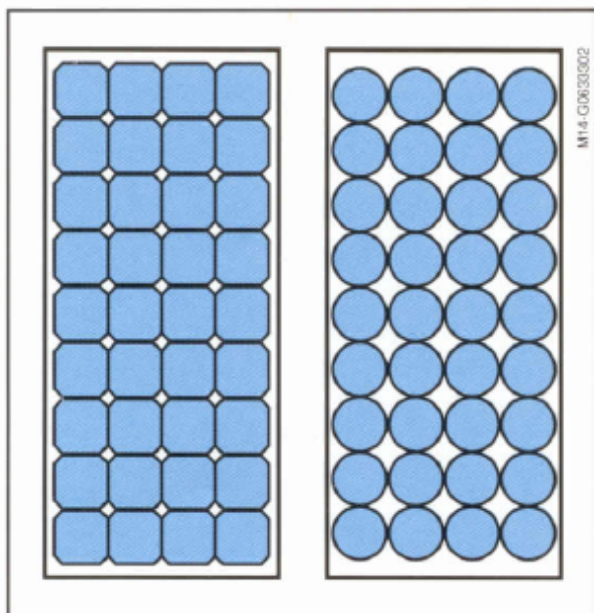


Σχήμα 3.9: Επίδραση της σε σειρά αντίστασης R_S και της παράλληλα εμφανιζόμενης R_{SH} , σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο [17]

Η I-V καμπύλη ενός ηλιακού κυττάρου μετατοπίζεται ανάλογα με τις τιμές των χαρακτηριστικών αντιστάσεων R_S και R_{SH} του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος. Μεγάλες τιμές της R_S προκαλούν μείωση του ρεύματος ενώ μικρές τιμές της R_{SH} αντίστασης μειώνουν την τάση όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9.

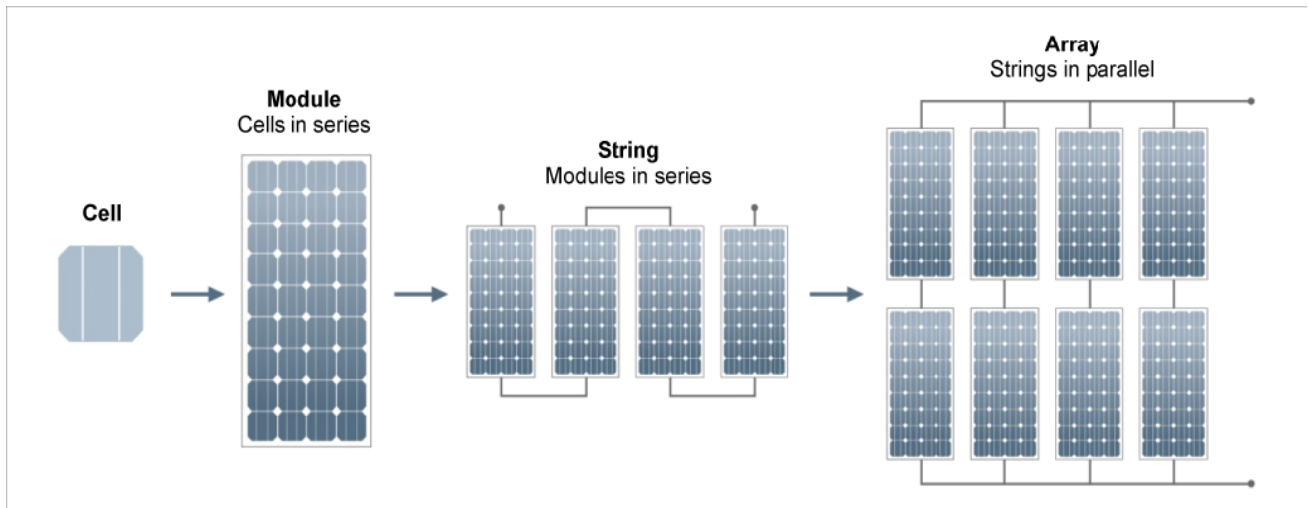
3.2. / , & '0' 1& "2. \$! 1"+) (" . "(34)& '(*%+%5

Κατασκευαστικά, επιδιώκεται ώστε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία να καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη κατά το δυνατόν επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου και για το λόγο αυτό, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα διαμορφώνονται κατάλληλα. Ο λόγος της συνολικής ενεργούς επιφάνειας των φωτοβολταϊκών στοιχείων προς την συνολική επιφάνεια του πλαισίου, ονομάζεται συντελεστής κάλυψης.



Σχήμα 3.10: Ενεργή επιφάνεια φωτοβολταϊκών πλαισίων καλυπτόμενα από κύτταρα διαφορετικού σχήματος. Στρογγυλά κύτταρα καλύπτουν μικρότερη επιφάνεια σε σχέση με τα τετραγωνικά [18]

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελεί τη βασική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Για την αύξηση της παραγόμενης ισχύος είναι δυνατή η σύνδεση των στοιχείων, είτε σε σειρά είτε παράλληλα, προς σχηματισμό μεγαλύτερων μονάδων, τα πλαίσια. Συνώνυμο σχεδόν με το πλαίσιο είναι και το πάνελ, το οποίο μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο), που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Ο αριθμός των πλαισίων ενός πάνελ είναι τόσος, ώστε οι διαστάσεις και το βάρος του να μην είναι εμπόδιο στη μεταφορά και την τοποθέτηση του στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Τα πλαίσια (ή τα πάνελ) στη συνέχεια, μπορούν να συνδυαστούν σε ακόμα μεγαλύτερες μονάδες, γνωστές ως συστοιχίες. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατόν να κλιμακωθεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο να μπορεί να καλύψει διάφορες ενεργειακές απαιτήσεις.



Σχήμα 3.11: Φωτοβολταϊκό στοιχείο, πλαίσιο, συστοιχία [19]

Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και στα πάνελ ή ανάμεσα στα γειτονικά πλαίσια και πάνελ, να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Έτσι, αν για κάποιο λόγο ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο σκιαστεί ή αν πάθει βλάβη (πχ. μία διακοπή στους ηλεκτρικούς αγωγούς) δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα, όπως θα συνέβαινε αν όλα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ήταν συνδεδεμένα σε σειρά [11]. Τα μεμονωμένα πλαίσια ή ακόμη και οι συστοιχίες, δεν αποτελούν από μόνα τους ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Η βασική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο το οποίο μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Συνήθως, ένα σύστημα περιλαμβάνει συσσωρευτές για την αποθήκευση της περίσσειας της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν

η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανεπαρκής ή ανύπαρκτη. Επίσης, περιλαμβάνει διατάξεις για τη ρύθμιση και μετατροπή της τάσης και τη ρύθμιση της ισχύος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος. Περιλαμβάνονται επίσης διατάξεις προστασίας και ελέγχου και συχνά μία βοηθητική γεννήτρια, συνήθως ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος που να λειτουργεί με καύση βενζίνης ή πετρελαίου ντήζελ, για την αντιμετώπιση έκτακτων περιστάσεων. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρέπει να αντέχει σε μηχανικές καταπονήσεις φορτίων που προσομοιάζουν το χιόνι, τον πάγο, ή τη ριπή του ανέμου, σύμφωνα με τις προδιαγραφές IEC61215 ed.2, και πρέπει να ανταποκρίνεται σε επιφανειακά φορτία 5.500 N/m^2 χωρίς επιφανειακή κάμψη και παραμόρφωση. Η κατασκευή του πλαισίου πρέπει να διασφαλίζει τη στεγανότητα και να αποτρέπει τη διείσδυση της υγρασίας στον εσωτερικό χώρο όπου βρίσκονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η ηλεκτρική μόνωση του πλαισίου πρέπει να ικανοποιεί τα κριτήρια κλάσης II κατά το πρότυπο IEC 61730. Η όλη επιλογή των υλικών και η δομή των φωτοβολταϊκών πλαισίων οφείλει να προβλέπει για την αποτελεσματική απαγωγή της ελκυόμενης θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία προς το εξωτερικό περιβάλλον. Τα εγκεκριμένα πλαίσια συνήθως φέρουν εγχαραγμένο το όνομα του κατασκευαστή, το τύπο τους και τον αριθμό σειράς. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του κάθε κατασκευαστή ενδέχεται να μην είναι απολύτως συμβατά για τη χρήση σε όλους τους υφιστάμενους τύπους των αναστροφών, ή των ρυθμιστών φόρτισης συσσωρευτών εφόσον υπάρχουν στο σύστημα. Η συμβατότητα είναι διπλή και προσδιορίζεται από: (i) την ικανότητα του αναστροφέα (ή του φορτιστή

συσσωρευτών) να οδηγεί τα πλαίσια στο κατάλληλο σημείο λειτουργίας τους προκειμένου να παρέχεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, και (ii) τα χαρακτηριστικά ρεύματος – τάσεως μέγιστης ισχύος της συνδεσμολογίας όλων των πλαισίων (σειρά – παράλληλα) που απολήγουν στην είσοδο του αναστροφέα (ή του φορτιστή συσσωρευτών) να αντιστοιχούν σε επιτρεπτά μεγέθη εισόδου [7].

3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, δεν λαμβάνει υπόψιν μία σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων που πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζονται κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος. Η ετήσια ενεργειακή απόδοση, αποτελεί την πιο κατάλληλη παράμετρο στο σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς επίσης και το καλύτερο μέτρο για την παρακολούθηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους. Οι παράγοντες επίδρασης αυτοί, μπορεί να σχετίζονται με το ίδιο το πλαίσιο ή από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς αναλύονται στη συνέχεια. Πριν όμως αναφέρουμε τους κυριότερους παράγοντες μείωσης της απόδοσης των ηλιακών πλαισίων, να σημειώσουμε πως για λόγους σύγκρισης των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions,STC), κάτω

από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι τους. Αυτές είναι οι εξής:

Θερμοκρασία Στοιχείου : 25°C

Ηλιακή Ακτινοβολία : 1000 W/m^2

A.M (Air Mass) : 1.5

Οι κυριότεροι παράγοντες μείωσης της ενεργειακής απόδοσης που πρέπει να λαμβάνουμε υπόψιν μας κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, αναφέρονται πιο κάτω.

Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας:

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός συλλέκτη είναι με τη σειρά της άμεσα εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Για τη μεγαλύτερα λαμβανόμενα ποσά της ηλιακής ενέργειας όπως έχουμε ήδη αναφέρει, τα πλαίσια πρέπει να προσανατολίζονται κατάλληλα και να είναι τοποθετημένα στη βέλτιστη γωνία κλίσης εφόσον δεν χρησιμοποιούνται στρεφόμενες βάσεις ενός ή δύο αξόνων. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (σχέση 3.4) και ως εκ τούτου, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

Θερμοκρασία κυττάρου:

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών, επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Ο βαθμός απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία, αναφέρονται σε δοκιμές που έγιναν σε θερμοκρασίες κυττάρου 25⁰C. Τις περισσότερες φορές όμως, η θερμοκρασία του στοιχείου υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας διαφέρουν σημαντικά κυρίως τους θερινούς μήνες. Οι μεγάλες θερμοκρασίες κυττάρου έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου (σχέση 3.2 και σχέση 3.8) με αποτέλεσμα, όταν ένα φορτίο συνδεθεί στα άκρα του, η διαφορά δυναμικού να είναι αισθητά μειωμένη. Υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας δημιουργούν μικροποσότητες ρεύματος (σχέση 3.1) το οποίο αυξάνει την τιμή του ρεύματος σκότους. Κάτω από συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών, το ρεύμα του σκότους που αναπτύσσεται είναι σχεδόν μηδενικό [13].

Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου:

Η ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του στοιχείου καθώς μεγάλες ταχύτητες, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου [15]. Όταν οι άνεμοι είναι βόρειοι είναι συνήθως κρύοι, με αποτέλεσμα τα φωτοβολταϊκά να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, υπό τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αντίθετα συμβαίνει για θερμούς ανέμους.

Ρύπανση:

Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί από ρύπανση της επιφάνειάς τους, από την επικάθηση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη. Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε μία περιοχή που εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια [12].

Σκίαση:

Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης της DC ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση κλπ, είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη

έκταση εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτηρίων όπου προκαλείται σκίαση από τη μία σειρά στην επόμενη. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές και για το λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν.

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η σκίαση ή η βλάβη ενός και μόνο φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα μπορούσε να επιφέρει ολική αχρήστευση του πλαισίου. Ένα σκιασμένο κύτταρο, συμπεριφέρεται κατά βάση όπως η απλή δίοδος p-n, η οποία, όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τα υπόλοιπα υγιή κύτταρα μία υψηλή ανάστροφη τάση. Αν τα υπόλοιπα φωτιζόμενα ηλιακά στοιχεία του πλαισίου είναι μεγάλου πλήθους, αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της.

Στην πράξη, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, το σκιασμένο κύτταρο λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα. Παρατεταμένος σκιασμός ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου.

Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως φαινόμενο Hot Spot (κατάσταση “θερμής

κηλίδας”). Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους (δίοδοι παράκαμψης), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυττάρων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποιο φωτοβολταϊκό στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί [12].

Γήρανση:

Λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων (και των υπολοίπων μερών ενός φωτοβολταϊκού συστήματος), αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μία μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται από 1% ως 2% για κάθε έτος [12].

Απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος:

Πέρα από τους διάφορους παράγοντες που αναφέραμε πιο πάνω, πρέπει κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, να προνοήσουμε για τις ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ. Επομένως, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με την περίπτωση και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης περίπου του 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο [12].

Οπτικές απώλειες:

Με τον όρο οπτικές απώλειες εννοούμε τη διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανακλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών κυττάρων) σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC. Η ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στην επιφάνειά του, ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° .

Επίσης, οπτικές απώλειες έχουμε και με τη διαφοροποίηση του φάσματος της ακτινοβολίας. Καθώς το A.M=1.5 ηλιακό φάσμα που καθορίζεται από τις STC, χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις προδιαγραφές απόδοσης των πλαισίων, η ετήσια παραγωγή του πλαισίου θεωρείται σχετικά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του ηλιακού φάσματος γιατί οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας, εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Αυτά όσον αφορά φωτοβολταϊκά ευρείας φασματικής περιοχής. Για φωτοβολταϊκά στενής φασματικής περιοχής οι ετήσιες απώλειες είναι σημαντικότερες.

Επιπλέον, υπάρχουν απώλειες λόγω διαφοροποίησης της πόλωσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μέση ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού προσδιορίζεται γύρω στο 2%.

Τέλος, οπτικές απώλειες παρατηρούνται και λόγω χαμηλών τιμών της

πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του ηλιακού κυττάρου μειώνεται στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κάτω από την τιμή των 200 W/m^2 . Οι οπτικές απώλειες, αποδεικνύονται μικρής σημασίας για εμπορικά πλαίσια καλής ποιότητας. Σε άλλες όμως περιπτώσεις οι ενεργειακές αυτές απώλειες αποδεικνύονται σχετικά σημαντικές και γενικά υπολογίζονται σε 3%, κατά μέσο όρο στο έτος [20].

4. Διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα ηλιακά στοιχεία, διαθέτουν υψηλή αξιοπιστία λειτουργίας και μεγάλη διάρκεια ζωής και ως κύριοι στόχοι βελτίωσης παραμένουν συνήθως η απόδοση και το κόστος τους [12]. Σκοπός λοιπόν της εξέλιξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η δημιουργία πλαισίων με υψηλότερο κατά το δυνατό βαθμό απόδοσης και χαμηλό κόστος. Οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών που συναντώνται σήμερα ποικίλουν ως προς το βασικό υλικό κατασκευής, την ικανότητα μετατροπής και το κόστος τους. Μία συνοπτική αναφορά των κυριότερων χαρακτηριστικών τους ακολουθεί στη συνέχεια.

Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για να κατασκευαστούν φωτοβολταϊκά στοιχεία στη βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Είναι ίσως και το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών. Τα διάφορα είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου παρατίθενται στη συνέχεια.

4.1. / , & '0' 1& "2. \$! 1"+) (" 9 ' - ' . #4) & " 11(. ' : ! 4# (& + ' 4

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι ένα υλικό με εύρος ζώνης 1.12eV [20]. Τα κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου, έχουν πάχος γύρω στα 0.3 χιλιοστά και η απόδοση τους στη βιομηχανία κυμαίνεται από 15-18% [2] για το πλαίσιο. Σε εργαστηριακές δοκιμές έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24.7% [2]. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης-επιφάνειας ή “ενεργειακής

πυκνότητας”. Ένα άλλο χαρακτηριστικό, είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος Czochralski (CZ) και η μέθοδος float zone (FZ). Αμφότερες, βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση σήμερα, είναι της SunPower με απόδοση πλαισίου 18.5% [2]. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.

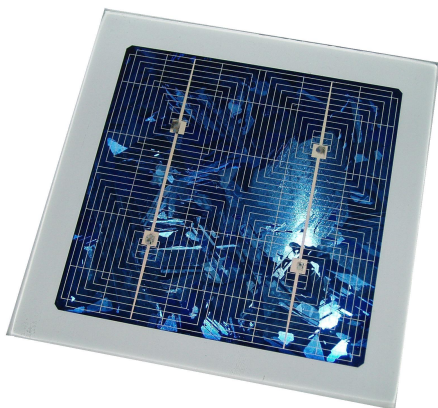


Σχήμα 4.1: Κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [21]

4.2. / , & '0' 1&"2. \$! 1"+)(" ! ' 14. #4)&"11(. ' : ! 4#(&+ ' 4

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0.3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά, μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές, δηλαδή το μέγεθος των κρυσταλλικών κόκκων. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κύτταρα.

Σε εργαστηριακές εφαρμογές, έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% [2], ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως 15% [2] για τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος απευθείας στερεοποίησης, *directional solidification* (DS), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου (“χύτευση”) και η ηλεκτομαγνητική χύτευση EMC.



Σχήμα 4.2: Κύτταρο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [22]

4.3. / , & '0' 1&"2. \$! 1"+)(" ; μ' #6 '4 ! 4#(&+ '4

Το άμορφο πυρίτιο, έχει εύρος ζώνης που κυμένεται μεταξύ 1.7-1.8 eV [23]. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναποθέτηση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο), πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται, η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη.

Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό, προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά αυτού του τύπου, κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6% έως 8% [2], ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14% [2].

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το άμορφο πυρίτιο είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των πλαισίων άμορφου πυριτίου, είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα, κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης, υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά τη διάρκεια

ζωής των πλαισίων άμορφου πυριτίου αφού δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις. Παρ' όλα αυτά, οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι 0.0001 χιλιοστά, ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά [2].



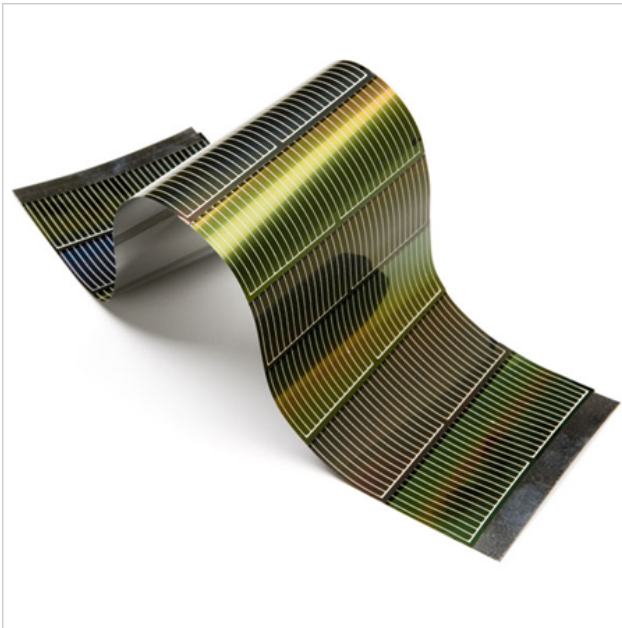
Σχήμα 4.3: Κύτταρο άμορφου πυριτίου [24]

4.4. / , & '0' 1&"2. \$! 1"+)(" <() %1=- '2->' : * '4 * "1. ' : (CuInSe₂ ? CIS . "(μ% 8# ')@?. = A "11+ ' 4 CIGS)

Ο δισεληνοϊνδούχος χαλκός έχει κατά προσέγγιση ενεργειακό διάκενο 1eV [25]. Έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρ' όλα αυτά, η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% [2] για το πλαίσιο.

Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18.8% [2], η οποία είναι η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των τεχνολογιών λεπτής επίστρωσης. Με την πρόσμιξη γαλλίου (CIGS), η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το πρόβλημα που υπάρχει, είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε

περιορισμένες ποσότητες στη φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.



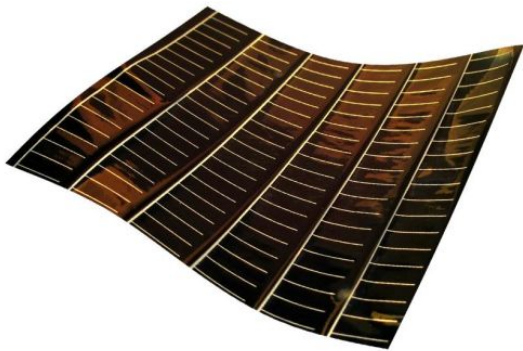
Σχήμα 4.4: Κύτταρο δισεληνοϊνδούχου χαλκού [26]

4.5. / , & ' 0 ' 1 & " 2 . \$! 1 " +) (" B % 1 ' 4 # (' : * ' 4 C " > μ + ' 4 (CdTe)

Το τελουριούχο κάδμιο, έχει ενεργειακό διάκενο στο 1.44 eV [15], και έχει τη δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως, μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου τελουριούχου καδμίου γύρω στο 6-8% [2]. Στο εργαστήριο, η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φτάσει το 16% [2].

Μελλοντικά, αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Σημαντικότερος κατασκευαστής για φωτοβολταϊκά στοιχεία CdTe είναι η First Solar. Τροχοπέδη

για τη χρήση του, αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace, έχει εναντιωθεί στη χρήση του. Επίσης πρόβλημα είναι και η έλλειψη του τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι η ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό με την εφαρμογή του σε κτήρια [2] (Building Intergrated Photovoltaic, BIPV).



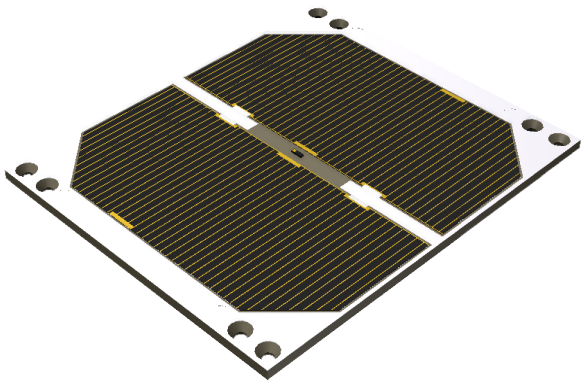
Σχήμα 4.5: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο CdTe [27]

4.6. / , & '0' 1&"2. \$!1"+)(" D#)%-(' : * '4 E"11+'4 (GaAs)

Το αρσενιούχο γάλλιο, είναι ένα κράμα μετάλλων που περιέχει εκτός από γάλλιο, μέταλλα όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από το χρυσό. Το αρσενικό δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1.42 eV [28] και είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η απόδοση του στη μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η

υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29% [2]. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν τη χρήση τους σε εφαρμογές συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν τις υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και γι' αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδεικνύεται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος [2].



Σχήμα 4.6: Κύτταρο αρσενιούχου γαλλίου [29]

4.7. / , & ' 0 ' 1&"2. \$)&'(*%+ " HIT (Heterojunction with Itrinsic Thin-layer):

Τα πιο γνωστά εμπορικά φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής, αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω), ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μία στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

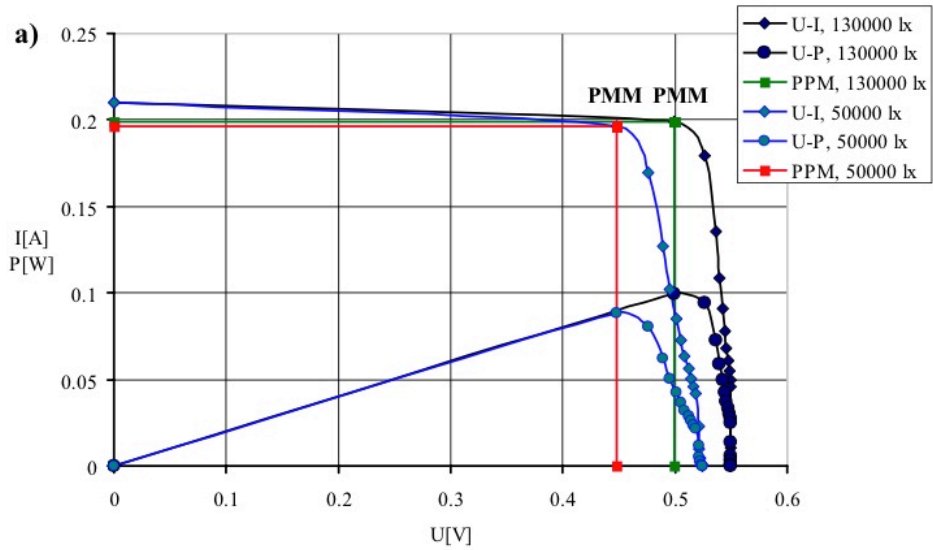
Κατασκευάζεται από την Sanyo Solar [2]. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17.2% [2] και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Άλλα πλεονεκτήματα για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στη διάχυτη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το φωτοβολταϊκό στοιχείο ετεροεπαφής είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

	Μονοκρυσταλλικά	Πολυκρυσταλλικά	Άμορφου Πυριτίου	CdTe	CIS/CIGS
Απόδοση Στοιχειώδους Πλαισίου	15-20%	13-16%	6-8%	9-11%	10-12%
Απόδοση Ερευνητικών Κυττάρων	25.00%	20.40%	13.40%	18.70%	20.40%
Απαιτούμενη Έκταση για 1kWp	6-9m ²	8-9m ²	13-20m ²	11-13m ²	9-11m ²
Στοιχειώδης Διάρκεια Ζωής	25 χρόνια	25χρόνια	10-25χρόνια		
Χαμηλότερη Τιμή	0,75\$/W	0,62\$/W	0.69\$/W		
Αντοχή Θερμοκρασίας	Η επίδοση πέφτει 10-15% στις υψηλές θερμοκρασίες	Μικρότερη θερμοκρασιακή αντοχή από τα μονοκρυσταλλικά	Ανθεκτικό σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες	Ασήμαντες επιπτώσεις στην επίδοση	
Επιπλέον Λεπτομέρειες	Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία	Χαμηλότερη κατανάλωση πυριτίου κατά την παραγωγή		Χαμηλή Διαθεσιμότητα στη αγορά	

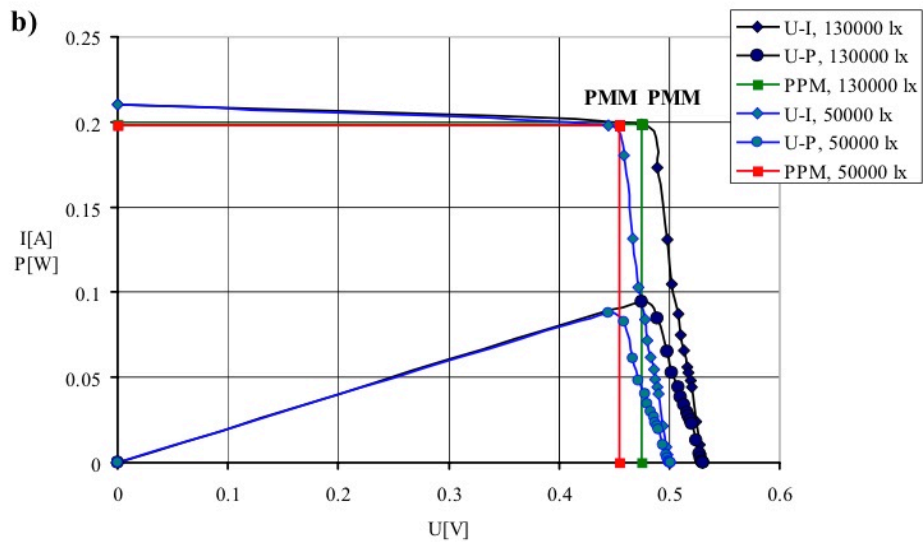
Πίνακας 4.1: Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

Ο παραπάνω πίνακας είναι ένα διάγραμμα που παραθέτει τις τεχνολογίες ηλιακών κυττάρων που χρησιμοποιούνται περισσότερο σήμερα, περιγράφοντας τις προδιαγραφές τους και τα χαρακτηριστικά τους. Ο πίνακας περιλαμβάνει λεπτά φιλμ ηλιακών κυττάρων άμορφου πυριτίου, τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) και χαλκού ινδίου, γαλλίου και σεληνίου (CIS / CIGS). Γίνεται μία σύγκριση μεταξύ τους, όσον αφορά την απόδοση, την απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp καθώς και τη μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας [30]

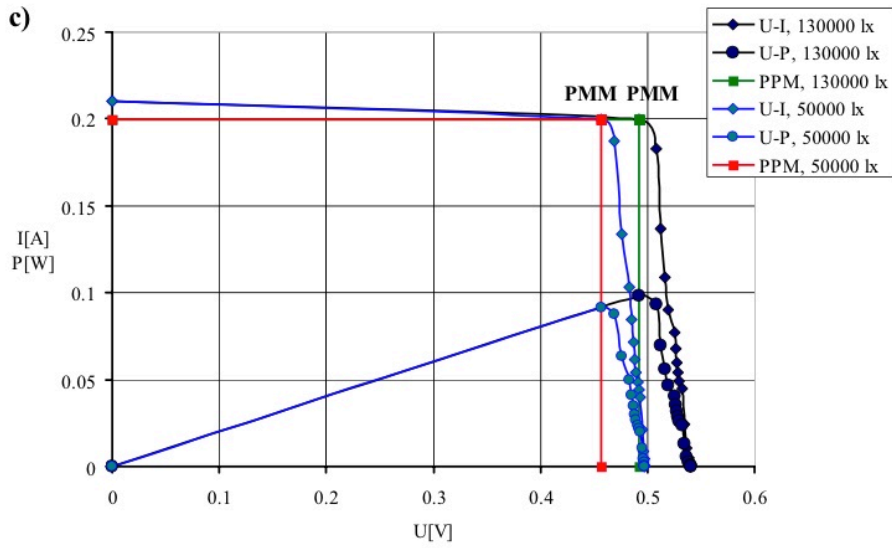
4.8. 3: A. #() = F"#". &=#()&(. 7 - G-V > ("6H#, - &: 8 , - =1(" . 7 -



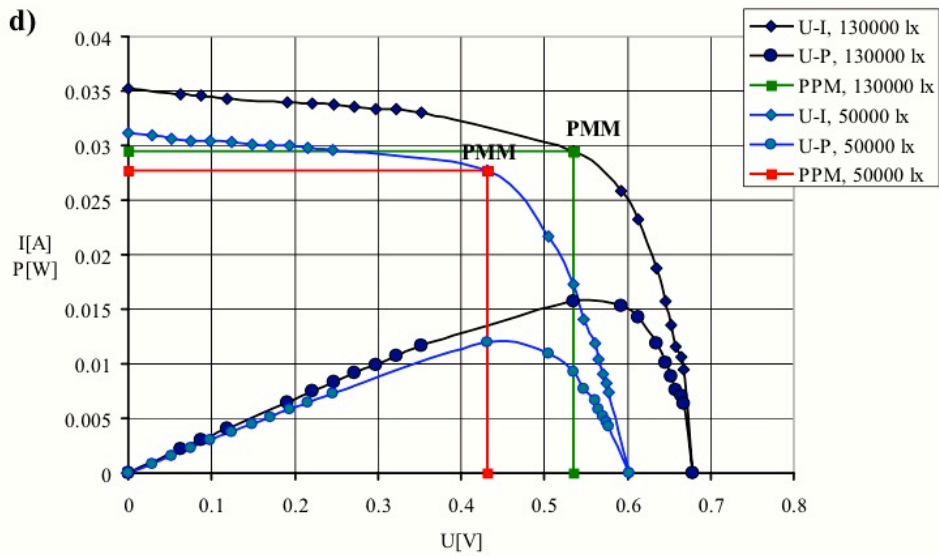
Σχήμα 4.8α: Ηλιακό κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με διαφανές στρώμα [31]



Σχήμα 4.8β: Ηλιακό κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με στρώμα καθρέφτη [31]



Σχήμα 4.8γ: Κύτταρο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [31]



Σχήμα 4.8δ: Κύτταρο άμορφου πυριτίου [31]

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από μετρήσεις

ηλιακών κυττάρων για διάφορες τιμές της έντασης ακτινοβολίας. Συγκρίνονται η τρέχουσα - χαρακτηριστική ρεύματος- τάσης, η χαρακτηριστική ισχύος καθώς και το σημείο μέγιστης ισχύος [31].

Για το κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με διαφανές στρώμα, η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας προκαλεί την αύξηση της τάσης. Η υψηλότερη τάση $U=0,55V$ για $I = 0,07 A / m^2$ λαμβάνεται για την ένταση της ακτινοβολίας $E=130000Ix$ (ηλιακό φως). Ωστόσο, εάν το κύτταρο φωτίζεται από λάμπα αλογόνου των $500 W$ ισχύος και η έντασης της ακτινοβολίας είναι $E=50.000Ix$ τότε η τάση του κυττάρου πέφτει στο $U=0.524V$ για $I=0,06A/m^2$ (Σχήμα 4.8α).

Για το κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με αντανακλαστική στρώση καθρέφτη, η υψηλότερη τάση $U=0,53V$ για $I=0,09A/m^2$ λαμβάνεται για την ένταση της ακτινοβολίας $E=130000Ix$. Ωστόσο, εάν το κύτταρο φωτίζεται από λάμπα αλογόνου των $500W$ ενέργειας και η ένταση της ακτινοβολίας είναι $E=50000Ix$ τότε η τάση του κυττάρου μειώνεται, $U=0.5V$ για $I=0.09A/m$ (Σχήμα 4.8β).

Για το κύτταρο πολυκρυσταλλικού πυριτίου, η υψηλότερη τάση $U=0.541V$ για $I=0,032A/m^2$ λαμβάνεται για ένταση της ακτινοβολίας $E=130000Ix$. Ωστόσο, εάν το κύτταρο φωτίζεται από λάμπα αλογόνου των $500W$ ισχύος και έντασης ακτινοβολίας $E=50.000Ix$ τότε η τάση του κυττάρου μειώνεται σε $U=0.497V$ για $I=0,03A/m^2$ (Σχήμα 4.8γ) [31].

Προκειμένου να παρουσιαστεί η $I (U)$ χαρακτηριστική για το πλαίσιο άμορφου πυριτίου που μελετήθηκε ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός της τάσης και του ρεύματος για το μεμονωμένο κύτταρο. Επίσης, για το ηλιακό κύτταρο, η μείωση

της τάσεως προκαλείται από τη μείωση της έντασης της ακτινοβολίας . Η υψηλότερη τάση $U=0.666V$ για $I=8,51A/m^2$ λαμβάνεται για την ένταση της ακτινοβολίας $E=130000lx$. Ωστόσο, εάν το κύτταρο φωτίζεται από τη λάμπα αλογόνου των $500W$ ισχύος και της έντασης της ακτινοβολίας $E=50.000lx$ τότε η τάση του κυττάρου μειώνεται σε $U=0.576V$ για $I=6,629A/m^2$ (Σχ. 2d).

Για όλους τους διερευνήθηκαν κύτταρα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας προκαλεί την αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ότι οι συνθήκες, η αύξηση της ισχύος και τις αλλαγές του σημείου μέγιστης ισχύος στην τρέχουσα - χαρακτηριστική τάση [31].

Οι έρευνες διεξάγονται από λειτουργικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών κυττάρων που επιτρέπουν τη σύγκριση της απόδοσης μετατροπής τους σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού ανάλογα με την κατασκευή και το υλικό των κυττάρων. Τα αποτελέσματα των ερευνών έδειξαν ότι σε φυσικές συνθήκες οι μέγιστες τιμές του ρεύματος και της τάσης ήταν υψηλότερες από ό, τι για τεχνητό φωτισμό [31].

Τα αποτελέσματα των μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών κυττάρων είναι συγκρίσιμα. Η μέγιστη τάση και στις δύο περιπτώσεις είναι ίση με $0,53V$, ωστόσο για το άμορφο πλαίσιο η τάση είναι υψηλότερη και είναι ίση με $0,6V$. Οι διαφορές σε αυτά τα αποτελέσματα προκαλούνται από την κατασκευή των κυττάρων, τον τύπο του αντανакλαστικού στρώματος και την εφαρμοσμένη τεχνολογία [32,33].

Οι προκύπτουσες χαρακτηριστικές ρεύματος - τάσεως και το σημείο της μέγιστης ισχύος δίνουν τη δυνατότητα να υπολογιστεί η απόδοση και ο συντελεστής πλήρωσης FF των υπό διερεύνηση κυττάρων (Πίνακας 4.2).

Solar Cells	Intensity of Radiation [lx]	Efficiency [%]	Maximum Power [W/m ²]	Fill Factor [FF]
Ηλιακό κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με διαφανές στρώμα	130000/50000	8/18	15,32/13,57	0,86/0,80
Ηλιακό κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με στρώμα καθρέφτη	130000/50000	9/22	17,90/16,74	0,84/0,83
Κύτταρο πολυκρυσταλλικού πυριτίου	130000/50000	3/9	6,29/5,84	0,89/ 0,87
Κύτταρο άμορφου πυριτίου	130000/50000	14,5/8	14,12/10,68	0,66/0,63

Πίνακας 4.2: Οι υπολογισμοί: απόδοση , συντελεστής πλήρωσης και μέγιστη ισχύς των φωτοβολταϊκών κυττάρων [31]

Σύμφωνα με τις λειτουργικές χαρακτηριστικές που λάβαμε μπορεί να αναφερθεί ότι η μείωση του φωτισμού προκαλεί την αύξηση της απόδοσης (για μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά κύτταρα). Για το άμορφο κύτταρο η μείωση του φωτισμού προκαλεί την ελάττωση της αποτελεσματικότητας. Οι αποδόσεις των κυττάρων διερευνώνται για τις ακόλουθες παραμέτρους E=130000lx και E=50000lx παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9.

Με βάση τις έρευνες που εκτελέστηκαν μπορεί να δηλωθεί ότι τα φωτοβολταϊκά κύτταρα που μελετήθηκαν επιτρέπουν τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια στο εύρος απόδοσης 9-22 % ανάλογα με την κατασκευή του κυττάρου και την ένταση του φωτός. Η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας προκαλεί την αύξηση της ισχύος των κυττάρων από τη μία πλευρά και μείωση της απόδοσης και της αλλαγής του σημείου της μέγιστης ισχύος που συνοδεύεται από την αύξηση της τάσεως των κυττάρων και ρεύμα βραχυκυκλώματος από την άλλη πλευρά. Η υψηλότερη απόδοση της μετατροπής ενέργειας παρατηρείται για τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα με αντανακλαστικό στρώμα καθρέφτη. Για το κύτταρο αυτό η μέγιστη ισχύς ήταν ίση με $17,9 \text{ W/m}^2$ για $E=130000 \text{ lx}$. Η αποδοτικότητα του μονοκρυσταλλικού κυττάρου με αντανακλαστικό διαφανές στρώμα είναι ίση με 18 % και η μέγιστη ισχύς είναι ίση με $15,32 \text{ W/m}^2$ για $E=130000 \text{ lx}$. Τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου έχουν την χαμηλότερη αποδοτικότητα (9 %), ενώ η μέγιστη τάση είναι ίση προς $0,541 \text{ V}$ και το ρεύμα είναι ίσο με $12,79 \text{ A/m}^2$ για $E=130000 \text{ lx}$ [31].

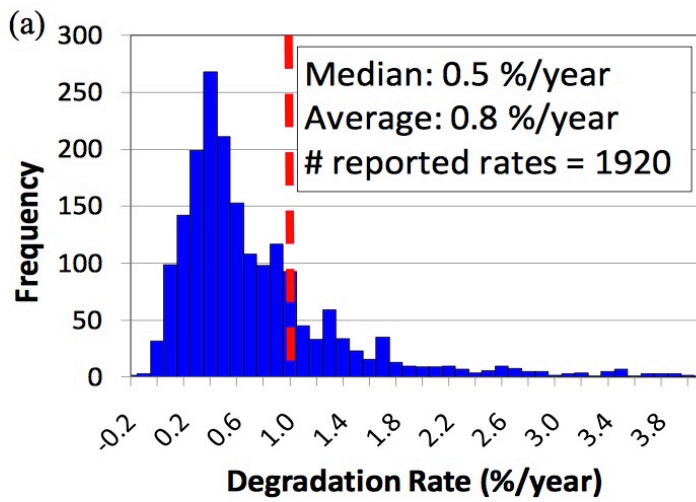
Η αποδοτικότητα του άμορφου κυττάρου είναι ίση με 14,5 % και αυξάνει με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας. Ωστόσο, το άμορφο κύτταρο έχει τη χειρότερη χαρακτηριστική ρεύματος – τάσεως, λόγω της χαμηλής τιμής του συντελεστή πλήρωσης. Ο συντελεστής πλήρωσης των εξεταζόμενων κυττάρων μειώνεται σε συνδυασμό με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας.

Για τα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά κύτταρα ο συντελεστής πλήρωσης είναι στην περιοχή από 0,8 έως 0,89. Για την άμορφο κύτταρο ο συντελεστής πλήρωσης κυμαίνεται από 0,63 έως 0,66.

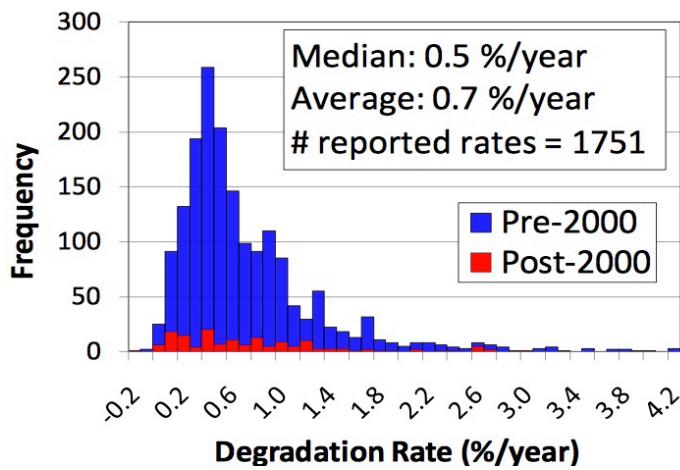
Κύρια πλεονεκτήματα των κυττάρων που παράγονται από την άμορφο και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι το χαμηλό κόστος της παραγωγής τους και η έλλειψη των γεωμετρικών περιορισμών. Αλλά, δυστυχώς, υπάρχουν περιορισμοί των ιδιοτήτων χρησιμότητας που προκύπτουν από τις σχέσεις που παρουσιάζονται στο έργο. Οι ιδιότητες χρησιμότητας όμως των άμορφων και πολυκρυσταλλικών κυττάρων είναι δυνατό να βελτιωθούν μέσω μεθόδων σχηματισμού υφής.

4.9. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων

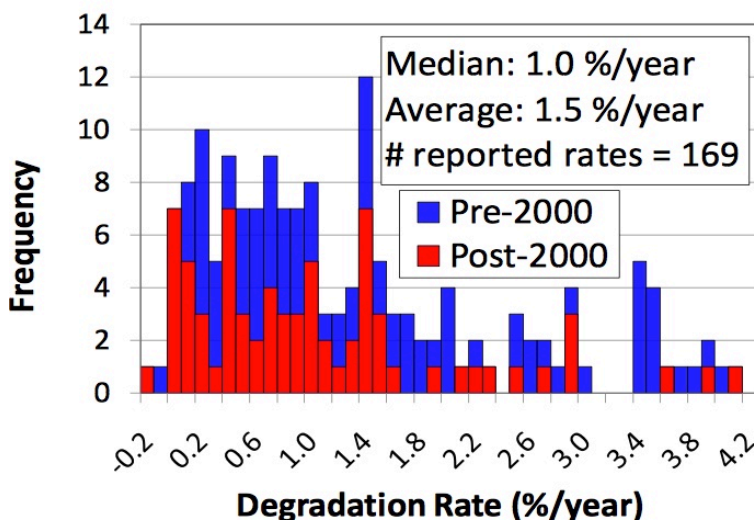
Τα Φωτοβολταϊκά (PV) πλαίσια παρέχονται συνήθως με 20 χρόνια εγγύηση που πιστοποιεί ότι τα πάνελ θα παράγουν τουλάχιστον το 80% της ονομαστικής τους ισχύος ακόμα και μετά από 20 χρόνια χρήσης. Ο γενικός κανόνας είναι ότι τα πλαίσια υποβαθμίζονται περίπου 1% ετησίως. Το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL), πραγματοποίησε μια μετά-ανάλυση των μελετών που εξέταζαν τους μακροπρόθεσμους ρυθμούς υποβάθμισης των διαφόρων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 1% ανά έτος ήταν ένα ποσοστό κάπως απαισιόδοξο το οποίο αναφερόταν σε πάνελ κατασκευής πριν από το έτος 2000. Τα σημερινά πάνελ, έχοντας καλύτερη τεχνολογία και βελτιωμένες τεχνικές κατασκευής, έχουν ακόμα μεγαλύτερη αντοχή από ό,τι οι προκάτοχοί τους. Για τα πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου, τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πάνελ για εμπορική και οικιακή χρήση, ο ρυθμός υποβάθμισης είναι λιγότερο από το 0,5% για τα πάνελ που είναι κατασκευασμένα πριν από το 2000, και λιγότερο από το 0,4% για τα πάνελ που είναι κατασκευασμένα μετά το 2000. Αυτό σημαίνει ότι τα πάνελ που κατασκευάζονται σήμερα έχουν τη δυνατότητα να παράγουν 92% της αρχικής τους ενέργειας μετά από 20 χρόνια, ποσοστό αρκετά υψηλότερο από το 80% που υπολογίστηκε σύμφωνα με τον κανόνα του 1% [34].



Σχήμα 4.10: Ιστόγραμμα στα αναφερόμενα ποσοστά υποβάθμισης για όλους τους ρυθμούς υποβάθμισης [34]



Σχήμα 4.11: Ιστόγραμμα στα αναφερόμενα ποσοστά υποβάθμισης για Si μόνο [34]



Σχήμα 4.12: Ιστόγραμμα στα αναφερόμενα ποσοστά υποβάθμισης για τεχνολογία thin film μόνο [34]

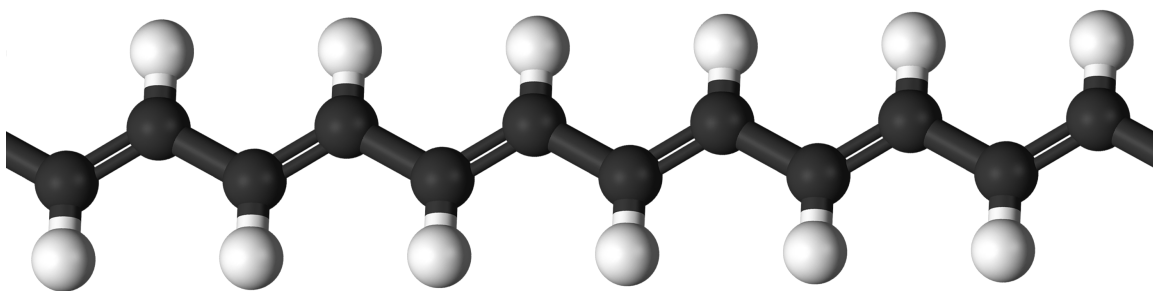
Τι προκαλεί όμως την υποβάθμιση κατά την πάροδο του χρόνου; Πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου που βρίσκονται σε ακραία κλίματα έδειξαν υψηλά ποσοστά υποβάθμισης. Για τα πολύ κρύα κλίματα, τα πάνελ που υποβάλλονται σε βαριά φορτία ανέμου και χιονιού υπέστησαν το μεγαλύτερο βαθμό υποβάθμισης. Από την άλλη πλευρά, πάνελ σε παρόμοια κλίματα που είχαν εγκαταστημένη πρόσοψη, εξαλείφοντας το φορτίο χιονιού, είχαν πολύ χαμηλά ποσοστά υποβάθμισης. Τα πάνελ τώρα σε κλίματα της ερήμου παρουσίασαν μεγάλες μειώσεις στην παραγωγή με την πάροδο του χρόνου - κοντά στο 1 % ετησίως - κυρίως λόγω των υψηλών επιπέδων της ακτινοβολίας UV. Πάνελ σε πιο εύκρατα κλίματα, όπως το βόρειο κομμάτι των Η.Π.Α. είχαν ρυθμούς υποβάθμισης πολύ χαμηλούς στο 0,2% ετησίως. Τα πάνελ αυτά θα μπορούσαν να διατηρήσουν το 96% των δυνατοτήτων παραγωγής τους μετά από 20 χρόνια. Επίσης Μια φωτοβολταϊκή μονάδα μπορεί να παρουσιάσει μείωση της

παραγωγής για λόγους αναστρέψιμους. Μπορεί να υπόκειται σε σκίαση, για παράδειγμα, από ένα δέντρο που έχει αναπτυχθεί μπροστά από το πάνελ . Η μπροστινή επιφάνεια μπορεί να έχει ρυπανθεί (Τα ΦΒ γενικά θα βιώσουν μέχρι και 10 % απώλεια της παραγωγής που οφείλεται στην μπροστινή επιφάνεια). Μία μονάδα μπορεί να αποτύχει , ή οι διασυνδέσεις μεταξύ των ενοτήτων μπορεί να αλλάξουν το σημείο λειτουργίας του πίνακα . Ωστόσο, αυτές οι μειώσεις στην απόδοση είναι όλες αναστρέψιμες, υπό την προϋπόθεση ότι η αρχική αιτία θα διορθωθεί. Τα ποσοστά υποβάθμισης χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση ηλιακών μονάδων, προκειμένου να εκτιμηθεί η παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος και να υπολογιστεί η περίοδος αποπληρωμής και η απόδοση των επενδύσεων. Όπως σε όλους τους τομείς της μηχανολογίας, μπορούμε πάντα να υποθέσουμε το χειρότερο και να ελπίζουμε για το καλύτερο, έτσι το να υπερεκτιμούμε το ποσοστό υποβάθμισης δεν είναι απαραίτητα κάτι κακό. Από την άλλη πλευρά όμως, θέλουμε ρεαλιστικές εκτιμήσεις. Συνεπώς λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της ανάλυσης του NREL, μπορεί να είναι χρήσιμα για την προσαρμογή του βασικού κανόνα του 1%, ώστε να αντιπροσωπεύει τις συνθήκες υπό τις οποίες θα λειτουργούν τα πάνελ [34].

5. Οργανικά Φωτοβολταϊκά

5.1. Η ανάπτυξη των οργανικών φωτοβολταϊκών αποτέλεσε η ανακάλυψη

του φαινομένου αγωγιμότητας σε οργανικές ουσίες εμπλουτισμένες με αλογόνα το 1954. Στα χρόνια που ακολούθησαν πραγματοποιήθηκε συστηματική μελέτη γύρω από ιδιότητες μεταφοράς ηλεκτρικών φορτίων σε μικρά οργανικά μόρια. Κατά το τέλος της δεκαετίας του '70 και τις αρχές της δεκαετίας του '80 εδραιώθηκαν οι πρώτες ερευνητικές δραστηριότητες στο πεδίο των οργανικών ημιαγωγών. Πρωταγωνιστικός παράγοντας στην έρευνα ήταν το πολυακετυλένιο (Σχήμα 5.1), που προκύπτει από πολυμερισμό του ακετυλενίου.



Σχήμα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση της δομής του πολυακετυλενίου [35]

Οι δεσμοί στο μόριο του πολυακετυλενίου σχηματίζουν γωνία 120° μεταξύ τους, και απαντάται σε δύο μορφές: τα ισομερή cis-πολυακετυλένιο και trans-πολυακετυλένιο. Στις αρχές του 1970 ο Ιάπωνας χημικός Shirakawa ανακάλυψε ότι ήταν δυνατό να συνθέσει πολυακετυλένιο αλλάζοντας τις αναλογίες των cis και trans ισομερών σε μαύρη μεμβράνη πολυακετυλενίου. Με την προσθήκη καταλυτών και την αλλαγή των συνθηκών θερμοκρασίας η μεμβράνη πήρε ασημί χρώμα αποτελούμενη από καθαρό trans-πολυακετυλένιο, ενώ σε άλλη θερμοκρασία πήρε το χρώμα του χαλκού και ήταν cis-πολυακετυλένιο. Αυτή η ανακάλυψη ήταν αποφασιστικής σημασίας στο πείραμα του Shirakawa. Σε ένα άλλο σημείο του πλανήτη, ο χημικός MacDiarmid και ο φυσικός Alan Heeger πειραματίζονταν με μεμβράνη μεταλλικής όψης, αποτελούμενη από το ανόργανο πολυμερές θειονιτρίδιο. Ο MacDiarmid μίλησε για αυτό σε ένα σεμινάριο στο Τόκιο. Η τυχαία συνάντηση του MacDiarmid και του Shirakawa σε ένα συνέδριο, όπου ο Ιάπωνας ανέφερε την ανακάλυψη του οργανικού πολυμερούς, ήταν αρκετό για να οδηγηθούν και οι τρεις στη βράβευση με Nobel. Στο πανεπιστήμιο της Πεννσυλβάνια, άρχισαν να καταπιάνονται με την οξειδωση του πολυακετυλενίου με ιώδιο. Το αποτέλεσμα ήταν η αύξηση της αγωγιμότητας του νέου πολυμερούς δέκα εκατομμύρια φορές [25]. Η σπουδαία ανακάλυψή τους ήταν αποτέλεσμα εντυπωσιακής δουλειάς αλλά και τυχαίων περιστάσεων. Το καλοκαίρι του 1977 οι τρεις επιστήμονες δημοσίευσαν την ανακάλυψή τους, η οποία θεωρήθηκε μεγάλο επιστημονικό επίτευγμα, στην επιστημονική κοινότητα: "*The Journal of Chemical Society, Chemical Communications*". Από τότε το πεδίο έρευνας αναπτύχθηκε αλματωδώς βρίσκοντας ολοένα και περισσότερες

τεχνολογικές εφαρμογές και 23 χρόνια μετά τη δημοσίευση, ακολούθησε και η βράβευση.

Η εισαγωγή ενός δεύτερου οργανικού ημιαγωγίμου στρώματος έγινε στα μέσα περίπου της δεκαετίας του '80 από τον Tang φτάνοντας σε απόδοση 1%, παρόλο που λέγεται ότι τέτοιες συσκευές είχαν ήδη δημιουργηθεί από τα τέλη της δεκαετίας του '70 [36]. Στην αρχή της δεκαετίας του '90, μια καινούρια δομή συσκευής συστήθηκε στον τομέα αυτόν, η οποία στόχο είχε να απαλείψει προβλήματα τα οποία αφορούσαν το μικρό μήκος διάχυσης των φορτίων, πριν την επανασύνδεση του με ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίου ή θερμότητας, καθώς και το απαιτούμενο πάχος των στρωμάτων ώστε να απορροφούν μεγαλύτερο αριθμό φωτονίων. Αυτή η δομή συσκευής ονομάστηκε “bulk heterojunction” (BHJ) [37].

5.2. 3&'(*%+ " K%, # "5 J#A "-(. 7 - / , & '0 '1&"2. 7 -

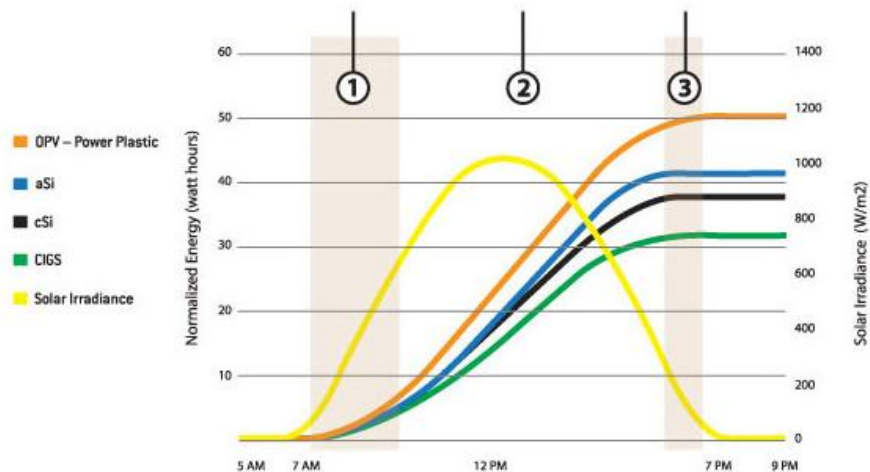
Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ανόργανα, παρόλα αυτά όμως έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια τις τελευταίες δεκαετίες για την ανάπτυξη οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Τα πολυμερή ηλιακά κύτταρα (πλαστικά ηλιακά κύτταρα) είναι ένας τύπος των οργανικών φωτοβολταϊκών (τυπικά 100nm) οργανικών ημιαγωγών όπως πολυμερή και ενώσεις μικρών μορίων. Δεδομένου ότι τα πολυμερή φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι ασυναγώνιστα από την άποψη του κόστους, την ταχύτητα, την απλότητα και το θερμικό ισοζύγιο, είναι η μόνη φωτοβολταϊκή

τεχνολογία που προσφέρει ενδεχομένως μια πειστική λύση στο πρόβλημα του υψηλού κόστους που αντιμετωπίζεται συνήθως στις κλασικές φωτοβολταϊκές τεχνολογίες[38]. Είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία εμφανίζεται με την μορφή λεπτού φιλμ. Η αρχική τους μορφή ήταν υγρή και στην πορεία των ερευνών έφτασε σε πηκτή, παχύρρευστη μορφή. Οι ερευνητές προσπαθούν να κατασκευάσουν όσο το δυνατόν πιο στερεά οργανικά στοιχεία, ώστε να σχηματιστεί το πάνελ. Λόγω της ρευστότητας της πρώτης ύλης (υγρό διάλυμα) τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν ευκαμψία. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από πολυχρωμία, λόγω των χρωστικών ουσιών στο διάλυμα. . Δεδομένου ότι είναι σε μεγάλο βαθμό από συνθετικά υλικά, σε αντίθεση με το παραδοσιακό πυρίτιο, η κατασκευαστική διαδικασία είναι οικονομικά αποδοτική (υλικό χαμηλότερου κόστους, υψηλή απόδοση παραγωγής) με περιορισμένες τεχνικές δυσκολίες (δεν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες ή υψηλές συνθήκες κενού), γεγονός που επιτρέπει να θεωρείται δυνατή η αξιοποίησή τους ακόμα και με το μειονέκτημα του πολύ μικρότερου χρόνου ζωής τους σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Συνήθως το κύτταρο έχει μπροστά γυαλί, ένα διάφανο στρώμα επαφής από οξειδίο ίνδιου και κασσίτερου (ITO), ένα αγωγίμο πολυμερές, ένα φωτοενεργό πολυμερές και τέλος το πίσω στρώμα επαφής (αλουμίνιο, άργυρος κ.α.). Λειτουργούν ικανοποιητικά τόσο με άμεση ακτινοβολία, όσο και σε συνθήκες διάχυτου φωτισμού[38].

Σε αντίθεση με τα κύτταρα πυριτίου και αυτά των υπόλοιπων τεχνολογιών, τα οργανικά φωτοβολταϊκά συγκεντρώνουν ενέργεια από σχεδόν την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2 τα οργανικά φωτοβολταϊκά

ξεκινούν να παράγουν ενέργεια νωρίτερα από τα φβ των άλλων τεχνολογιών και εξαιτίας της θετικής τιμής της θερμικής σταθεράς τους, η παραγόμενη ενέργειά τους αυξάνεται με πιο γρήγορο ρυθμό και παρουσιάζει αύξηση ακόμα και όταν η ενέργεια που παράγουν οι άλλες τεχνολογίες έχει σχεδόν σταθεροποιηθεί [39].



Σχήμα 5.2: Συγκέντρωση ενέργειας ανά τεχνολογία [39]

Μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τους ανόργανους ημιαγωγούς είναι η μικρότερη (μερικές τάξεις μεγέθους μικρότερη) κινητικότητα των φορέων φορτίου, η οποία έχει σοβαρές επιπτώσεις στην απόδοση των οργανικών ημιαγωγίμων συσκευών. Ωστόσο, οι οργανικοί ημιαγωγοί έχουν σχετικά υψηλό συντελεστή απορρόφησης, η οποία εν μέρει εξισορροπεί τα προβλήματα που προκύπτουν από τη χαμηλή κινητικότητα, δίνοντας μεγάλη απορρόφηση ακόμα και σε πολύ λεπτές συσκευές [40]. Τα οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα μπορούν να εφαρμοστούν σε εύκαμπτο υπόστρωμα, ώστε σε έκταση ενός τετραγωνικού μέτρου το βάρος τους να εκτιμάται σε περίπου 500 γραμμάρια και η χρονική διάρκεια ενεργειακής απόσβεσης τους ανέρχεται σε μερικές εβδομάδες [41]. Οι οργανικοί ημιαγωγοί έχουν χαμηλότερο κόστος από τους συμβατικούς

ανόργανους και μπορούν να έχουν πολύ μεγάλους συντελεστές οπτικής απορρόφησης πράγμα που δηλώνει τη δυνατότητα παραγωγής πολύ λεπτών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η δυνατότητα χρήσης ελαστικών υποστρωμάτων σε διαδικασίες εκτύπωσης υψηλών ταχυτήτων μπορεί εύκολα να μειώσει το κόστος ισοζυγίου των οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων πράγμα που οδηγεί σε πολύ μικρούς χρόνους απόσβεσης τόσο της ενέργειας παραγωγής όσο και του κόστους παραγωγής [42]. Η μηχανική ευελιξία αυτών των φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι πολύ ευπρόσδεκτη για πολλές εφαρμογές, και ειδικά σε εφαρμογές με κυρτές επιφάνειες. Τα περισσότερα από τα οργανικά ημιαγώγιμα υλικά έχουν σαν φορείς αγωγιμότητας τις οπές, και έχουν ενεργειακό χάσμα ζωνών γύρω στα 2eV, το οποίο είναι σημαντικά υψηλότερο από εκείνο του πυριτίου και έτσι περιορίζεται η ικανότητα απορρόφησης του ηλιακού φάσματος σε μεγάλο βαθμό [38]. Η απόδοση των πολυμερών οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει φτάσει σήμερα στο 2,5%, αποδόσεις που είναι σχετικά χαμηλές σε σχέση με τις συμβατικές διατάξεις πυριτίου, όπου έχουν συνήθεις αποδόσεις γύρω στο 15% [40].

Υπάρχουν, ωστόσο, άλυτα προβλήματα μέχρι τώρα στην χρήση των οργανικών φωτοβολταϊκών όπως η χαμηλή απόδοση μετατροπής ενέργειας και η κακή λειτουργική σταθερότητα.

5.3. Συζυγή πολυμερή

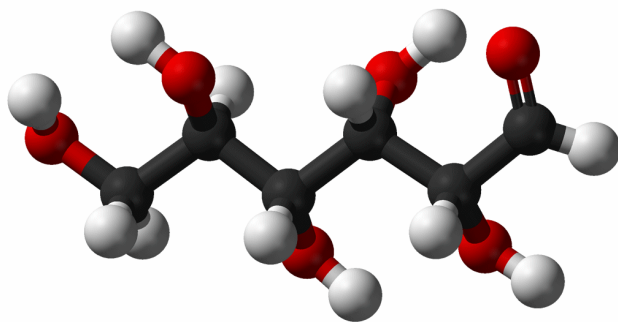
Τα πολυμερή είναι χημικές ενώσεις, αποτελούμενες από ένα μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων ομοίων μορίων (μονομερή), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους διαμορφώνοντας μακρομοριακές αλυσίδες μεγάλου μοριακού βάρους [43].

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[44].

Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Στα πολυμερή που η μεταφορά φορτίου γίνεται με ιοντικό μηχανισμό και ονομάζονται πολυμερείς ηλεκτρολύτες ή ιοντικά πολυμερή, και στα πολυμερή που ο μηχανισμός μεταφοράς φορτίου είναι κυρίως ηλεκτρονιακής φύσης και ονομάζονται αγώγιμα πολυμερή. Τα συζυγή πολυμερή συμπεριφέρονται ως μονωτές ή ημιαγωγοί, ενώ μετά από νόθευση (doping), γίνονται αγωγοί. Ο

άνθρακας, είναι το βασικό στοιχείο ενός οργανικού μορίου [45].

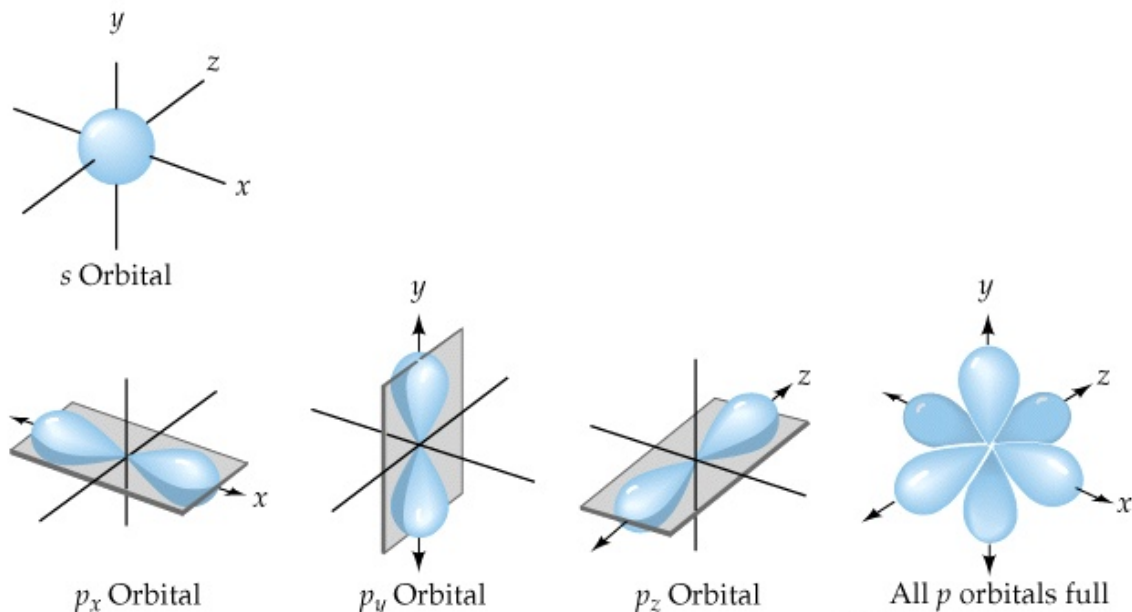
Ένα πολυμερές περιέχει μια μεγάλης διάρκειας ακολουθία διαδοχικών ατόμων του. Τα άτομα άνθρακα συνδέονται σειριακά μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς. Μια πολυμερική αλυσίδα μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργείται από μικρές επαναλαμβανόμενες μονάδες μέσα στη αλυσίδα. Αυτές οι μονάδες ονομάζονται μονομερή και αποτελούν τις δομικές μονάδες ενός πολυμερούς. Η μοναδική ιδιότητα των **συζυγών πολυμερών** οφείλεται στη παρουσία συζυγών διπλών δεσμών κατά μήκος της πολυμερικής αλυσίδας. Επιπροσθέτως, οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων του άνθρακα είναι διαδοχικά μονοί και διπλοί. Κάθε απλός δεσμός συνδέεται με έναν σ δεσμό που αποτελεί ισχυρό δεσμό, ενώ κάθε διπλός δεσμός περιέχει έναν ασθενέστερο π δεσμό (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Η απλή μορφή της κύριας ανθρακικής αλυσίδας [46]

Για να κατανοηθούν οι ιδιότητες ενός οργανικού ημιαγωγού πρέπει να εξεταστεί ο χημικός δεσμός μεταξύ των ατόμων άνθρακα. Ο άνθρακας έχει έξι ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα. Η ηλεκτρονιακή του δομή είναι $1s^2 2s^2 2p^2$. Τα δύο $1s$ ηλεκτρόνια αναφέρονται ως ηλεκτρόνια καρδιάς ενώ τα υπόλοιπα ως

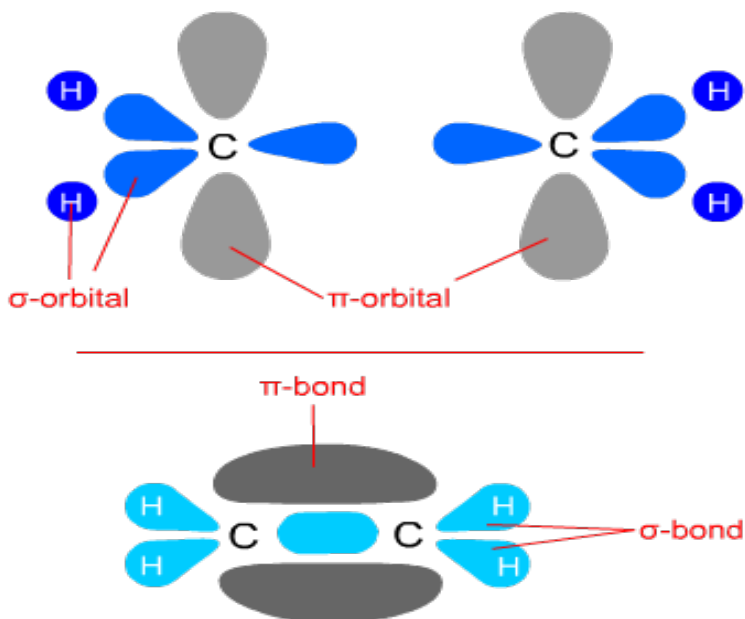
ηλεκτρόνια σθένους. Τα δύο 1s ηλεκτρόνια είναι σφαιρικά συμμετρικά ενώ τα 2p τροχιακά σχηματίζουν συμμετρικούς λοβούς για να κρατήσουν τα έξι ηλεκτρόνια(σχήμα 5.4) [47].



Σχήμα 5.4: (α) s και (β) p τροχιακά ατόμου του C [47]

Τα ηλεκτρόνια σθένους εμφανίζουν υβριδισμό ως συνέπεια της ηλεκτρονικής διέγερσης ενός ή περισσότερων 2s ηλεκτρονίων σε ένα άδειο 2p τροχιακό.

Ανάλογα με το πώς τα ηλεκτρόνια σθένους υβριδίζονται, έχουμε sp^3 , sp^2 ή sp υβριδισμό. Στα συζυγή πολυμερή τρία από αυτά, δύο με 2p, ($2p_x$ και $2p_y$) και ένα με 2s, σχηματίζουν τρία sp^2 υβριδικά τροχιακά που εμφανίζουν τρεις συμμετρικούς λοβούς (Σχήμα 5.5).

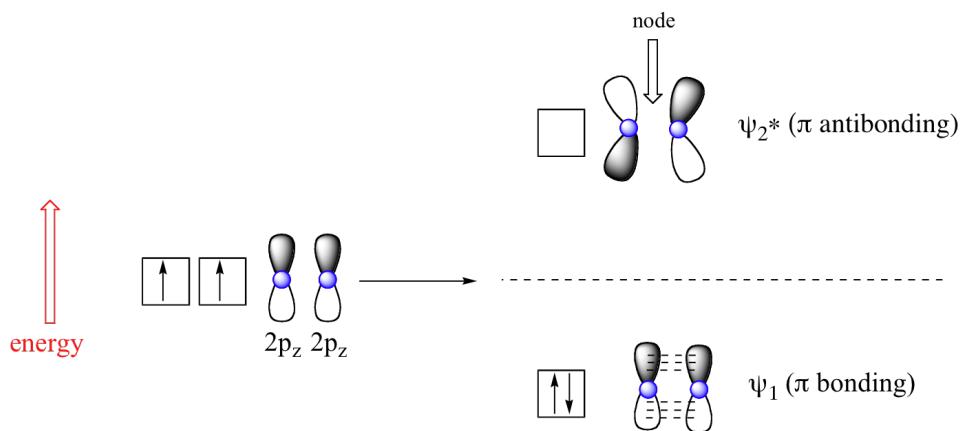


Σχήμα 5.5: sp^2 υβριδισμός ατόμων άνθρακα [48]

Δύο από αυτά θα σχηματίσουν τον σ δεσμό ενώ το τρίτο θα δεσμεύσει το άτομο του υδρογόνου. Το τέταρτο ηλεκτρόνιο σθένους θα σχηματίσει το p_z τροχιακό. Τα p_z ηλεκτρόνια θα σχηματίσουν π δεσμούς με τα γειτονικά άτομα άνθρακα και έτσι εμφανίζονται τα συζευγμένα πολυμερή τα οποία παρουσιάζουν π -ηλεκτρονιακές καταστάσεις κατά μήκος της κύριας ανθρακικής αλυσίδας τους [47].

5.4. Ηλεκτρικές ιδιότητες συζυγών πολυμερών

Τα συζυγή πολυμερή παρουσιάζονται ως ηλεκτρικοί μονωτές ή ημιαγωγοί και η δομή των ενεργειακών ζωνών τους είναι ανάλογη με αυτή των ανόργανων υλικών. Η προέλευση των ημιαγωγίμων ιδιοτήτων αυτών των πολυμερών σχετίζεται με τις ιδιότητες των π δεσμών. Αρχικά, οι π δεσμοί είναι μη εντοπισμένοι διεσπαρμένοι πάνω από όλο το μόριο και στη συνέχεια η κβαντομηχανική επικάλυψη των p_z τροχιακών σε δύο άτομα άνθρακα αίρει τον εκφυλισμό και παράγει δύο τροχιακά, ένα δεσμικό (π) και ένα αντι-δεσμικό (π^*) (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6: Σχηματισμός δεσμικού (π) και ένα αντι-δεσμικού (π^*) τροχιακού [49]

Το χαμηλότερης ενέργειας π-τροχιακό αποτελεί την ζώνη σθένους και το υψηλότερης ενέργειας π^* -τροχιακό αποτελεί την ζώνη αγωγιμότητας. Σε μια πολυμερική αλυσίδα, διάφορα ηλεκτρόνια συμβάλλουν για το π-σύστημα, τα

δεσμικά και τα αντι-δεσμικά τροχιακά εκφυλίζονται περαιτέρω, και τέλος δημιουργούνται ευρείες σχεδόν συνεχείς ενεργειακές ζώνες [50].

Ανάλογα με τον ορισμό της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας σε ανόργανους ημιαγωγούς, στα πολυμερή το κατειλημμένο π-τροχιακό σχηματίζει το υψηλότερο κατειλημμένο μοριακό τροχιακό HOMO (Highest Occupied

Molecular Orbital) ενώ το μη κατειλημμένο π^{*} σχηματίζει το χαμηλότερο μη-κατειλημμένο μοριακό τροχιακό LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital).

Καθώς η επικάλυψη μεταξύ των γειτονικών p_z τροχιακών και ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στο π σύστημα αυξάνεται, το πλάτος των ενεργειακών ζωνών μεγαλώνει και το ενεργειακό χάσμα ανάμεσα τους ελαττώνεται.

Η διαφορά ενέργειας μεταξύ της HOMO και της LUMO ορίζεται ως ενεργειακό χάσμα (όπως και στους ανόργανους ημιαγωγούς). Το ενεργειακό χάσμα καθορίζει τις οπτοηλεκτρονικές ιδιότητες των συζυγών πολυμερών ενώ η τιμή του εξαρτάται από την γεωμετρία και τον τύπο του μονομερούς που αποτελεί το δομικό στοιχείο ενός πολυμερούς. Γενικότερα έχει εύρος 1.5eV-3.5eV (λόγω παραμόρφωσης Peierls) [51], κάτι που υποδηλώνει ότι τα περισσότερα συζυγή πολυμερή είναι ενεργά στην περιοχή του ορατού μήκους κύματος. Η διέγερση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας είναι αντίστοιχη διαδικασία με την μεταφορά ενός ηλεκτρονίου από ένα δεσμικό τροχιακό σε ένα αντι-δεσμικό, με την παροχή μεγαλύτερης ενέργειας από το ενεργειακό χάσμα. Σε μια πραγματική πολυμερική αλυσίδα, η συζυγία δεν μπορεί να εκτείνεται σε

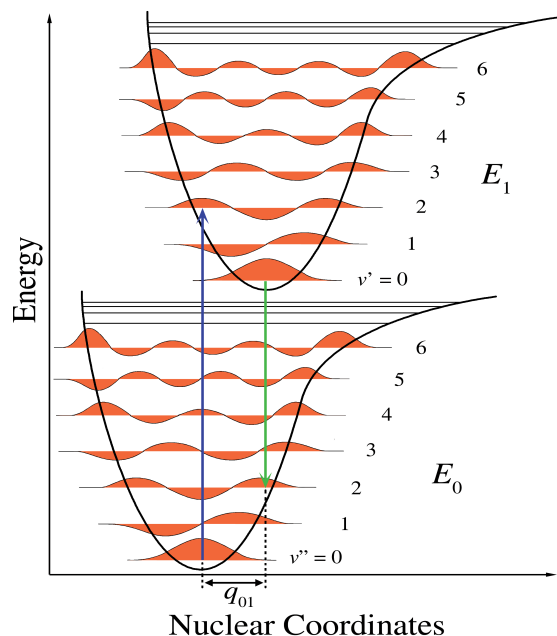
όλο της το μήκος, καθώς ατέλειες και ελαττώματα διακόπτουν την επικάλυψη των τροχιακών.

Αντί αυτού υπάρχουν μια σειρά από τμήματα, καθένα από τα οποία θα απαρτίζεται από διαφορετικό αριθμό μονάδων και θα έχουν διαφορετικό ενεργειακό χάσμα. Γενικά τα μικρότερα τμήματα θα έχουν ένα ευρύ ενεργειακό χάσμα, ενώ τα μεγαλύτερα στενότερο [52].

Στους στερεούς κρυστάλλους υπάρχει μια τρισδιάστατη ηλεκτρονιακή δομή των ενεργειακών ζωνών που αντιστοιχεί στην τρισδιάστατη φύση των κρυστάλλων. Τα πολυμερή είναι ουσιαστικά ένα μονοδιάστατο σύστημα. Αυτή η δομή προκύπτει από το μεγάλο μήκος της αλυσίδας των ατόμων άνθρακα που την αποτελούν, που είναι ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους και έχουν μικρή αλληλεπίδραση με τις γειτονικές πολυμερικές αλυσίδες. Ειδικότερα, υπάρχει ισχυρή σύζευξη μεταξύ των διεγέρσεων των ηλεκτρονίων και την τοπική μορφή της αλυσίδας του πολυμερούς. Αυτό οδηγεί σε μια οικογένεια διεγερμένων καταστάσεων, όπως είναι τα πολαρόνια, διπολαρόνια, και τα εξιτόνια, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις διεγέρσεις των ηλεκτρονίων σε ένα πολυμερές σε συνδυασμό με ορισμένες στρεβλώσεις στο πλέγμα τους.

- *Πολαρόνιο:*

Σε ένα συνηθισμένο ημιαγωγό, η απόσπαση του ηλεκτρονίου από την ζώνη σθένους ή η προσθήκη ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας, δε συνοδεύεται συνήθως από παραμόρφωση του πλέγματος. Αντίθετα, η απόσπαση η προσθήκη ενός ηλεκτρονίου στις π-καταστάσεις ενός συζυγούς πολυμερούς, αντί να δημιουργήσει έναν ελεύθερο φορέα μέσα στην αδιατάρακτη αλυσίδα, είναι ενεργειακά πιο συμφέρον να περιορίσει τη δυνατότητα κίνησης του φορέα δημιουργώντας γύρω του μια παραμορφωμένη περιοχή. Η περιοχή αυτή εκτείνεται με μήκος μερικών μονάδων της αλυσίδας. Η παραμόρφωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των χημικών δεσμών και την εμφάνιση συγκεκριμένων ενεργειακών σταθμών εντός του ενεργειακού χάσματος. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να κατανοηθεί από το διάγραμμα μιας τυπικής αλυσίδας αγωγίμου πολυμερούς, που φαίνεται στο σχήμα 5.7



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα Franck-Condon μιας τυπικής αλυσίδας ενός αγώγιμου πολυμερούς [53].

Στον οριζόντιο άξονα παρίσταται η μέση απόσταση μεταξύ των ατόμων που αποτελούν την αλυσίδα, ενώ στον κάθετο άξονα παρίσταται η ενέργεια των χημικών δεσμών. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι, όταν η αλυσίδα του πολυμερούς είναι ουδέτερη (Καμπύλη E_0) η ελάχιστη ενέργεια της (στην ευσταθή κατάσταση), συμβαίνει για μια ορισμένη κατάσταση χ_A των ατόμων. Αν τώρα από την αλυσίδα αφαιρεθεί (ή προστεθεί) ένα ηλεκτρόνιο, τότε η ενέργεια αυτής αυξάνει από E_A σε E_B . Επειδή όμως στη θέση B η ιονισμένη αλυσίδα δεν χαρακτηρίζεται από ελάχιστη ενέργεια, οπότε η κατάσταση δεν είναι ευσταθής, παραμορφώνεται, έτσι ώστε να φτάσει στη θέση Γ, η οποία χαρακτηρίζεται από ελάχιστη ενέργεια και στην οποία αντιστοιχεί μια νέα κατάσταση χ_Γ .

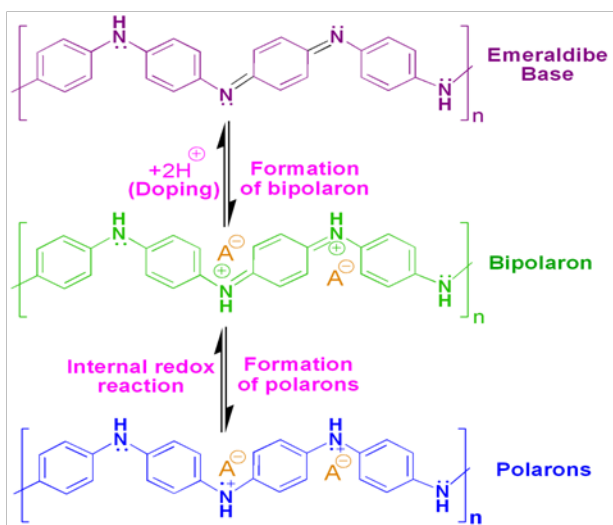
Η ενεργειακή μετάβαση της αλυσίδας από την κατάσταση A στην κατάσταση Γ μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται και με μια διαφορετική διαδρομή. Υποθέτουμε ότι πρώτα παραμορφώνεται η αλυσίδα μεταβαίνοντας από την κατάσταση A στην Δ και κατόπιν με ιονισμό καταλήγει στην Γ. Μια τέτοια διαδικασία όμως θα είχε ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση των ενεργειακών σταθμών. Επομένως μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η παραμόρφωση της αλυσίδας προκαλεί την εμφάνιση ενεργειακών καταστάσεων μέσα στο ενεργειακό χάσμα, οι οποίες είναι εντοπισμένες στην περιοχή της διαταραχής και βρίσκονται εκατέρωθεν της στάθμης Fermi [54].

Οι στάθμες αυτές, απέχουν σχεδόν εξίσου από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας και την κορυφή της ζώνης σθένους και προέρχονται από την απόσπαση ενεργειακών σταθμών από τις αντίστοιχες γειτονικές ζώνες. Έτσι, η ενέργεια που απαιτείται για την απόσπαση ενός ηλεκτρονίου μειώνεται κατά μια ποσότητα $\Delta\epsilon$. Στην περίπτωση τώρα που η $\Delta\epsilon$ είναι μεγαλύτερη της ενέργειας E_{dis} που χρειάζεται για να προκληθεί η παραμόρφωση της αλυσίδας γύρω από το φορτίο, τότε η διαδικασία εντοπισμού του φορτίου είναι ενεργειακά προτιμητέα, σε σύγκριση με εκείνη που συμβαίνει σε ένα συνηθισμένο ημιαγωγό. Το διαταραγμένο τμήμα της αλυσίδας μαζί με το εντοπισμένο φορτίο που περικλείει ονομάζεται 'πολαρόνιο' (polaron). Η ποσότητα $\Delta\epsilon - E_{dis}$ αποτελεί ένα μέτρο σταθερότητας του πολαρονίου και υπολογισμοί έχουν δείξει ότι η δημιουργία ενός πολαρονίου είναι ενεργειακά συμφέρουσα σε όλα τα συζυγή πολυμερή.

- Διπολαρόνιο

Το διπολαρόνιο είναι ένα σύστημα δύο ομοίων ηλεκτρικών φορτίων που συνδέονται μεταξύ τους με μια έντονη τοπική παραμόρφωση της αλυσίδας. Το διπολαρόνιο μπορεί να θεωρηθεί σαν ανάλογο του ζεύγους ηλεκτρονίων-Cooper ενός υπεραγωγού (γνωστό από την θεωρία BCS στους υπεραγωγούς), τα οποία ηλεκτρόνια συνδέονται μέσω μιας ιδιοταλάντωσης του πλέγματος, δηλαδή μέσω ενός φωτονίου [55,56].

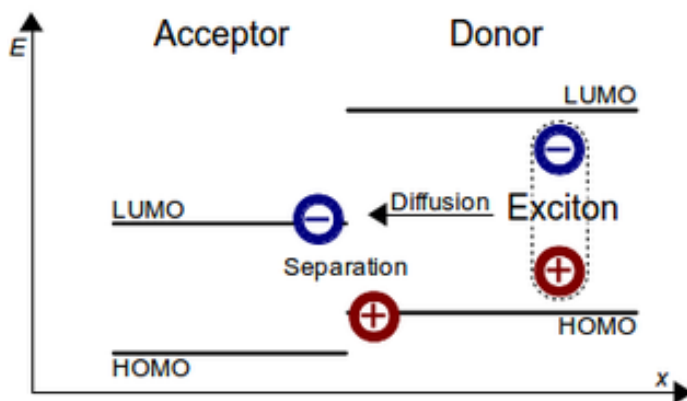
Η μορφή των ενεργειακών ζωνών κατά τον σχηματισμό ενός διπολαρονίου φαίνεται στο σχήμα 5.8 Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι επειδή κατά τον σχηματισμό του διπολαρονίου η παραμόρφωση της αλυσίδας είναι εντονότερη γύρω από τα δύο φορτία, οι δύο στάθμες που εμφανίζονται με τη δημιουργία του διπολαρονίου είναι περισσότερο απομακρυσμένες από τα άκρα των δύο ζωνών.



Σχήμα 5.8: Δημιουργία α) πολaronίου και β) διπολαρονίου [57]

• *Εξιτόνιο:*

Η ύπαρξη των εξιτονίων είναι γνωστή στους ημιαγωγούς και σε μοριακούς κρυστάλλους, όμως έχει αποδειχτεί η ύπαρξη τους και στα πολυμερή. Για τους ημιαγωγούς το ηλεκτροστατικά συζευγμένο από δυνάμεις Coulomb ζεύγος ηλεκτρονίου οπής ονομάζεται εξιτόνιο. Η ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ ηλεκτρονίου και οπής έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία καταστάσεων μεταβάσεως εντός του ενεργειακού χάσματος. Σε μοριακούς κρυστάλλους το εξιτόνιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ζεύγος ηλεκτρονίου οπής τοποθετημένο σε μια μοριακή ενότητα (εξιτόνιο Frenkel ή μοριακό εξιτόνιο). Στα οργανικά υλικά όταν ένα φωτόνιο κατάλληλης ενέργειας αλληλεπιδράσει με ένα ηλεκτρόνιο το οποίο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, το ηλεκτρόνιο προωθείται από την HOMO στη LUMO (π-π* μετάβαση). Ωστόσο το ηλεκτρόνιο παραμένει δεσμευμένο με την οπή (λόγω δυνάμεων Coulomb) και η κίνησή τους διαμέσου του υλικού είναι συζευγμένη (σχήμα 5.9) [58].



Σχήμα 5.9: Δημιουργία εξιτονίου [59]

Αυτά τα συζευγμένα ζευγάρια είναι γνωστά σαν εξιτόνια. Ένα εξιτόνιο θεωρείται Frenkel αν περιορίζεται σε μια μοριακή μονάδα ενώ Wannier-Mott αν επεκτείνεται σε πολλές. Η ενδιάμεση κατάσταση, όπου ένα εξιτόνιο εντοπίζεται σε μερικές γειτονικές μοριακές μονάδες καλείται charge-transfer εξιτόνιο. Επίσης, οι όροι 'inter-chain' και 'intra-chain' εξιτόνιο, χρησιμοποιούνται για πολυμερικούς ημιαγωγούς προκειμένου να δηλώσουν ότι τα φορτία βρίσκονται σε διαφορετική ή ίδια πολυμερική αλυσίδα αντίστοιχα.

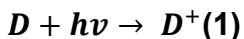
Στα συζυγή πολυμερή η ενέργεια δεσμού του εξιτονίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του πολυμερούς. Για πολυδιακετυλένιο υψηλής κρυσταλλικότητας, η ενέργεια δεσμού είναι ~ 0.5 eV , ενώ σε άμορφα πολυμερή όπως το πολυθειοφένιο και το PPV είναι ~ 0.44 eV.

5.5. Δομή και λειτουργία οργανικών φωτοβολταϊκών

Στην θεωρία του κλασσικού φωτοβολταϊκού φαινομένου δημιουργείται μια απόκλιση του ηλεκτροστατικού δυναμικού με τη παρουσία φωτός. Αυτή η απόκλιση δυναμικού βοηθάει στην μετακίνηση και των διαχωρισμό των φωτοπαραγόμενων φορέων φορτίου. Έτσι η συγκεκριμένη δομή μεταμορφώνει το φωτορεύμα που δημιουργείται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο από φωτοαγωγιμότητα σε παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ένα ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια με διαφορετικό έργο εξόδου στα διάφορα επίπεδα των φωτοβολταϊκών διατάξεων. Η τυπική δομή ενός οργανικού φωτοβολταϊκού αποτελείται από ένα διαφανές ηλεκτρόδιο καθόδου το φωτοενεργό στρώμα, το ηλεκτρόδιο ανόδου και το υπόστρωμα. Το ηλεκτρόδιο ανόδου χρησιμοποιείται για την απορρόφηση της ακτινοβολίας και είναι το σημείο κατά το οποίο συλλέγονται οι σπές. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια ανόδου έχουν υψηλό έργο εξόδου (work function) και το ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό είναι το ITO. Το φωτοενεργό στρώμα βρίσκεται ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια και αποτελεί το μέσο στο οποίο δημιουργούνται τα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Ένα πολυμερές λειτουργεί ως δότης (Donor, D) ηλεκτρονίων και ένα άλλο οργανικό υλικό ως δέκτης (Acceptor, A), δεδομένου ότι παίρνει στην πραγματικότητα το ηλεκτρόνιο από τον D [58].

Η παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος ξεκινά με την απορρόφηση μέρους της ηλιακής ακτινοβολίας από το συζυγιακό πολυμερές, με το χαρακτηριστικό του

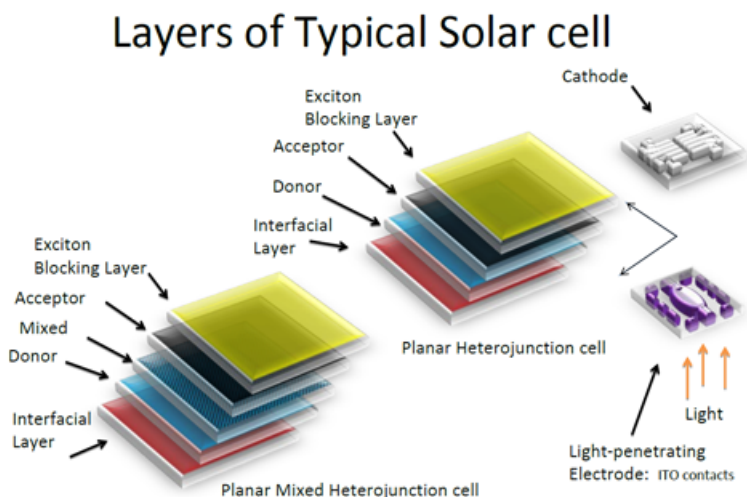
δότη ηλεκτρονίων. Κατά την απορρόφηση ενός φωτονίου επιτυγχάνεται η διέγερση ενός ηλεκτρονίου, από την στοιβάδα HOMO στην στοιβάδα LUMO. Έτσι επιτυγχάνεται η πρώτη διαδικασία στην παραγωγή ρεύματος, η οποία και μπορεί να αποτυπωθεί με την ακόλουθη αντίδραση:



Το επόμενο στάδιο του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι η απορρόφηση του διεγερμένου ηλεκτρονίου, του δότη ηλεκτρονίου, από το συζυγιακό πολυμερές, το οποίο χαρακτηρίζεται ως δέκτης ηλεκτρονίων. Η συγκεκριμένη διεργασία είναι επιτρεπτή μόνο στην περίπτωση που η στάθμη LUMO του δότη ηλεκτρονίων έχει υψηλότερη ενέργεια από την στάθμη LUMO του δέκτη ηλεκτρονίων, έτσι ώστε να είναι θερμοδυναμικά επιτρεπτή η μεταφορά του ηλεκτρονίου από τον δότη στον δέκτη ηλεκτρονίων. Έχουμε λοιπόν, την διαδικασία της διάσπασης του εξιτονίου και την μεταφορά του ηλεκτρονίου από τον δότη στον δέκτη [60]. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αποτυπωθεί με την ακόλουθη αντίδραση:



Στο τελικό στάδιο έχουμε την συλλογή των ηλεκτρονίων και των οπών στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια και την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος[61].

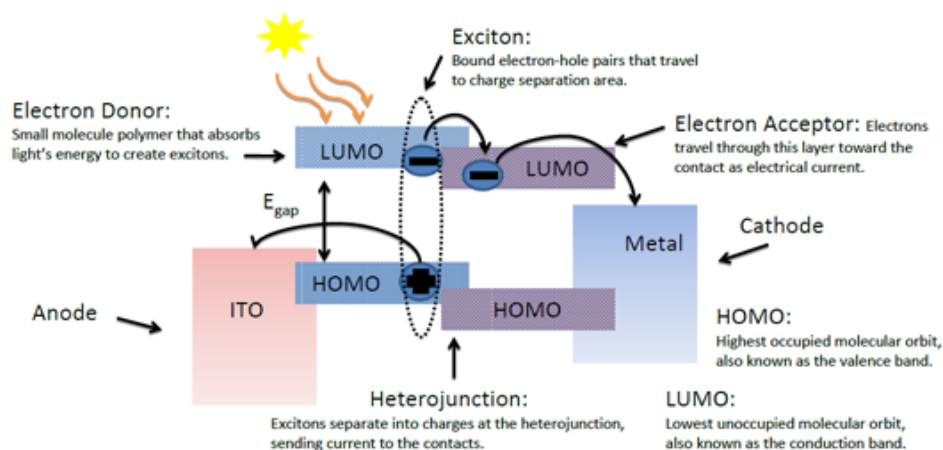


Σχήμα 5.10: Τυπική διάταξη οργανικής ηλιακής κυψελίδας [62]

Αν και η διαδικασία είναι φαινομενικά απλή, στην πραγματικότητα η δημιουργία ενός συστήματος, το οποίο και θα αποδίδει τα μέγιστα, δεν έχει ακόμα εφευρεθεί. Τα προβλήματα που παρουσιάζονται έχουν να κάνουν κυρίως με τις αντιδράσεις (1) και (2). Αρχικά, λοιπόν, η χρήση πολυμερικών υλικών, με μικρό ενεργειακό χάσμα (E_g), είναι επιτακτική, διότι με αυτόν τον τρόπο ο δότης ηλεκτρονίων απορροφάει μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας, άρα και περισσότερη ενέργεια για την φωτοβολταϊκή διάταξη. Επίσης, το συζυγιακό πολυμερές, το οποίο και θα χαρακτηρίζεται ως δότης ηλεκτρονίων, θα πρέπει να έχει πολύ καλή κινητικότητα οπών, ώστε να γίνεται επιτυχής συλλογή τους στο αντίστοιχο ηλεκτρόδιο. Όσον αφορά τον δέκτη ηλεκτρονίων, στην περίπτωση αυτή το βασικό χαρακτηριστικό που πρέπει να εμφανίζει είναι, να έχει πολύ χαμηλότερο LUMO, για την επιτυχή απορρόφηση του διεγερμένου ηλεκτρονίου, από τον δότη ηλεκτρονίων. Στην αντίθετη περίπτωση, το διεγερμένο ηλεκτρόνιο θα αποδιεγερθεί μεταπηδώντας στην αρχική κατάσταση HOMO, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου, με μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο ενεργειακό

χάσμα του δότη ηλεκτρονίων και φυσικά δεν θα παρατηρείται φωτοβολταϊκό φαινόμενο [63].

Operation of Organic Solar Cell



Σχήμα 5.11: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε μία πολυμερική ηλιακή κυψελίδα [64]

Εκτός από τα χαρακτηριστικά των δύο συζυγιακών πολυμερών, σημαντικό ρόλο στην απόδοση του φωτοβολταϊκού παίζει και η μορφολογία, καθώς και η αναμιξιμότητα των δύο πολυμερών. Η μορφολογία παίζει σημαντικό ρόλο διότι, όταν ο δότης ηλεκτρονίων βρίσκεται στην διεγερμένη κατάσταση, θα πρέπει να βρεθεί «κοντά του» ο δέκτης, δηλαδή να εμφανίζεται μικρού μήκους ετεροεπαφή, ώστε να μην έχουμε την αποδιέγερση του ηλεκτρονίου. Το μήκος λοιπόν, της ετεροεπαφής θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Αυτό, σε συστήματα, τα οποία δεν εμφανίζουν καλή ανάμιξη, μπορεί να επιτευχθεί, με την προσθήκη ενός επιπλέον πολυμερικού υλικού στο μίγμα, το οποίο θα παίζει τον ρόλο του συμβατοποιητή, επιτρέποντας την καλύτερη ανάμιξη των πολυμερών, αλλά και με την χρήση του κατάλληλου διαλύτη, μπορεί να εμφανιστεί η κατάλληλη

μορφολογία [65].

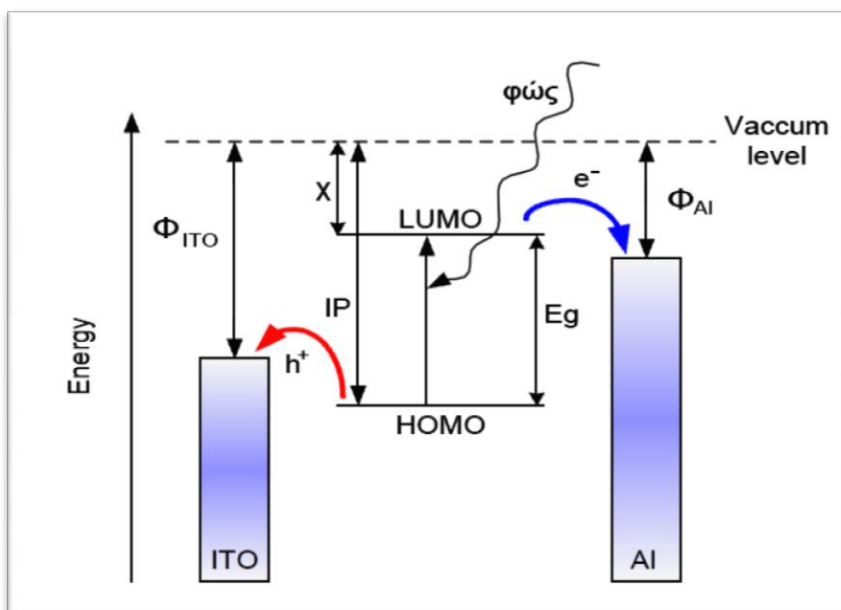
Με τη δημιουργία διασυνδέσεων μεταξύ των μορίων με διαφορετική συγγένεια ηλεκτρονίων, είναι δυνατόν να αυξηθεί η πιθανότητα μεταφοράς ηλεκτρονίων μεταξύ των μορίων. Αυτή η διαδικασία (μεταφορά φορτίου με φωτοδιέγερση) προκαλεί τη δέσμευση φορτίων για διαχωρισμό και η ένωση διαμορφώνεται σαν μια διεπαφή δότη – αποδέκτη που είναι ανάλογη με την ετεροένωση στους ημιαγωγούς.

Ένα τυπικό οργανικό φωτοβολταϊκό κελί περιλαμβάνει ένα φωτοενεργό στρώμα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων διαφορετικού δυναμικού. Το φωτοενεργό υλικό είναι βασισμένο σε single layer, bi-layer ή σε Bulk Heterojunction (BHJ) δομές. Κατά την απορρόφηση φωτός δημιουργούνται ηλεκτρικά φορτία μέσα στο φωτοενεργό στρώμα και λόγω παρουσίας ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο δημιουργείται λόγω των διαφορετικών δυναμικών των ηλεκτροδίων, τα φορτία αυτά μεταφέρονται και συλλέγονται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα.

5.6. Οργανικά Φωτοβολταϊκά μονού στρώματος (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 5.12: Ενεργειακό διάγραμμα μονοστρωματικής διάταξης [66]

5.7. Οργανικά Φωτοβολταϊκά διπλού στρώματος (Bilayer)

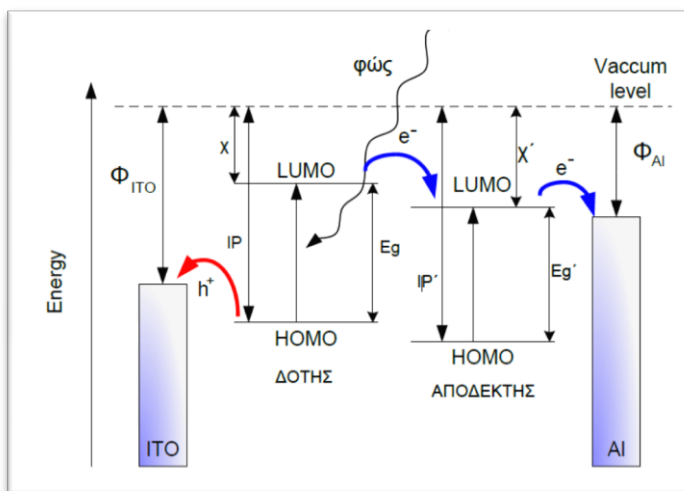
Λόγω των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στις μονοστρωματικές διατάξεις, έγινε αναγκαία η παρασκευή νέων ενεργών υλικών τα οποία αποτελούνται από μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών (heterojunctions), όπου το ένα

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 (band gap) και συνάμα η βελτιστοποίηση της απορρόφησης του φωτός μπορεί να ρυθμιστεί καλύτερα χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς ημιαγωγούς.

Τα υλικά της διεπιφάνειας μπορεί να αποτελούνται από κάποιο πολυμερές σε επαφή με φουλερένιο ή κάποιο παράγωγό του, πολυμερές σε επαφή με άλλο πολυμερές, πολυμερές σε επαφή με κάποιο άλλο μόριο, επαφή δύο χρωστικών κ.α. Στην περίπτωση της επαφής με το φουλερένιο, στο πολυμερές γίνεται η απορρόφηση του φωτός, η δημιουργία του εξιτονίου στη διεπιφάνεια και ο διαχωρισμός του με την εισαγωγή του ηλεκτρονίου στο φουλερένιο. Επομένως ο δέκτης ηλεκτρονίων είναι το φουλερένιο και ο δότης το πολυμερές. Όπως φαίνεται λοιπόν η καλή αγωγιμότητα στη μεταφορά οπών ή ηλεκτρονίων είναι βασικό χαρακτηριστικό για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις αυτές. Τέλος, σημαντικό ρόλο στην κατασκευή αποδοτικών διατάξεων παίζει ο καλός έλεγχος της διεπιφάνειας μεταξύ δότη και δέκτη. [65]

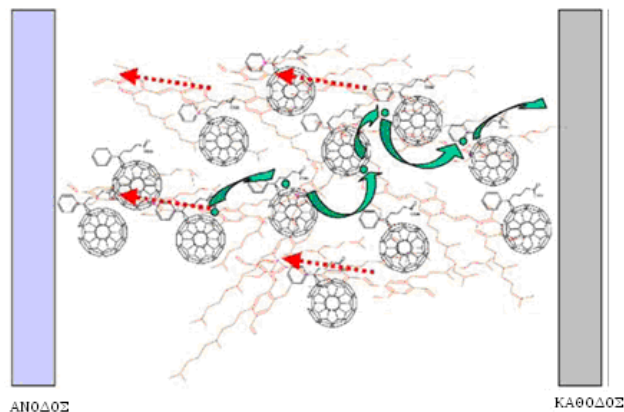


Σχήμα 5.13: Ενεργειακό διάγραμμα διστρωματικής διάταξης [66]

5.8. Οργανικά Φωτοβολταϊκά 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 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 [67]. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο bulk heterojunction, ήταν ένα μίγμα poly[2-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylene vinylene], MEH-PPV, σαν δότη ηλεκτρονίων και cyano-PPV σαν δέκτης ηλεκτρονίων [68]. 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 [69]. **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 5.14: Δομή bulk heterojunction [66]

Ωστόσο, εάν η διαφορετικότητα στην συγγένεια των ηλεκτρονίων δεν είναι επαρκής, το εξιτόνιο μπορεί να εκπέσει στο υλικό με το μικρότερο ενεργειακό διάκενο χωρίς διάσπαση των φορέων του. Τελικά, θα επανασυνδέεται χωρίς να συνεισφέρει το φορτίο του στην παραγωγή φωτορεύματος.

Είναι συνήθης τακτική να χρησιμοποιείται ένα πολυμερές ανάμεσα στα συζυγή πολυμερή και το ηλεκτρόδιο καθόδου έτσι ώστε να αυξάνεται το φράγμα δυναμικού του ηλεκτροδίου. Αυτό το πολυμερές στην περίπτωση μας είναι το PEDOT:PSS και σε στερεά κατάσταση το PEDOT:PSS μπορεί να θεωρηθεί ως μέταλλο και επομένως ως ημι-ηλεκτρόδιο. Το PEDOT:PSS έχει μεγάλη χρησιμότητα στις οργανικές φωτοβολταϊκές διατάξεις διότι ελαχιστοποιεί την ταχύτητα του ITO και βελτιώνει την ηλεκτρική επαφή με το οργανικό υπόστρωμα.

Το ηλεκτρόδιο καθόδου είναι το σημείο κατά το οποίο συλλέγονται τα ηλεκτρόνια και πρέπει να έχει χαμηλό έργο εξόδου. Συνήθως κατασκευάζεται από αλουμίνιο καθώς και άλλα υλικά όπως Ca, Mg, Cu κ.α. Το υπόστρωμα συνήθως αποτελείται από γυαλί. Στο σχήμα 5.14 παρουσιάζεται η δομή ενός οργανικού

φωτοβολταϊκού στοιχείου [58].

5.9. Κ: #(%5 C"&") .%4")&(.M5 B%*-(.M5 J#A"-(. 7- / , &'0'1&"2. 7- !1"()+, -

Για την παραγωγή μιας διατάξης λεπτών υμενίων (πχ. OPV, OLED, ...) απαιτείται χρήση και προπαρασκευή των κατάλληλων υλικών για τα αντίστοιχα επίπεδα στρώματα που τα απαρτίζουν. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν πολυμερή, συνηθίζονται οι λεγόμενες "wet processing" τεχνικές (διότι έχουν να κάνουν με υγρά διαλύματα, αντί, πχ. με στερεούς στόχους προς εξάχνωση). Επίσης, ακόμα και με αυτές τις τεχνικές είναι δυνατή η εκτύπωση μεταλλικών ηλεκτροδίων για την ηλεκτρική διασύνδεση των διατάξεων. Τα πολυμερικά υμένια ακολουθούν διαφορετικές μεθόδους παρασκευής από ότι τα μικρά μόρια. Γιαυτό και προτιμώνται οι wet processing τεχνικές. Τέτοιες τεχνικές επιτρέπουν μαζική και φθηνή παραγωγή [70].

Τεχνικές Coating

Στο Spin Coating το πολυμερικό διάλυμα τοποθετείται στο κέντρο του περιστροφικού δίσκου (substrate). Η ιδιοπεριστροφή του δίσκου με υψηλές γωνιακές ταχύτητες (πχ. 3000 rpm) κάνει το διάλυμα να απλωθεί σε όλη την επιφάνεια. Η περιστροφική ταχύτητα και το ιξώδες του διαλύματος καθορίζουν κυρίως το πάχος του υμενίου. Όσο γρηγορότερη είναι η περιστροφή και αραιότερο το διάλυμα, τόσο λεπτότερο και το τελικό υμένιο. Η μέθοδος παρέχει ακριβή προσδιορισμό του πάχους υμενίου και μπορεί να ενεργήσει σε μεγάλο

εύρος ιξώδους. Τυπικά πάχη είναι μεταξύ 50 και 5000 nm. Μια τυπική μηχανή spin coating έχει διάμετρο 6-8 ιντσών μονάχα. Επίσης, μειονεκτήματα είναι η μεγάλη απώλεια υλικού (>90%) και η ασυμβατότητα του spin coating με το Roll to Roll.

Από την άλλη, στο **Knife Coating** η μελάνη που μόλις επικάθησε στο substrate απλώνεται με μια λεπίδα με ομοιογενή τρόπο σε όλη την επιφάνεια του υποστρώματος και στη συνέχεια θερμαίνεται ώστε να αφυδατωθεί (drying).

Ενώ, στο (παραπλήσιο) **Doctor Blading** η λεπίδα σαρώνει την επιφάνεια του substrate και αφαιρεί όση μελάνη περίσσεψε και δεν εισχώρησε στις εγχαραξίς του.

Το **Spray Coating** είναι μια ευκολότερη εναλλακτική. Σταγονίδια πολυμερικής μελάνης της τάξης μεγέθους μικρομέτρων ψεκάζονται στο substrate, όπου και ξηραίνονται ακαριαία. Όμως, η επιφάνεια που σχηματίζεται είναι σκληρή [70].

Τεχνικές εκτύπωσης (Printing)

Ενώ οι coating τεχνικές ενδείκνυνται για πολυμερικές μελάνες σχετικά μεγαλύτερου ιξώδους, οι printing τεχνικές είναι συμβατές και με πιο αραιά διαλύματα. Κάθε μια αποδίδει καλύτερα σε διαφορετική περιοχή τιμών ιξώδους. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω: Στην

τεχνική **screen printing**, μία διατρητή μεμβράνη (stencil) τοποθετείται πάνω από το substrate. Το πολυμερικό διάλυμα εναποτίθεται και με τη βοήθεια μιας λεπίδας διεισδύει στα ανοίγματα του stencil. Περιορισμό αποτελεί το ότι για να παραχθεί μια διάταξη (πχ. OPV) υψηλής απόδοσης με υλικό που προήλθε από screen printing πρέπει αυτό το υλικό να έχει πολύ μεγάλο ιξώδες. Χωρίζεται σε 2 υποκατηγορίες που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην βιομηχανία για δημιουργία εκτυπωμένων εικόνων στα υφάσματα: **rotary screen printing & flat bed screen printing**. Εντούτοις παρατίθενται σκόπιμα για να γίνει κατανοητότερη η διαδικασία, εφόσον χρησιμοποιούνται ολόιδες στην εκτύπωση υμενίων. Απλά, αντί για χρώμα χρησιμοποιείται πολυμερική μελάνη. Εξασφαλίζουν επαναληψιμότητα, ταχύτητα και οικονομία χώρου λόγω της σπονδυλωτής τοποθέτησεως των κυλίνδρων/μασκών εκτύπωσης.

Characteristic Properties of Printing Methods.				
Method	Resolution (μm)	Layer Thickness (μm)	Ink Viscosity (Pa s)	Maximum Throughput (m^2/h)
Inkjet	>50	0.1–20	0.001–0.04	>50
Screen	>100	1–15	0.5–50	>100
Flexo	>50	0.5–2.5	0.05–0.5	>50,000
Gravure	>30	0.5–8	0.05–0.2	>100,000

Σχήμα 5.15: Χαρακτηριστικές Ιδιότητες της Μεθόδου Printing [70]

Στο **Rotary Screen Printing**, η πολυμερική μελάνη περνά αρχικά στο εσωτερικό

ενός κούφιου κυλίνδρου και μέσω ειδικών αυλακώσεων διαχέεται στην εξωτερική επιφάνεια, καταλαμβάνοντας το επιθυμητό σχήμα που θα εκτυπωθεί στην επιφάνεια του υμενίου. Η ταχύτητα περιστροφής των ρολών είναι σταθερή.

Στο **Flat-bed Screen Printing**, η επιφάνεια προς εκτύπωση εισέρχεται κάτω από μια μάσκα που έχει εγχαραγμένη την επιθυμητή σιλουέτα εκτύπωσης (εδώ: την κάτοψη του ηλεκτρικού κυκλώματος). Πάνω από τη μάσκα επιστρώνεται η μελάνη και συμπιέζεται από λεπίδες ώστε να εισέλθει στις εγχαράξεις. Μετά υψώνεται η μάσκα και απομακρύνεται η εκτυπωμένη επιφάνεια.

Η τεχνική **Inkjet printing** είναι, προς το παρόν, η πιο διαδεδομένη στην παραγωγή οργανικών ηλεκτρονικών και ιδίως των OLEDs. Διαφοροποιείται μεταξύ των OPVs & OLEDs, διότι στα OPVs πρέπει τα σταγονίδια της μελάνης με ομοιογενή τρόπο να καλύψουν ολόκληρη την επιφάνεια του substrate, ενώ στα OLEDs πρέπει κάθε σταγονίδιο να κατευθυνθεί συγκεκριμένα στις συντεταγμένες του προβλεπόμενου pixel. Γενικά, ο σχηματισμός ενός σταγονιδίου γίνεται είτε με μηχανική συμπίεση της μελάνης μέσω ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, είτε με θέρμανση της μελάνης. Έπειτα το σταγονίδιο εκτίθεται σε ηλεκτροστατικό πεδίο, φορτίζεται και επιταχύνεται προς την επιφάνεια [70].

PVD τεχνικές της Εξάχνωσης (evaporation)

Οι PVD διακρίνονται για την υψηλή ποιότητα και καθαρότητα των υμενίων που παράγονται.

Πλεονεκτήματα των PVD τεχνικών:

- 1) υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης,
- 2) ευχρηστία
- 3) σχετικά χαμηλό κόστος.

Μειονεκτήματα:

- 1) Μόνο λίγα υλικά μπορούν να εξαχνωθούν,
- 2) Δυσκολία επίτευξης της επιθυμητής σύστασης σε κράμματα
- 3) Δύσκολη η επέμβαση στη διαδικασία εναπόθεσης, με αποτέλεσμα τη δυσκολία να προεπιλεχθούν οι ιδιότητες των υλικών. Για την παρασκευή των λεπτών υμενίων απαιτούνται συνθήκες υψηλού ή υπερυψηλού κενού. Η εναπόθεση με εξάχνωση συμβαίνει συνήθως σε πιέσεις από 10^{-8} έως 10^{-1} Torr, ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή και την καθαρότητα του παραγομένου υμενίου (10^{-8} - 10^{-4} Torr για τη μικροηλεκτρονική και 10^{-3} - 10^{-1} Torr για τις προστατευτικές επικαλύψεις). Το σημείο τήξης του υλικού ελαττώνεται με την αύξηση του κενού. Για παράδειγμα στο Al, το σημείο τήξης του είναι 2300° C για $P = 760$ Torr και 677° C για $P = 10^{-8}$ Torr.

Κατά την εξάχνωση τα συστατικά ενός κράματος εξαχνώνονται με διαφορετικούς ρυθμούς λόγω των διαφορετικών σημείων τήξεωσ τους με αποτέλεσμα το εναποτιθέμενο υμένιο να έχει διαφορετική στοιχειομετρία από το αρχικό εξαχνούμενο υλικό, αλλά διατηρεί την ομοιόμορφη κατανομή του. Αντιπροτάθηκε η χρήση πολλαπλών εξαχνωτών, όπου το εναποτιθέμενο υλικό προσεγγίζει τη σωστή στοιχειομετρία αλλά μπορεί να δημιουργηθούν βαθμίδες συγκέντρωσης του στην επιφάνεια Επίσης υπάρχει και η εξάχνωση με χρήση ηλεκτρικών

αντιστάσεων (TE – Thermal Evaporation). Είναι χρονικά η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για δημιουργία λεπτών υμενίων. Παρόλο που προέκυψαν πιο εξελιγμένες στη συνέχεια (πχ. εξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων, sputtering) **η ευχρηστία και το πολύ χαμηλό της κόστος την καθιστούν δελεαστική για μαζική παραγωγή** υμενίων. Η εξάχνωση γίνεται μέσω ειδικών πηγών/δεξαμενών όπου τοποθετείται η πρώτη ύλη για την εξάχνωση. Το υλικό προς εναπόθεση θερμαίνεται λόγω του φαινομένου Joule (ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει τις αντιστάσεις των πηγών). Οι πηγές αποτελούνται από πυρίμαχα μέταλλα με πολύ υψηλά σημεία τήξης (Mo, W, Ta, κλπ.) και είναι χημικά αδρανείς ως προς το εναποτιθέμενο υλικό. Ταξινομούνται σε σπείρες (coils) και χοάνες (boats). Οι **χοάνες** είναι **προτιμητέες** και διαθέσιμες στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία. Όμως, το σημείο τήξης του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένη η χοάνη να είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο του εναποτιθέμενου υλικού. Άρα, για πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ευνοείται η ενδοδιάχυση και πιθανόν η χημική αντίδραση του εναποτιθέμενου υλικού με το υλικό της χοάνης. Έτσι δημιουργούνται στερεά διαλύματα και κράματα (boat alloying) προκαλώντας λέπτυνση και ψαθυρότητα της χοάνης [71].

Μια μεταγενέστερη μέθοδος PVD είναι η **εξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων (EBE).** Έχει την ίδια αρχή με την TE μόνο που η θέρμανση εδώ γίνεται με μεταφορά κινητικής ενέργειας από μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής εντάσεως που προσκρούει στην επιφάνεια του εξαχνούμενου υλικού. Αυτό αρχικά βρίσκεται τοποθετημένο σε μια κατάλληλη χοάνη (crucible) η οποία ψύχεται. Πλεονέκτημα της EBE σε σχέση με την TE είναι πως η ψύξη της χοάνης και η επιφανειακή

εξάχνωση του υλικού αποτρέπουν την κραμματοποίηση και έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερος χρόνος ζωής της χοάνης (ανάπτυξη παχύτερων υμενίων), λιγότερες προσμίξεις στα υμένια και λειτουργία σε μεγαλύτερη ισχύ (μεγαλύτεροι ρυθμοί εναπόθεσης). Η EBE είναι η κυρίαρχη τεχνική για επιμεταλλώσεις στην μικροηλεκτρονική (πχ παρασκευή υλικών όπως Al, Cu, Ti, Co κλπ.). Η EBE είναι συμβατή με την τεχνική sputtering και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαδικασίες επικαλύψεων. Μετά τις TE, EBE, τεχνική sputtering και τη χημική εναπόθεση ατμών (CVD) αποτελεί την αμέσως πιο δημοφιλή μέθοδο ανάπτυξης υμενίων.

PVD τεχνική του Sputtering

Όταν η επιφάνεια ενός στερεού βομβαρδίζεται με ενεργητικά σωματίδια (π.χ. επιταχυνόμενα ιόντα) τότε τα άτομα της επιφάνειας του στερεού οπισθοσκεδάζονται λόγω κρούσεων μεταξύ των προσπιπτόντων ιόντων και των επιφανειακών ατόμων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται “back-sputtering” ή “sputtering”. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές sputtering, όπως: **dc-diode sputtering, rf-diode sputtering, reactive sputtering, magnetron sputtering**. Η **dc-diode** τεχνική περιλαμβάνει ένα ζεύγος επίπεδων ηλεκτροδίων. Η επιφάνεια της ψυχρής καθόδου αποτελείται από το υλικό που θα εναποτεθεί. Στην επιφάνεια ανόδου τοποθετούνται τα υποστρώματα πάνω στα οποία πρόκειται να γίνει εναπόθεση. Στον θάλαμο κενού εισάγεται αδρανές αέριο, πχ. Ar, με ενδεικτική μερική πίεση 0.1 Torr. Εφαρμόζεται dc τάση που προξενεί εκκένωση αίγλης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Δημιουργούνται ιόντα Ar^+ και λόγω πεδίου επιταχύνονται προς την κάθοδο και προσπίπτουν πάνω στον στόχο κάνοντάς

του sputtering. Έτσι προκύπτει μια ροή από άτομα ή συσσωματώματα από το υλικό του στόχου που κινούνται προς την άνοδο και επιτυγχάνεται η εναπόθεση ενός λεπτού υμενίου πάνω στο υπόστρωμα. Στις dc sputtering διατάξεις ο στόχος είναι μεταλλικό υλικό διότι η εκκένωση αίγλης δημιουργείται μεταξύ μεταλλικών ηλεκτροδίων. Από την άλλη, στην **rf-diode** sputtering τεχνική, η τάση που εφαρμόζεται είναι υψίσυχη εναλλασσόμενη (radio frequency) και δεν απαιτείται ο στόχος να είναι από μέταλλο, αλλά μπορεί να είναι ακόμα και μονωτής και να επιτυγχάνεται ισχυρή εκκένωση. Στο **reactive sputtering** εισάγεται μέσα στον θάλαμο εναπόθεσης ένα χημικώς ενεργό αέριο (π.χ. O_2 , N_2). Έτσι μπορούν να εναποτεθούν στο υπόστρωμα σύνθετα υμένια (π.χ. TiN , TiO_2) αν χρησιμοποιηθούν κατάλληλοι μεταλλικοί στόχοι (π.χ. Ti , Zn). Μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην dc- όσο και στην rf- μέθοδο. Στο **magnetron sputtering** εφαρμόζεται ένα μαγνητικό πεδίο στην κάθοδο το οποίο συνήθως είναι παράλληλο με την επιφάνεια της καθόδου. Ο ρυθμός των ατόμων και σωματιδίων που φτάνουν στο υπόστρωμα αυξάνεται και επιτυγχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί εναπόθεσης από εκείνους που επιτυγχάνονται στα άλλα συστήματα εναπόθεσης [71].

Junctions	Active Materials	JSC (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)	Area (cm ²)
1	CuPc / C ₆₀ / BCP	12	530	0.52	3.6	0.0079
	Squaraine dye / C ₆₀ / BCP	8.9	790	0.54	4.1	0.0079
	Mixed CuPc:C ₆₀	17	460	0.56	4.4	0.0079
	PCDTBT:PC ₇₁ BM	10.6	880	0.66	6.1	0.127
	Proprietary (Solarmer)	14.7	756	0.709	7.9	0.0441
	Proprietary (Solarmer)				8.1	
	Proprietary (Konarka)	9.39	876	0.625	5.15	1.021
2						0.007 -
	CuPc / C ₆₀ and CuPc / C ₆₀	9.7	1030	0.59	5.7	0.06
	PCPDTBT:PCBM and P3HT:PCB ₇₁ M	7.8	1240	0.67	6.5	0.045
	Proprietary (Heliatek)	6.18	1589	0.619	6.1	1.989
	Proprietary (Heliatek)				8.3	1.1

Σχήμα 5.16: Λίστα οργανικών ηλιακών κυττάρων με τις υψηλότερες αποδόσεις [72]

6. Συμπεράσματα

6.1. Ηλεκτρική Ισχύς - I-V Χαρακτηριστικά

Ανόργανα Ηλιακά Κύτταρα

Το μεγάλο φορτία κινητικότητας του μεταφορέα στους ανόργανους ημιαγωγούς οδηγούν σε αρκετά μεγάλο μήκος διάχυσης που επιτρέπει στους μεταφορείς φορτίων να φτάσουν τα ηλεκτρόδια πριν υποβληθούν σε έντονο ανασυνδυασμό - ακόμα κι αν οι συσκευές είναι περίπου 1000 φορές μεγαλύτερου πάχους. Επιπροσθέτως η R_{sh} είναι τυπικά περισσότερο από 3 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την R_s . Το γεγονός αυτό όχι μόνο οδηγεί σε αμελητέο όρο

$1 + \frac{R_s}{R_{sh}}$ στην:

$$\text{Εξ. } I = \frac{I_L - \frac{V}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} - \frac{I_0}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} * \left(e^{\frac{V - IR_s}{nkT}} - 1 \right) \quad (6.1)$$

και

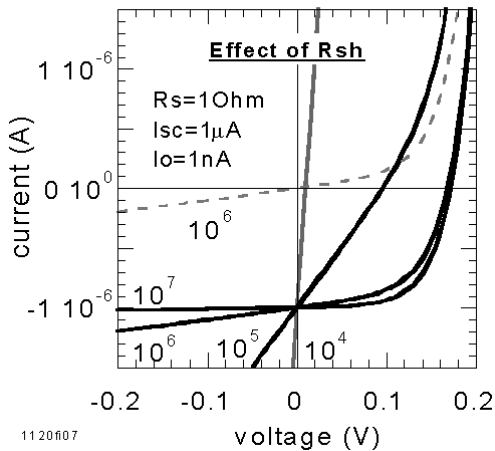
$$\text{Εξ. } I_{sc} = \frac{I_L}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} - \frac{\frac{I_0}{\Phi_{PL}}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \left(e^{\frac{IR_s}{q}} - 1 \right) \quad (6.2)$$

αλλά επίσης καθιστά πολύ ευκολότερη τη διάκριση των αποτελεσμάτων των δύο αντιστάσεων των χαρακτηριστικών IV [73].

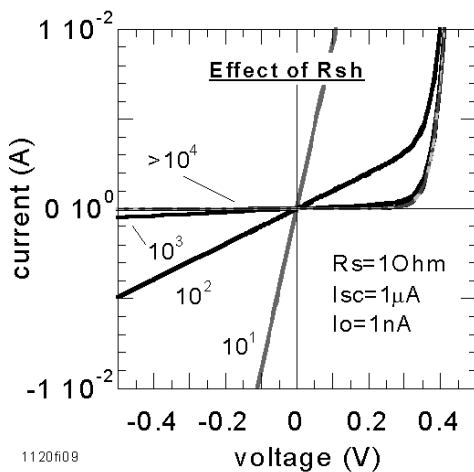
Επιπροσθέτως το αντίστροφο ρεύμα κορεσμού I_0 είναι συνήθως μεγαλύτερο από ότι σε οργανικές διατάξεις - πιθανώς λόγω της υψηλότερης αποδοτικότητας PL.

Οι τιμές για R_{sh} και R_s έχουν υπολογιστεί με βάση τα δεδομένα της καμπύλης IV.

Το σχήμα 6.1 δείχνει πώς οι IV χαρακτηριστική αλλάζει, όταν η αντίσταση διακλάδωσης κυμαίνεται μεταξύ 10^4 και $10^7 \Omega$ θεωρώντας τις εμφανιζόμενες τιμές για R_s , I_L , I_0 . Αν $R_{sh} > 10^6 \Omega$ το σχήμα (FF, V_{oc}) των καμπυλών IV παραμένει σχεδόν αμετάβλητο και το ρεύμα δεν δείχνει καμία σημαντική εξάρτηση από τον τομέα για την αρνητική προκατάληψη.



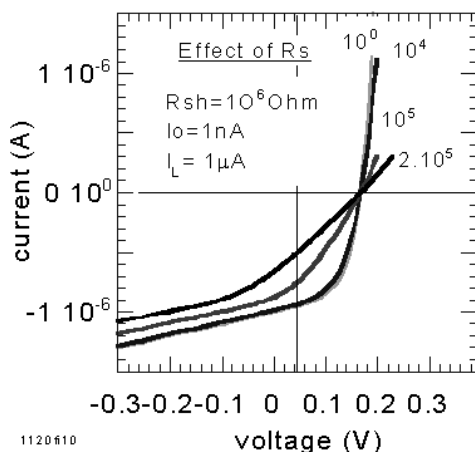
Σχήμα 6.1: Η επίδραση της R_{sh} (που κυμαίνεται από 10^4 έως $10^7 \Omega$) σχετικά με το σχήμα των χαρακτηριστικών IV. Μία μεγάλη R_{sh} μπορεί να μειώσει τόσο τον συντελεστή πλήρωσης όσο και την V_{oc} αλλά όχι το I_{sc} . Η διακεκομμένη καμπύλη είναι η χαρακτηριστικό στο σκοτάδι σε $10^6 \Omega$ [73]



Σχήμα 6.2: Η επίδραση της R_{sh} (που κυμαίνεται από 10^1 έως $10^4 \Omega$) σχετικά με το σχήμα των χαρακτηριστικών IV. Η V_{oc} είναι σχεδόν μηδενική και η R_{sh} εκτείνεται "αποτέλεσμα γραμμικοποίησης" στο πρώτο τεταρτημόριο. Το

φωτόρρευμα ($I_{SC} - I_0$) είναι πολύ μικρό για να είναι ορατό σε αυτήν την κλίμακα [73]

Ωστόσο, σαφώς μικρότερες τιμές της R_{sh} μπορεί να επιφέρουν τεράστια κακές συνέπειες για την καμπύλη IV. Η κλίση (εξάρτηση από το πεδίο) στο τρίτο τεταρτημόριο αυξάνεται σημαντικά, η V_{oc} πλησιάζει το μηδέν και ο συντελεστής πλήρωσης (fillfactor) φτάνει το θεωρητικά ελάχιστο όριο των 0,25 (ωμική - γραμμική) [74] πολύ γρήγορα. Ωστόσο, το ρεύμα βραχυκυκλώματος δεν επηρεάζεται αφού το ρεύμα μέσω της παράκαμψης μπορεί να αγνοηθεί εάν $R_s \ll R_{sh}$.

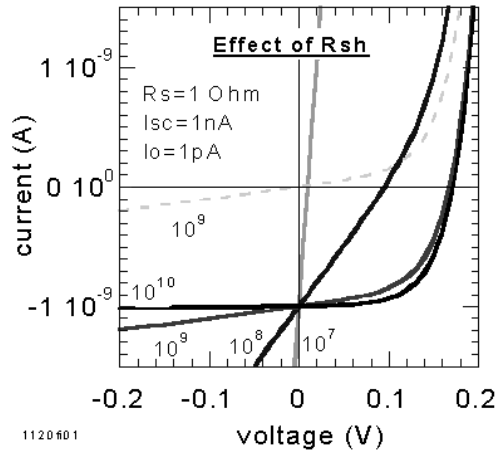


Σχήμα 6.3: Η επίδραση της R_s σχετικά με το σχήμα των χαρακτηριστικών IV υποθέτοντας τις ίδιες τιμές για ένα ανόργανο ηλιακό κύτταρο όπως παραπάνω με $R_{sh} = 10^6 \Omega$. Η R_s μειώνει τον FF και την κλίση στο πρώτο τεταρτημόριο όταν φτάσει την ίδια τάξη μεγέθους με την R_{sh} . Η R_s μπορεί να μειώσει το ρεύμα βραχυκυκλώματος αλλά όχι την V_{OC} . Η κλίση στο τρίτο τεταρτημόριο εξακολουθεί να κυριαρχείται από την R_{sh} [73]

Μπορεί να σημειωθεί ότι η αντίστροφη κλίση στα περίπου 0V ή στο τρίτο τεταρτημόριο είναι ίση με την αξία της R_{sh} . Σύμφωνα με την ανάστροφη πόλωση η δίοδος D εμποδίζει και η $R = R_{sh} + R_s$ καθορίζει μόνο την εξάρτηση της τάσης του ρεύματος ($I = R^{-1}U$). Αφού η R_s είναι πολύ μικρότερη από ότι η R_{sh} , είναι

μόνο η R_{sh} που καθορίζει την R-1 κλίση. Το σχήμα 6.2 δείχνει πόσο ακόμη οι μικρότερες τιμές της R_{sh} επηρεάζουν την καμπύλη IV. Η κλίση στο τρίτο τεταρτημόριο αυξάνει ακόμη περισσότερο και το «φαινόμενο γραμμικοποίησης» της R_{sh} εκτείνεται σε περίπου 0,3 V στο πρώτο τεταρτημόριο. Σημειώνεται ότι η V_{oc} είναι σχεδόν μηδενική. Οι τιμές για την $R_{sh} > 104\Omega$ που έχουν σημειωθεί στο σχήμα 6.1 φαίνονται ακριβώς το ίδιο σε αυτήν την κλίμακα. Το σχήμα 6.3 δείχνει τι συμβαίνει όταν οι αντιστάσεις σε σειρά αυξηθούν, υποθέτοντας τις ίδιες παραμέτρους όπως παραπάνω και για $R_{sh} = 106\Omega$: Ενώ η κλίση στο τρίτο τεταρτημόριο παραμένει αμετάβλητη η κλίση στο πρώτο τεταρτημόριο αρχίζει να μειώνεται σημαντικά όταν η R_s φτάσει στην ίδια τάξη μεγέθους με την R_{sh} . Η επίδραση των μεγάλων R_s εκτείνεται ακόμη και εντός του 3 τεταρτημόριο μειώνοντας έτσι τον συντελεστή πλήρωσης στο ελάχιστο του. Επιπλέον, εάν οι δύο αντιστάσεις έχουν παρόμοιες τιμές η καμπύλη IV κυριαρχείται από τα ωμικά χαρακτηριστικά τους (η αντίστροφη κλίση στο τεταρτημόριο 1 είναι ίση με την R_s) και ο συντελεστής ιδανικότητας ή η εξάρτηση από την τάση του D μπορεί τότε να έχουν μικρή επιρροή. Σε αντίθεση με την επίδραση της R_{sh} το ρεύμα βραχυκυκλώματος μπορεί να μειωθεί, αλλά η τάση ανοικτού κυκλώματος δεν μπορεί να επηρεαστεί καθόλου εφόσον δεν περνάει ρεύμα μέσω της R_s στην V_{oc} [73].

Οργανικά Ηλιακά Κύτταρα



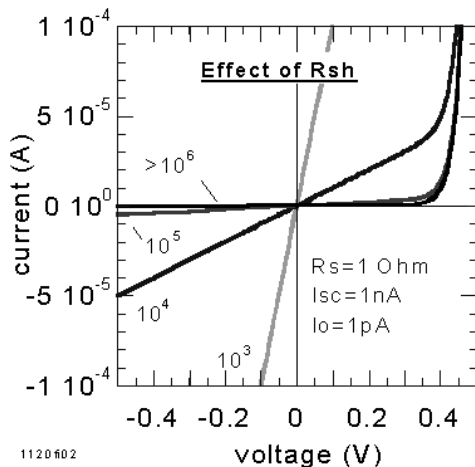
Σχήμα 6.4: Η επίδραση της R_{sh} (που κυμαίνονται από 10^7 έως $10^{10} \Omega$) σχετικά με το σχήμα των χαρακτηριστικών IV υποθέτοντας τυπικά σκοτεινά και φωτεινά ρεύματα για ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο. Η επίδραση της R_{sh} είναι ποιοτικά η ίδια όπως και για το ανόργανο κύτταρο σχήμα 6.1 αλλά απαιτούνται 1,000 φορές μεγαλύτερες τιμές αντίστασης για να προκύψει το ίδιο σχήμα [73]

Οι χαμηλές κινητικότητες και η χαμηλή συγκέντρωση φορτίων του φορέα οδηγούν σε σημαντικά μικρότερα ρεύματα στις περισσότερες οργανικές ηλιακές κυψέλες. Στην πραγματικότητα, τόσο τα σκοτεινά [75] όσο και τα φωτεινά ρεύματα είναι περίπου 1000 φορές μικρότερα ($I_0 \approx 1 \text{ pA}$ και $I_{sc} \approx 1 \text{ nA}$) έτσι ώστε το φωτόρευμα σε αυτές τις συσκευές να είναι περίπου ίδιου όσο το σκοτεινό ρεύμα σε συσκευές πυριτίου ενώ το σκοτεινό ρεύμα παραμένει περίπου 1000 φορές μικρότερο, έτσι ώστε σύμφωνα με την

$$\text{Εξ. } V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (6.3)$$

να αναμένεται μια παρόμοια V_{oc} . Σημειώνεται ότι στο σκοτάδι το ρεύμα μπορεί να σχετίζεται με το κλάσμα του ανασυνδυασμού ακτινοβολίας, έτσι ώστε η

υψηλής PL απόδοσης - όπως παρατηρείται σε πολλούς οργανικούς ημιαγωγούς
 - αναμένεται να δώσει ένα χαμηλό σκοτεινό ρεύμα.



Σχήμα 6.5: Η επίδραση της R_{sh} (που κυμαίνονται από 10^3 έως $10^6\Omega$) για το σχήμα των IV χαρακτηριστικών, υποθέτοντας τυπικά ρεύματα σε σκοτάδι και φως για ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο. Η επίδραση της R_{sh} είναι ποιοτικά η ίδια όπως και για το ανόργανο σχήμα 6.2 αλλά οι τιμές της αντίστασης που απαιτούνται για να δώσουν το ίδιο σχήμα είναι 1,000 φορές μεγαλύτερες [73]

Το σχήμα 6.4 δείχνει την επίδραση της μείωσης της R_{sh} για την καμπύλη IV, χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες τιμές που είναι τυπικές για τα οργανικά ηλιακά κύτταρα. Για να εκφραστεί μόνο η επιρροή της R_{sh} υποθέσαμε μια μη ρεαλιστική χαμηλή τιμή (1Ω) για την R_s .

Ακόμα χαμηλότερες τιμές για την R_{sh} θεωρήθηκαν στο σχήμα 6.5. Σημειώνεται ότι η καμπύλη IV για τιμές μεγαλύτερες από $10^6\Omega$ - όπως π.χ. όλες οι καμπύλες που φαίνονται στο σχήμα 6.4 - διαμορφώνεται ακριβώς το ίδιο σε αυτήν την κλίμακα.

Και οι δύο αριθμοί δείχνουν ποιοτικά το ίδιο αποτέλεσμα για μείωση της R_{sh} : μια απότομη καμπύλη στο τρίτο τεταρτημόριο και τελικά μείωση της V_{oc} . Ωστόσο, αν και η αναλογία I_{sc} / I_d είναι ακριβώς η ίδια, η τιμή της R_{sh} πρέπει να είναι 1000

φορές υψηλότερη για να προκαλέσει το ίδιο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, μία

R_{sh} της τάξεως των 105Ω σε ανόργανο ηλιακό κύτταρο (Σχήμα 6.1), είναι

αναγκαία για να μειωθεί η V_{OC} κατά 50%, ενώ μία τιμή της τάξεως των 108Ω

μπορεί να δείξει το ίδιο αποτέλεσμα για την οργανικής διάταξης (Σχήμα 6.4).

Το σχήμα 6.6, δείχνει την επίδραση της R_s με ρεύματα τυπικά για τα οργανικά

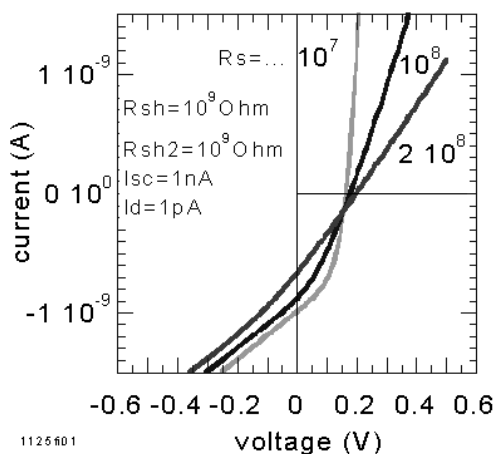
κύτταρα και υποθέτοντας ότι η $R_{sh} = 109\Omega$. Και πάλι, παρατηρούμε τα ίδια

αποτελέσματα όπως για την ανόργανη συσκευή μετά την αύξηση: μείωση της

κλίσης στο πρώτο τεταρτημόριο και μείωση του I_{sc} . Ωστόσο, το ρεύμα εξόδου

είναι 1000 φορές μικρότερο και η τιμή της αντίστασης 1000 φορές υψηλότερη -

σύγκριση με σχήμα 6.3 [73].



Σχήμα 6.6: Η επίδραση της R_s για το σχήμα των χαρακτηριστικών $I-V$ υποθέτοντας τις ίδιες τιμές για ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο όπως ανωτέρω με $R_{sh} = 109\Omega$. Η R_s μειώνει τον FF και την κλίση στο πρώτο τεταρτημόριο όταν φτάνει την ίδια τάξη μεγέθους όπως η R_{sh} . Η R_s μπορεί να μειώσει το ρεύμα βραχυκυκλώματος, αλλά όχι την V_{oc} . Η κλίση στο τρίτο τεταρτημόριο εξακολουθεί να κυριαρχείται από την R_{sh} [73]

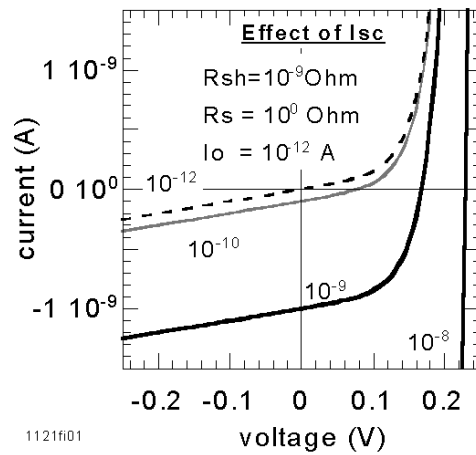
Το σχήμα 6.7 δείχνει ότι εκτός από την υψηλή R_s ή / και τις τιμές της R_{sh} - ένα χαμηλό ρεύμα φως μπορεί να προκαλέσει τόσο χαμηλό FF όσο και χαμηλή V_{oc} .

Έτσι, η $I-V$ καμπύλη πρέπει να συγκριθεί μόνο αν η ένταση του φωτός είναι

παρόμοια και ο FF και οι τιμές της V_{oc} (mW / cm^2) αναφέρονται μόνο μαζί με το αριθμούς έντασης φωτός.

Στην πραγματικότητα, οι IV καμπύλες των ανόργανων ηλιακών κυττάρων μετριοούνται συνήθως υπό κανονικές συνθήκες (AM1.5) ώστε να επιτρέπουν άμεσες συγκρίσεις. Το πρόβλημα με πολλές οργανικές ηλιακές κυψέλες είναι ότι δεν μπορεί να είναι αρκετά σταθερές κάτω από τέτοιες υψηλές εντάσεις φωτός και ότι ανάλογα με την κατάσταση υλικού, τον τύπο της συσκευής και μέτρησης, οι IV καμπύλες - ιδιαίτερα των πολύ αναποτελεσματικών συσκευών - μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από pixel σε pixel ή ακόμη και στο χρόνο [76].

Ως κατευθυντήρια γραμμή, μπορεί να ειπωθεί ότι το φωτόρρευμα πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 τάξεις μεγέθους υψηλότερο από το ρεύμα στο σκοτάδι πρώτου ο συντελεστής πλήρωσης να μπορεί να θεωρηθεί ως ένταση του φωτός ανεξάρτητη και χρησιμοποιείται για άμεσες συγκρίσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, ο πιθανός συντελεστής πλήρωσης και η V_{oc} για ρεαλιστικές συνθήκες μπορεί να υποτιμηθεί σημαντικά.



Σχήμα 6.7: Επίδραση του I_{sc} επί των χαρακτηριστικών IV ενός οργανικού ηλιακού κυττάρου. Η διακεκομμένη καμπύλη είναι η χαρακτηριστική στο σκοτάδι. Μπορεί να φανεί ότι οι χαμηλές τιμές I_{sc} μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά μικρότερο συντελεστή πλήρωσης και επίσης σε χαμηλότερες V_{oc} σε σύγκριση με υψηλότερες τιμές I_{sc} [73]

6.2. Πλεονεκτήματα

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

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

1. Spin coating
2. Doctor Blade techniques (wet processing)
3. Evaporation (dry processing)
4. Printing

Αυτά τα χαρακτηριστικά ωφελούν την εμπορευματοποίηση, όμως, όπως και τα άλλα είδη, έτσι και τα οργανικά φωτοβολταϊκά πρέπει να πληρούν τις βασικές απαιτήσεις για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Στην αγορά ενέργειας η ανταγωνιστική θέση της κάθε τεχνολογίας καθορίζεται κυρίως από παράγοντες όπως η αποδοτικότητα, η διάρκεια ζωής και το κόστος (ανά Wp). Θεωρείται πως αν τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι σε θέση να υλοποιήσουν ένα συγκεκριμένο τεχνολογικό προφίλ, τότε θα υπάρξει ουσιαστική ελευθερία για εμπορευματοποίηση. [77]

Τα πολυμερή έχουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα. Σε αντίθεση με το κρυσταλλικό πυρίτιο, το οποίο είναι άκαμπτο και εύθραυστο, πολλοί οργανικά υλικά είναι εύκαμπτα και μπορούν να τοποθετηθούν τόσο σε εύκαμπτα όσο και σε άκαμπτα υποστρώματα. Θα έπρεπε να υπάρχει η δυνατότητα, για παράδειγμα, να αναπτυχθούν προϊόντα OPV που θα είναι εύχρηστα και θα μπορούν να τυλίγονται και να απομακρύνονται όταν δεν χρειάζονται. Τα οργανικά υλικά μπορούν να εναποτεθούν σε πολύ λεπτές στιβάδες που έχουν υψηλή διαφάνεια,

έτσι ώστε τα OPV να μπορούν να ενσωματωθούν σε παράθυρα και ημιδιαφανείς προσόψεις. Τα OPVs τείνουν να είναι φωτοενεργά σε ένα ευρύτερο φάσμα του προσπίπτοντος φωτός από ότι τα συμβατικά PV, με αποτέλεσμα τα οργανικά φωτοβολταϊκά να λειτουργούν όχι μόνο σε άμεσο ηλιακό φως, αλλά και σε χαμηλό φωτισμό, σε κλειστούς χώρους και ακόμη και με υπέρυθρη ακτινοβολία (θερμότητα). Μερικά οργανικά PV υλικά δραστηριοποιούνται πάνω από ευρύτερες γωνίες συχνότητας από τα συμβατικά υλικά. [78]

6.3. Μειονεκτήματα

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

- Η παρουσία ισχυρής οδηγούσας δύναμης για την διάσπαση του εξιτονίου.
- Παρατηρείται μικρή κινητικότητα του φορτίου.
- Έχουν σχετικά μικρό χρόνο ζωής που κυμαίνεται σε λιγότερο από 5 χρόνια και μικρή σχετικά με την τεχνολογία του πυριτίου απόδοση, της τάξεως κοντά του 5%. [65]
- Προβλήματα σταθερότητας των διατάξεων (τα οργανικά υλικά είναι ευαίσθητα στο οξυγόνο και την υγρασία)
- Δεν υπάρχουν ακόμη στην αγορά, ωστόσο παρατηρείται έντονη ερευνητική δραστηριότητα (σε ακαδημαϊκά ιδρύματα, ερευνητικά κέντρα

και εταιρείες).

·Δυνατότητα / προοπτική (potential) για σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής ή και παραγωγής σε μαζική κλίμακα. Τα OPVs δείχνουν μια υποσχόμενη τεχνολογική ανάπτυξη μιας και η αποδοτικότητα μέχρι το 10% μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική από το 5% περίπου που ισχύει σήμερα δεν εμφανίζει αναγνωρισμένα εμπόδια. Επίσης η χρησιμοποίηση της τεχνικής roll to roll (R2R) εγγυάται χαμηλό κόστος κατασκευής. Η τεχνική αυτή δίνει τη δυνατότητα της συνεχούς παραγωγής, με γρήγορους ρυθμούς. Όλα τα παραπάνω δημιουργούν την πεποίθηση ότι τα OPVs είναι οι πλέον υποσχόμενες διατάξεις για την επόμενη γενιά των φωτοβολταϊκών διατάξεων [66].

6.4. Βελτιώσεις

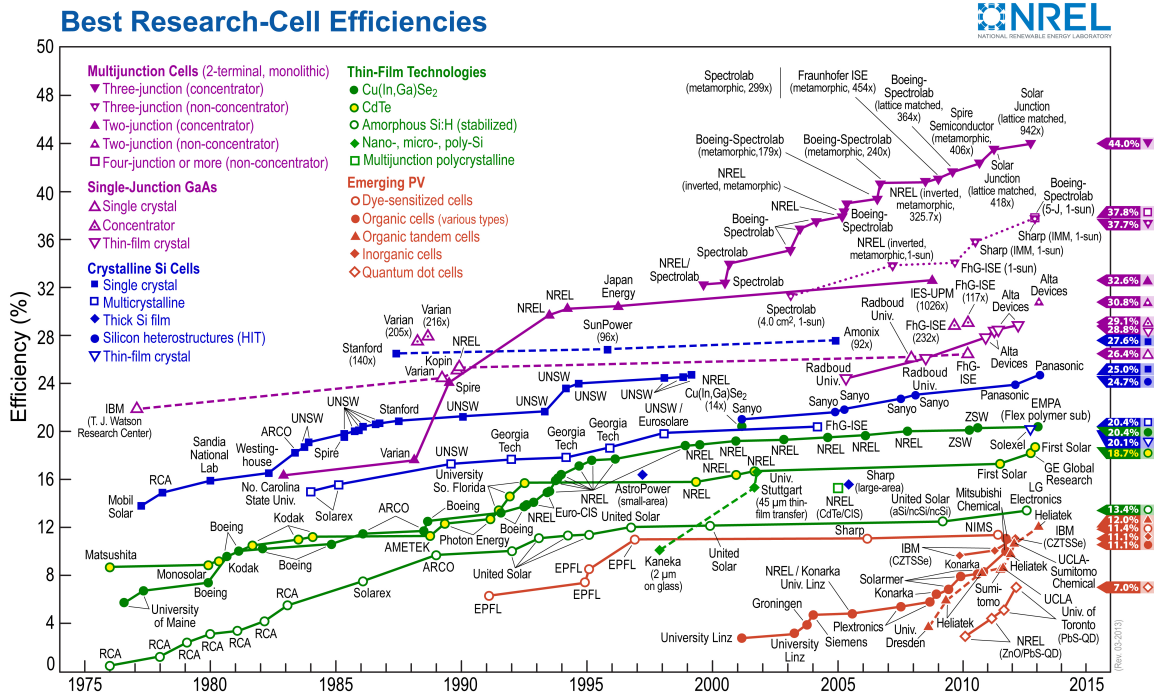
Με τη λειτουργία δύο στοιβαγμένων κυττάρων παράλληλα, τα επίπεδα αποδοτικότητας μπορούν να αυξηθούν περισσότερο. Το 2007, ο Alan Heeger και οι συνάδελφοι του, νικητές του βραβείου Νόμπελ, μαζί με τον Lee, έναν ερευνητή της Νότιας Κορέας, παρουσίασαν ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο με την προσθήκη ενός διπλού στρώματος που απορροφά ένα ευρύτερο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας σε σύγκριση με τα μονού επιστρώματος ηλιακά κύτταρα και επιτυγχάνει μια αποδοτικότητα 6,5%. Ένα polymerfullerine 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 fullerine θα μπορούσαν να είναι περίπου 9%. Ωστόσο υψηλότερες προσμίξεις 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. [78]

6.5. Εφαρμογές οργανικών φωτοβολταϊκών

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

Στο πλαίσιο αυτής της πληθώρας εφαρμογών, το μεν άκαμπτο κρυσταλλικό πυρίτιο ή και οι ανόργανες φωτοβολταϊκές μεμβράνες θα καταλάβουν τη μεγάλη μερίδα της αγοράς ηλιακών πάρκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας, ενώ οι νέες και εξαιρετικά λεπτές και ευέλικτες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών θα κυριαρχήσουν στις αστικές και μικρής κλίμακας αγορές, όπως στα 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 [66].



Σχήμα 6.8: Αποδοτικότητα όλων των ειδών των φωτοβολταϊκών στοιχείων κατά το πέρασμα του χρόνου (χρονική περίοδος 1975-2011) [72]

6.6. 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 [38].

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Markvart, T., & Bogus, K. (1994). *Solar electricity*. Chichester: Wiley.
- [2] ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ HELIOSYSTEMS. (n.d.). Retrieved from <http://selasenergy.gr/>
- [3] Interactive maps. (2011). Retrieved from <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [4] Introduction to Solar Radiation. (n.d.). Retrieved from <http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/content.aspx>
- [5] Assignment Point - Solution for Best Assignment Paper. (n.d.). Retrieved from <http://www.assignmentpoint.com/other/assignment-on-solar-radiation.html>
- [6] We Are Solar UK. (n.d.). Retrieved from <http://www.wersolaruk.com/how-does-it-work/>
- [7] Δέρβος, Κ Θ. (2013). *Φωτοβολταϊκά Συστήματα από τη Θεωρία στη Πράξη*. Ε.Μ.Π. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ.
- [8] P–n junction. (2014, October 16). Retrieved from <http://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93junction>
- [9] What is a Diode Connected in Reverse Biased? (n.d.). Retrieved from <http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/What-is-a-diode-connected-in-reverse-biased>
- [10] Current-Voltage characteristic. (n.d.). Retrieved from http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M05_C02/co/Contenu_09.html
- [11] Green, M. A. (1982). *Solar cells: Operating principles, technology, and system applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [12] Καγκαράκης, Κ. (1992). *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*. ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.
- [13] Μπαταγιάννης, Π Κ, & Gibbons, C., Dr. (2002). Θερμική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων, μέθοδοι εκτόνωσης της θερμότητας (Cork Institute of Technology & Energy Engineering Group, Eds.). *Θερμική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων, μέθοδοι εκτόνωσης της θερμότητας*. Retrieved September/October, 2014

- [14] Part II – Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code. (n.d.). Retrieved from <http://www.ni.com/white-paper/7230/en/>
- [15] Carlson, T. (2001). *Experimental Setup for Full Scale Field Tests of CdTe and CIS Thin-film PV Modules*. Espoo.
- [16] Simplify Your Solar Cell Testing. (n.d.). Retrieved from http://www.keithley.com/solar_cell
- [17] Nanoptronics Research Centre. (n.d.). Retrieved September/October, 2014, from <http://www.iust.ac.ir/find.php?item=74.11421.21690.en>
- [18] Χριστοδούλου Έκτορα, Μ. (2009). Επίδραση εξωτερικών παραμέτρων στις χαρακτηριστικές ιδιότητες ηλιακών πλαισίων τύπου CIS. *Πανεπιστήμιο Πατρών*. Retrieved September/October, 2014.
- [19] Solar Power Panels, Home Solar Panels, Home Solar Power Systems. (n.d.). Retrieved from <http://www.solar-energy-at-home.com/solar-power-panels.html>
- [20] Φραγκιαδάκης, Ι Ε. (2007). *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*. ΖΗΤΗ.
- [21] Monocrystalline or Polycrystalline? (2012). Retrieved September/October, 2014, from <http://blog.gogreensolar.com/2012/06/monocrystalline-polycrystalline.html>
- [22] Different generations of solar cells. (2008). Retrieved September/October, 2014, from <http://org.ntnu.no/solarcells/pages/generations.php>
- [23] Solar cell. (2014, October 19). Retrieved from http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell
- [24] Sharp Develops Mass-Production Technology for Triple-Junction Thin-Film Solar Cells. (n.d.). Retrieved from <http://phys.org/news88965013.html>
- [25] Shirakawa, H., Louis, E. J., MacDiarmid, A. G., Chiang, C. K., & Heeger, A. J. (1977). *Synthesis of Electrically-Conducting Organic Polymers: Halogen Derivatives of Polyacetylene, (CH)(X)*. Ft. Belvoir: Defense Technical Information Center.
- [26] US Energy Department to fund CSP research. (n.d.). Retrieved from <http://buildingpowerdistribution.com/?author=1>

- [27] Efficiency record for flexible CdTe solar cell due to novel polyimide film. (n.d.). Retrieved from <http://phys.org/news/2011-06-efficiency-flexible-cdte-solar-cell.html>
- [28] Περράκη, Β. (2006). *Φυσική των φωτοβολταϊκών στοιχείων*. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- [29] Cubesat and nano-satellite solutions. (n.d.). Retrieved from <http://gomspace.com/index.php?p=products-p100ua>
- [30] Solar Cell Comparison Chart Mono-, Polycrystalline and Thin Film - Energy Informative. (n.d.). Retrieved from <http://energyinformative.org/solar-cell-comparison-chart-mono-polycrystalline-thin-film/>
- [31] Dobrzanski, L. A., Wosinska, L., Dolzanska, B., & Drygala, A. (2006). Comparison of electrical characteristics of silicon solar cells. *Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering*, 18(1-2). Retrieved September/October, 2014, from http://www.journalamme.org/papers_amme06/1306.pdf
- [32] Blakers, A., Weber, K., Everett, V., Deenapanray, S., & Franklin, E. (2004). Silver solar cells and moduls. *Centre for Sustainable Energy, Systems Australian National University*.
- [33] Blakers, A., & Webber, K. (2004). Bright Future for Silver Cell Technology. *Power Engineering International*.
- [34] D.c. Jordan And S.r. Kurtz: Nrel. (2012). *Photovoltaic Degradation Rates -- An Analytical Review: Preprint*.
- [35] Polyacetylene. (2014, October 18). Retrieved from <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyacetylene>
- [36] Shaheen, S. E., Brabec, C. J., Sariciftci, N. S., Padinger, F., Fromherz, T., & Hummelen, J. C. (2001). 2.5% efficient organic plastic solar cells. *Applied Physics Letters*, 78(6), 841. doi: 10.1063/1.1345834
- [37] Yu, G., & Heeger, A. J. (1995). Charge separation and photovoltaic conversion in polymer composites with internal donor/acceptor heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 78(7), 4510. doi: 10.1063/1.359792
- [38] No, I., Shin, P., Kannappan, S., Kumar, P., & Ochiai, S. (2012). Fabrication and Characteristics of Organic Thin-film Solar Cells with Active Layer of Interpenetrated Hetero-junction Structure. *Applied Physics Research*, 4(4). doi: 10.5539/apr.v4n4p83

- [39] Konarka.com. (n.d.). Retrieved from <http://ww38.konarka.com/index.php/power-plastic/about-power-plastic/>
- [40] *Novel High Efficiency Photovoltaic Devices Based on the III-N Material System Final Technical Report, 7 December 2005-29 August 2008.* (2008). Washington, D.C.: United States. Dept. of Energy.
- [41] Rardin, T. E., & Xu, R. (2011). Printing Processes Used to Manufacture Photovoltaic Solar Cells (M. I. Sarapin, Ed.). *The Journal of Technology Studies*, 37(2). Retrieved September/October, 2014, from <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/JOTS/v37/v37n2/rardin.html>
- [42] Goetzberger, A., Hebling, C., & Schock, H. (2003). *Photovoltaic materials, history, status and outlook.* Amsterdam: Elsevier.
- [43] Παλιάτσας, Ν Π. (2008). Μελέτη Θερμικής Γήρανσης Λεπτών Υμενίων PEDOT:PSS με Μετρήσεις Ειδικής Αγωγιμότητας Συνεχούς Ρεύματος. *Πανεπιστήμιο Πατρών*. Retrieved September/October, 2014, from [http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/944/1/Διπλωματική%20Εργασία%20Παλιάτσας%20Νικόλαος%20\(2008\).pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/944/1/Διπλωματική%20Εργασία%20Παλιάτσας%20Νικόλαος%20(2008).pdf)
- [44] Βισκαδούρος, Γ Μ. (2011). Ανάπτυξη καινοτόμων οπτοηλεκτρονικών διατάξεων πολυμερούς-νανοδομών για εφαρμογές σε οργανικά φωτοβολταϊκά και εκπομπή πεδίου. *Πολυτεχνείο Κρήτης*. Retrieved September/October, 2014, from <http://purl.tuc.gr/dl/dias/29DECA60-0F53-4EDB-A067-C357E634503C>
- [45] Κουρέλη, Σ Ι. (2011). Παρασκευή υμενίων αγωγίμων πολυμερών μέσω ηλεκτροπολυμερισμού για εφαρμογή τους σε φωτοβολταϊκά κελιά. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*. Retrieved September/October, 2014, from <http://hdl.handle.net/123456789/568>
- [46] Cell Energy. (2007). Retrieved from http://twinkle_toes_engineering.home.comcast.net/~twinkle_toes_engineering/photosynthesis.htm
- [47] Carbon Polymers. (2013). Retrieved September/October, 2014, from <http%3A%2F%2Fcwx.prenhall.com%2Fboobing%2Fpubbooks%2Fhillchem3>
- [48] Biochem.co – Biochem & Science Notes. (n.d.). Retrieved from <http://biochem.co/2008/08/hybridisation-mixing-up-orbitals/>
- [49] Molecular orbital theory. (n.d.). Retrieved from http://chemwiki.ucdavis.edu/Organic_Chemistry/Organic_Chemistry_With

[a Biological Emphasis/Chapter 02%3A Introduction to organic structure and bonding II/Section 2.1%3A Molecular orbital theory%3A conjugation and aromaticity](#)

- [50] Pettersson, L. A., Roman, L. S., & Inganäs, O. (1999). Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films. *Journal of Applied Physics*, 86(1), 487. doi: 10.1063/1.370757
- [51] Preezant, Y. (2004). Electrical Properties of Contact Region of Polymeric Semiconductor Devices. *Technion-Israel Institute of Technology*. Retrieved September/October, 2014, from http://webee.technion.ac.il/orgelect/PapersAndPatents_Files/Yevgeni%20Preezant%20Master%20Thesis%202004.pdf
- [52] Kymakis, E., Dr. (2003). Organic Photovoltaic Devices Based on Conjugated Polymers & Carbon Nanotubes. *Cambridge University*. Retrieved September/October, 2014.
- [53] Heeger, A. J. (1985). Charge storage in conducting polymers: Solitons, polarons, and bipolarons. *Polymer Journal*, 17(1), 201-208. doi: 10.1295/polymj.17.201
- [54] Bredas, J. L., & Street, G. B. (1985). Polarons, bipolarons, and solitons in conducting polymers. *Accounts of Chemical Research*, 18(10), 309-315. doi: 10.1021/ar00118a005
- [55] Kittel, C. (1966). *Introduction to solid state physics*. New York: Wiley.
- [56] Αλεξοπούλου, Δ, & Βαρώτσου, Π. (1994). Φυσική Στερεάς Κατάστασης. *Εκδόσεις Σαββάλα*, 1. Retrieved September/October, 2014.
- [57] Chapter 3. (n.d.). Retrieved from <http://www.intechopen.com/books/new-polymers-for-special-applications/microwave-absorption-and-em-shielding-behavior-of-nanocomposites-based-on-intrinsically-conducting->
- [58] Ταντής, Ι Σ. (2013). Μελέτη των Ηλεκτρονιακών Ιδιοτήτων της Επιφάνειας Ημιαγώγιμων Πολυμερών για Εφαρμογές σε Φωτοβολταϊκά Κελιά. *Πανεπιστήμιο Πατρών*. Retrieved September/October, 2014.
- [59] HOMO and LUMO – two special orbitals. (n.d.). Retrieved from <http://www.oes-net.de/en/organic-electronic/organic-solar-cells/thirst-for-knowledge/homo-and-lumo-two-special-orbitals.html>
- [60] Peet, J., Heeger, A. J., & Bazan, G. C. (2009). “Plastic” Solar Cells: Self-Assembly of Bulk Heterojunction Nanomaterials by Spontaneous Phase

- Separation. *Accounts of Chemical Research*, 42(11), 1700-1708. doi: 10.1021/ar900065j
- [61] Li, C., Liu, M., Pschirer, N. G., Baumgarten, M., & Müllen, K. (2010). Polyphenylene-Based Materials for Organic Photovoltaics. *Chemical Reviews*, 110(11), 6817-6855. doi: 10.1021/cr100052z
- [62] AOL Search. (n.d.). Retrieved from http://us.wow.com/image?s_chn=9&v_t=aolsem&q=what+is+a+solar+cell&s_it=Ihr_tabs&s_pt=aolsem&page=6&oreq=57586e28e6a84cea9321ae74e3b7c5f0
- [63] No, I., Shin, P., Kannappan, S., Kumar, P., & Ochiai, S. (2012). Fabrication and Characteristics of Organic Thin-film Solar Cells with Active Layer of Interpenetrated Hetero-junction Structure. *Applied Physics Research*, 4(4). doi: 10.5539/apr.v4n4p83
- [64] Bulovic Lab: Eletha Flores. (n.d.). Retrieved from <http://eecs-newsletter.mit.edu/articles/2011-spring/bulovic-lab-eletha-flores/>
- [65] Παπασάββα, Π Μ. (2010). Σύγχρονες ηλεκτρονικές διατάξεις με οργανικά ημιαγώγιμα υλικά (Ν Κορνήλιος, Ed.). *ΤΕΙ Κρήτης*. Retrieved September/October, 2014, from <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/hle/2010/PapasavvaPanagiotaMaria/document-1286353402-148590-29228.tkl>
- [66] Πελέκη, Μ Δ. (2013). Οργανικά Φωτοβολταϊκά. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*. Retrieved September/October, 2014.
- [67] Sariciftci, N. S., Smilowitz, L., Heeger, A. J., & Wudl, F. (1992). Photoinduced Electron Transfer from a Conducting Polymer to Buckminsterfullerene. *Science*, 258(5087), 1474-1476. doi: 10.1126/science.258.5087.1474
- [68] Yu, G., & Heeger, A. J. (1995). Charge separation and photovoltaic conversion in polymer composites with internal donor/acceptor heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 78(7), 4510. doi: 10.1063/1.359792
- [69] Montanari, I., Nogueira, A. F., Nelson, J., Durrant, J. R., Winder, C., Loi, M. A., ... Brabec, C. (2002). Transient optical studies of charge recombination dynamics in a polymer/fullerene composite at room temperature. *Applied Physics Letters*, 81(16), 3001. doi: 10.1063/1.1512943
- [70] Χρήστος Πολυζωίδης. (n.d.). Retrieved from <http://chpolyz.blogspot.gr/2013/02/opvs-oleds.html>

- [71] Brabec, C. J., & Durrant, J. R. (2008). Solution-Processed Organic Solar Cells. *MRS Bulletin*, 33(07), 670-675. doi: 10.1557/mrs2008.138
- [72] Potscavage, W. J., Jr. (2011). Physics and Engineering of Organic Solar Cells. *Georgia Institute of Technology*. Retrieved September/October, 2014.
- [73] Petritsch, K. (2000). Organic Solar Cell Architectures. *Technisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Der Technischen Universität Graz*.
- [74] Carter, S. A., Angelopoulos, M., Karg, S., Brock, P. J., & Scott, J. C. (1997). Polymeric anodes for improved polymer LED performance. *Appl.Phys.Lett.*, 70(2067-2069).
- [75] Chance, R. R., & Silbey, R. (1978). *Adv. Chem. Phys.* 37(1).
- [76] Chamberlain, G. A., Cooney, P. J., & Dennison, S. (1981). Photovoltaic properties of merocyanine solid state photo-cells. *Nature*, 289(45-47).
- [77] Download PDFs. (n.d.). Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702480400100X>
- [78] Download PDFs. (n.d.). Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471084608701367>
- [79] Chapter 12. (n.d.). Retrieved from <http://www.intechopen.com/books/solar-cells-research-and-application-perspectives/electric-energy-management-and-engineering-in-solar-cell-system>
- [80] Γαργανουράκης, Στεργίου, Μ. (2008). Ανάπτυξη προηγμένων Transparent conductive oxides και μελέτη των διεπιφανειών τους με οργανικούς ημιαγωγούς και εύκαμπτα πολυμερικά υποστρώματα. *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Νανοεπιστήμες και Νανοτεχνολογίες*. Retrieved September/October, 2014, from <http://search.lib.auth.gr/Record/psifiothiki-113114>

