

ΤΕΙ ΧΑΝΙΩΝ  
ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
<<ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ>>



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΕΤΡΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

1.1.ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.2.ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

1.3.ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ  
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

2.1.ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

2.1.1.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

2.2.ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

2.3.ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ-  
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ

2.1.4.ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

2.1.5.ΚΙΝΗΤΡΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

3.1.ΦΥΣΙΚΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΥΤΤΑΡΟΥ

3.1.2. ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

3.1.3.ΔΟΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΖΩΝΩΝ

3.1.4ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΠΩΝ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗ  
ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

4.1.ΚΥΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1.1.ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1.2.ΑΠΟ ΤΙ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΕΝΑ ΗΛΙΑΚΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ  
ΣΥΣΤΗΜΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

5.1.ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ(Si)

5.1.1 ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΥΡΙΤΙΟΥ<<ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ>>

5.1.2. ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΥΡΙΤΙΟΥ<<ΛΕΠΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ>>, THIN FILM

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### 6.1. ΝΕΟΙ ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ

#### 6.1.1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΠΑΡΑΓΟΥΝ ΡΕΥΜΑ Κ ΤΟ ΒΡΑΔΥ

#### 6.1.2. ΝΕΑ ΗΛΙΑΚΗ ΚΥΨΕΛΗ

#### 6.1.3. <<ΕΞΥΠΝΑ ΡΟΥΧΑ>>-ΦΟΡΤΙΣΤΕΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ

#### 6.1.4. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΠΟ ΔΟΡΥΦΟΡΟ ΛΟΥΛΟΥΔΙ

#### 6.1.5. ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

#### 6.1.6. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΜΕ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ <<ΗΛΙΟΣ>>

#### 6.1.7. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΤΗΝ FILM ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Κ ΑΝΤΟΧΗΣ

#### 6.1.8. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΚΑΘΕΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΙΤ

#### ΕΠΙΛΟΓΟΣ

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Εισαγωγή

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 προέβη, είχε να κάνει με το γεγονός ότι ορισμένα υλικά παρουσίαζαν την ικανότητα παραγωγής μικρών ποσοτήτων ηλεκτρικού ρεύματος, όταν βρίσκονταν 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 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 .

Η διεύθυνση 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 προσπάθεια τους να δημιουργήσουν καθαρά ημιαγώγιμα υλικά.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η ποσότητα του απαιτούμενου υλικού είναι πολύ μεγάλη και η παραγωγή του είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα.

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.

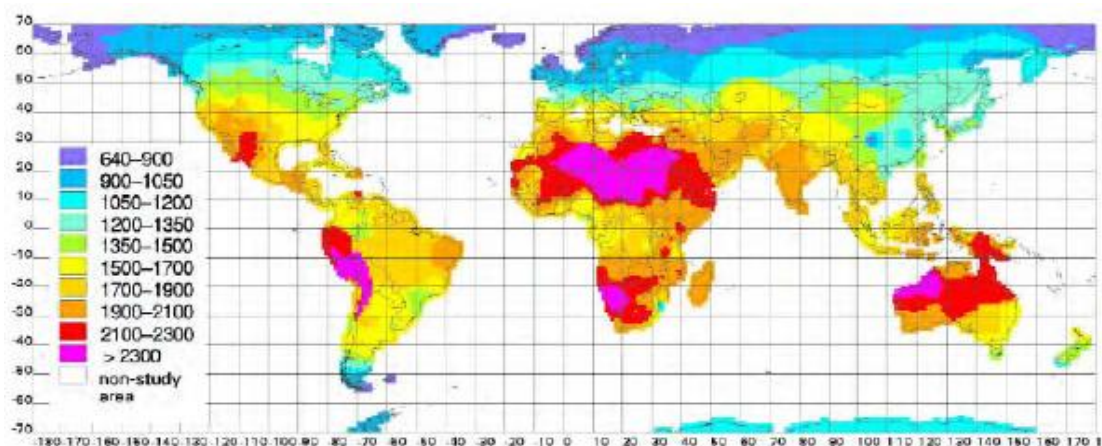
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ1ο

## Ηλιακή Ενέργεια

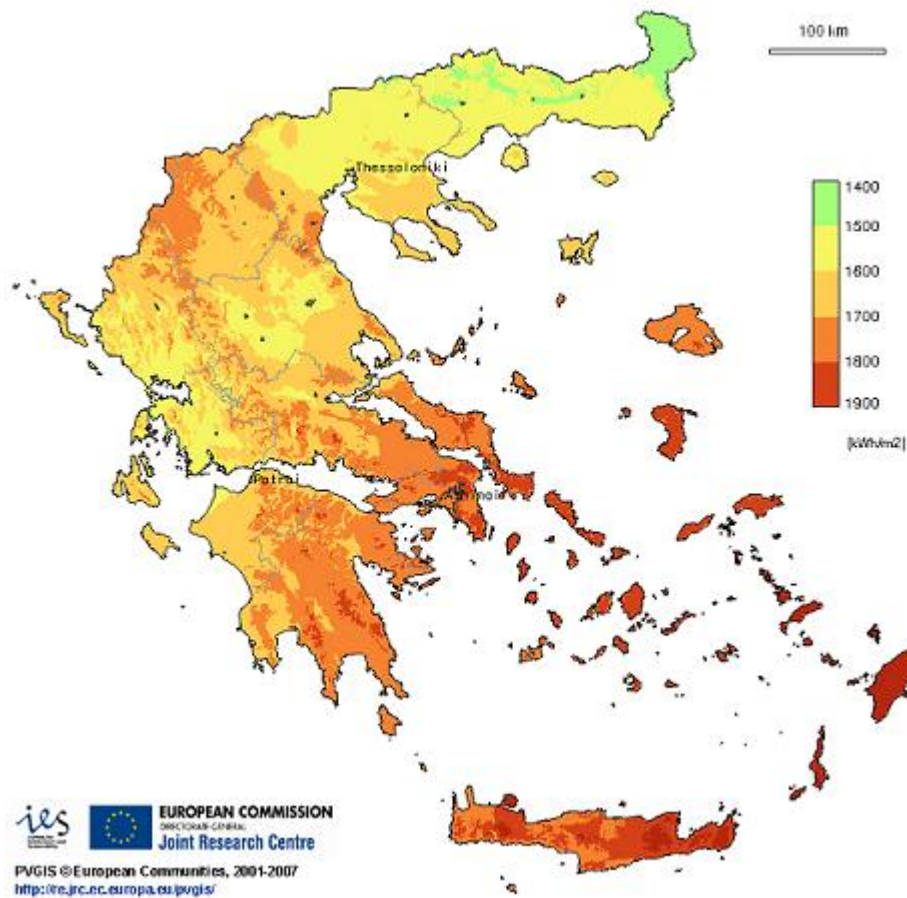
Η ηλιακή ενέργεια, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ύπαρξη της ζωής στη Γη. Καθορίζει τη θερμοκρασία στην επιφάνειά της και παρέχει ουσιαστικά το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία όλων των φυσικών συστημάτων.

Με μία καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μία τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε μία θερμοκρασία κοντά στους 5.8000 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.

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<sup>2</sup>. Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία. όσον αφορά την Ελλάδα.



## Παγκόσμιος χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας



## Χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα

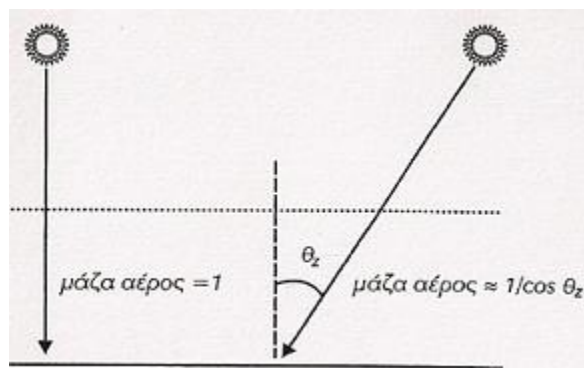
Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης, συνίσταται από ένα μέρος άμεσης ακτινοβολίας και ένα μέρος διάχυτης. Η άμεση συνιστώσα της ακτινοβολίας, προέρχεται από την κατεύθυνση του ήλιου σε αντίθεση με τη διάχυτη, η οποία σκεδάζεται από τον ουράνιο θόλο και δεν έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι φυσικά άκρως μεταβλητή. Επιπλέον, πέρα από την κανονική ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της φαινόμενης 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



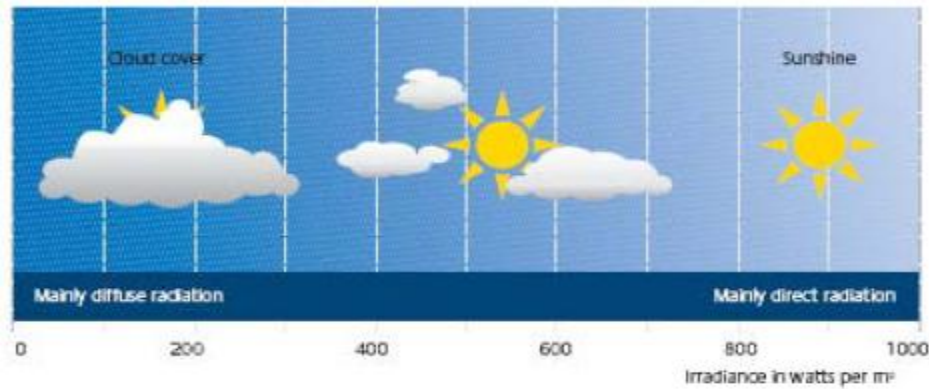
σχετικό μήκος της διαδρομής της απευθείας δέσμης διαμέσου της ατμόσφαιρας.

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  $\theta_z$  είναι η γωνία του Ζενίθ



#### **Ορισμός της μάζας αέρος A.M**

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.

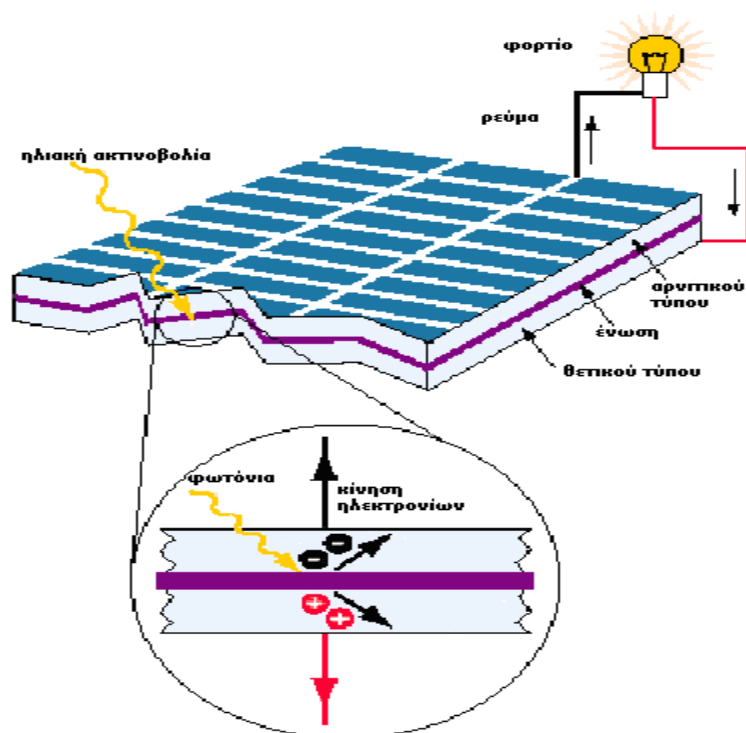


### Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας σε αίθριες και συννεφιασμένες ημέρες

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 προσπάθειές 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.

## Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

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



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.

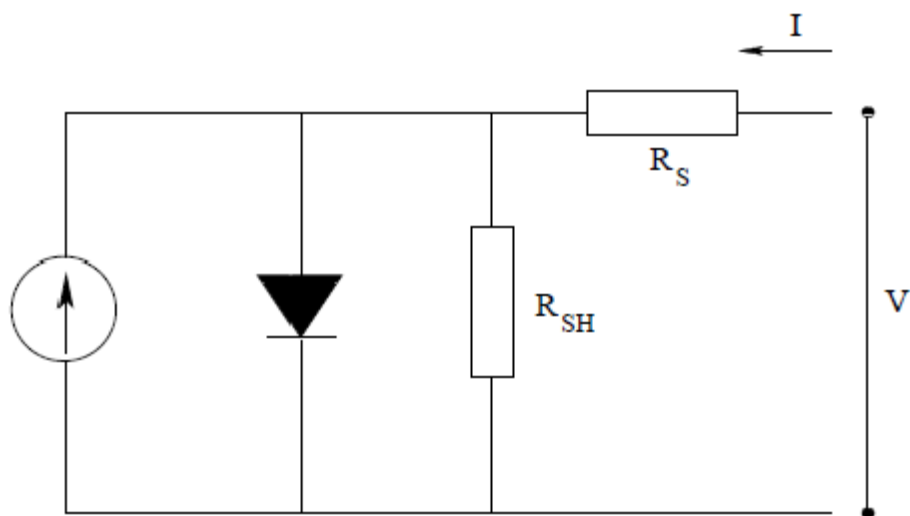
Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούν διόδους ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n με τη μορφή επίπεδης πλάκας. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. 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**.

## Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων

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.



**Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ηλιακού κυττάρου που περιλαμβάνει μία γεννήτρια ρεύματος στα αριστερά η οποία συνδέεται παράλληλα με μία δίοδο και την αντίσταση RSH. Η συνολική αντίσταση του κυττάρου, συνδέεται σε σειρά και παρίσταται από την ποσότητα RS.**

Κατά τη μετακίνηση των φορέων αγωγιμότητας, παρατηρείται μία πτώση τάσης από τον ημιαγωγό προς τις ηλεκτρικές επαφές. Η αντίσταση RS, 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 RSH.

Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου, η αντίσταση RS είναι μικρότερη των 5 Ω και η αντίσταση RSH είναι μεγαλύτερη από 500 Ω. Με τη βοήθεια αυτού του κυκλώματος, είναι δυνατός ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών I-V καμπύλων για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας. Σε μία δίοδο, μπορεί να παραχθεί ρεύμα στο σκοτάδι, χωρίς να παράγεται κανένας φορέας υπό το φως του ήλιου. Το ρεύμα αυτό δίνεται από την εξίσωση:

$$I = I_0 \cdot \exp\left[\frac{qV}{(A * KB * T)} - 1\right]$$

όπου το  $I_0$  είναι το αποκαλούμενο ρεύμα κόρου,  $q(=1.6 * 10^{-19})$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $V$  η τάση στην έξοδο του κυττάρου,  $KB$  η σταθερά BOLTZMANN ( $=1.38 * 10^{-23} \text{ J/0K}$ ),  $T$  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.

$$I_0 = A * T^3 \exp\left[\frac{-E_g}{KB * T}\right]$$

όπου  $E_g$ , είναι το ενεργειακό διάκενο.

Όταν ο φωτισμός λαμβάνεται υπόψιν, τότε η εξίσωση διαμορφώνεται

ως εξής: 
$$I = I_L - I_0 \exp\left[\frac{qV}{(A \cdot K_B \cdot T)} - 1\right]$$

όπου το  $I_L$  καλείται φωτόρευμα και είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με τη σχέση

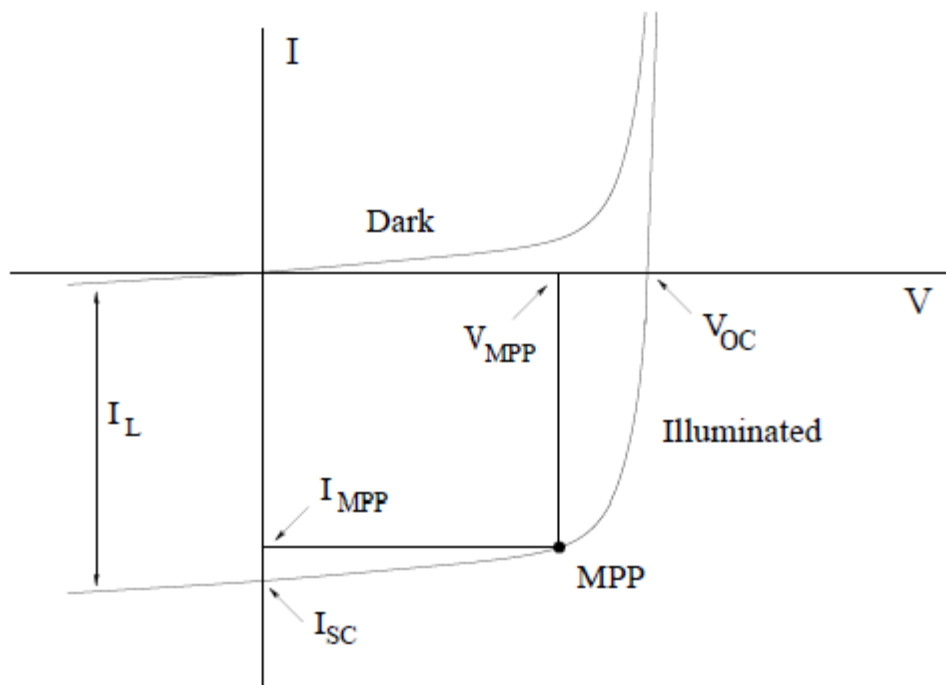
$$I_L = K \cdot G$$

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

Η εξίσωση  $I = I_L - I_0 \exp\left[\frac{qV}{(A \cdot K_B \cdot T)} - 1\right]$

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 φαίνονται στο σχήμα



**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 VMPP και IMPP.**

Το ρεύμα σε μηδενική τάση καλείται ρεύμα βραχυκύκλωσης ISC, ενώ η τάση σε μηδενικό ρεύμα καλείται τάση ανοιχτού κυκλώματος VOC. 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 είναι οι ποσότητες IMPP και VMPP.

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 .

Δηλαδή, θα ισχύει:

$$IL = I_0 \exp\left[\frac{qV}{(A * KB * T)} - 1\right]$$

Βρίσκουμε ότι η τιμή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης του στοιχείου VOC θα είναι :

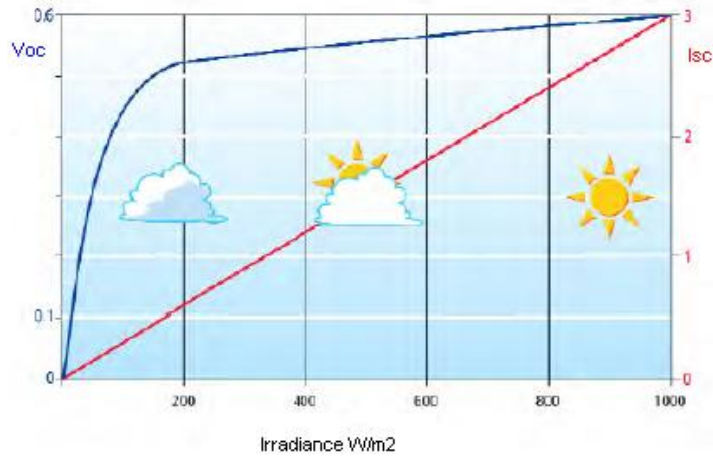
$$V_{oc} = \frac{(A * KB * T)}{q} \ln\left(\frac{IL}{I_0} + 1\right)$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του Φωτορεύματος IL είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή του ρεύματος κόρου I0 και επομένως η σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$V_{oc} = \frac{(A * KB * T)}{q} \ln\left(\frac{IL}{I_0}\right)$$

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

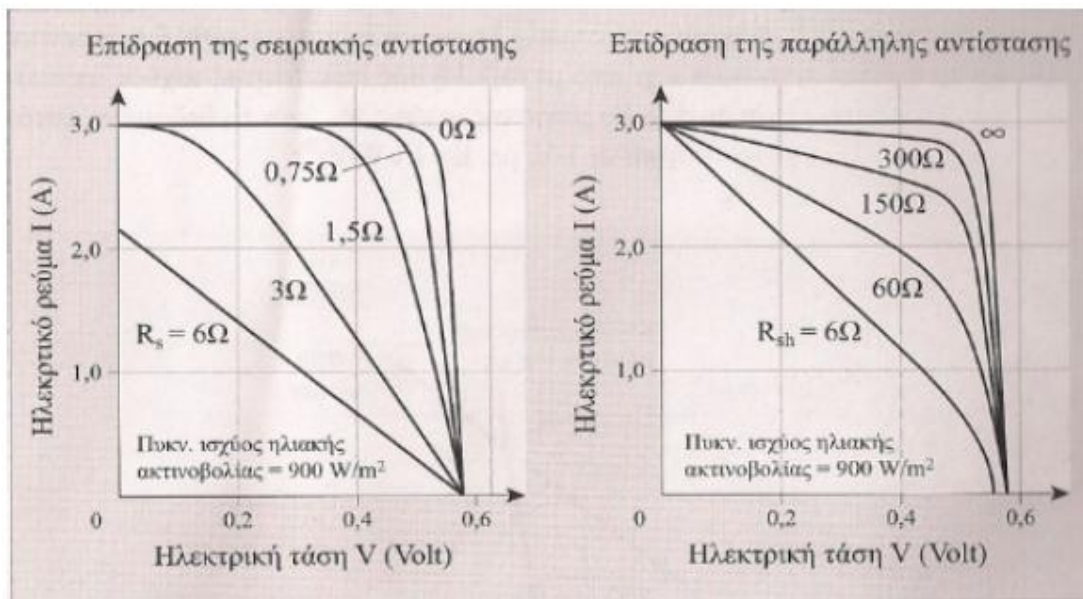




### Εξάρτηση ρεύματος βραχυκυκλώσεως ISC και τάσης ανοικτοκυκλώσεως VOC από την ακτινοβολία

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

$$V_{oc} = \frac{(A * KB * T)}{q} \ln\left(\frac{IL}{I_0}\right)$$

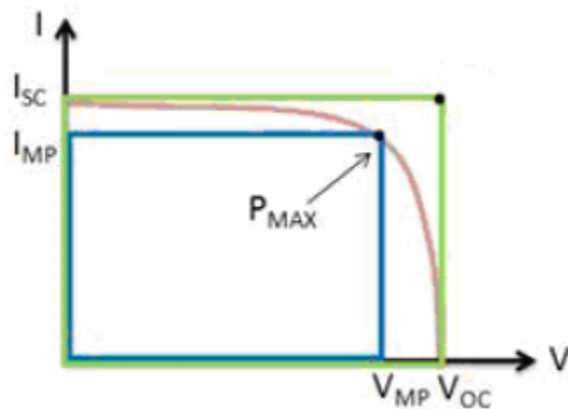


## Επίδραση της σε σειρά αντίστασης $R_S$ και της παράλληλα εμφανιζόμενης $R_{SH}$ , σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο

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 παραπάνω σχήμα. Οι απώλειες λόγω των αντιστάσεων  $R_S$  και  $R_{SH}$  διαμορφώνουν την χαρακτηριστική καμπύλη με αποτέλεσμα να αλλάζει και το εμβαδόν  $V_{MPP} \cdot I_{MPP}$  από το οποίο εξαρτάται ο συντελεστής ποιότητας FF. Ο συντελεστής FF (Fill Factor), περιγράφει την ποιότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

$$FF = \frac{(I_{MPP} * V_{MPP})}{(I_{SC} * V_{OC})}$$

Ο FF δίνεται από το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V του στοιχείου σε συνθήκες ακτινοβολήσης, προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές  $I_{SC}$  και  $V_{OC}$ .



### Προσδιορισμός του συντελεστή ποιότητας FF

Οι τρεις πιο πάνω παράμετροι, δηλαδή το ρεύμα  $I_{SC}$ , η τάση  $V_{OC}$  και ο FF, είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους. Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού, ισούται με το λόγο της εξερχόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την εισερχόμενη ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου.

$$\eta = \frac{P_{max}}{(S * E)} = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{(S * E)} = \frac{(I_{SC} * V_{OC} * FF)}{(S * E)}$$

όπου  $P_{MAX}$ , η αποδιδόμενη ισχύς (W), E η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m<sup>2</sup>) και S το εμβαδόν της φωτοβολταϊκής επιφάνειας.

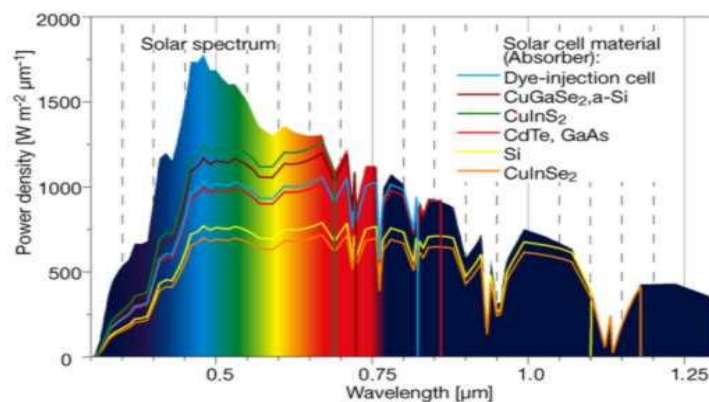
Από τη σχέση

$$\eta = \frac{P_{max}}{(S * E)} = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{(S * E)} = \frac{(I_{SC} * V_{OC} * FF)}{(S * E)}$$

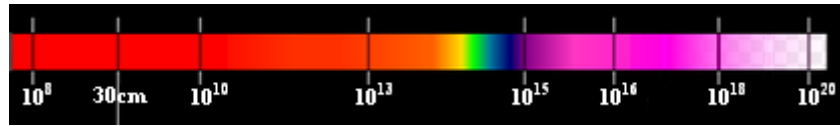
διαπιστώνουμε πως για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των FF,  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$  να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

## Περιορισμοί στην απόδοση των φωτοβολταϊκών

Γιατί όμως δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε όλη την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια; Το κάθε ημιαγωγό υλικό αντιδρά σε **διαφορετικά μήκη κύματος** της ακτινοβολίας. Κάποια υλικά αντιδρούν σε ευρύτερα **φάσματα ακτινοβολίας** από κάποια άλλα.



Έτσι ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούμε μπορούμε να εκμεταλλευτούμε μόνο εκείνο το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιδρά με το συγκεκριμένο υλικό.



### Ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Περιοχή του φάσματος	Περιοχή συχνοτήτων	Ενέργεια φωτονίων
<u>Ραδιοκύματα</u>	0-300 <u>MHz</u>	0-10 <sup>-5</sup> <u>eV</u>
<u>Μικροκύματα</u>	300 <u>MHz</u> - 300 <u>GHz</u>	10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-3</sup> <u>eV</u>
<u>υπέρυθρη ακτινοβολία</u>	300 <u>GHz</u> - 400 <u>THz</u>	10 <sup>-3</sup> - 1,6 <u>eV</u>
<u>ορατή ακτινοβολία</u>	400-800 <u>THz</u>	1,6 - 3,2 <u>eV</u>
<u>υπεριώδης ακτινοβολία</u>	800 <u>THz</u> - 3 · 10 <sup>17</sup> <u>Hz</u>	3 <u>eV</u> - 2000 <u>eV</u>
<u>ακτίνες X</u>	3 · 10 <sup>17</sup> <u>Hz</u> - 5 · 10 <sup>19</sup>	1200 <u>eV</u> - 2,4 · 10 <sup>5</sup> <u>eV</u>

Hz

<u>ακτίνες γ</u>	$5 \cdot 10^{19} \text{Hz} - 3 \cdot 10^{22} \text{Hz}$	$10^5 \text{eV} - 10^7 \text{eV}$
<u>Κοσμικές ακτίνες</u>	$3 \cdot 10^{22} \text{Hz} -$	$10^7 \text{eV} -$

Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια συμβολίζει τον **συντελεστή απόδοσης** του υλικού. Οι δύο βασικοί παράγοντες για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού υλικού είναι το ενεργειακό χάσμα του υλικού και ο συντελεστής μετατροπής.

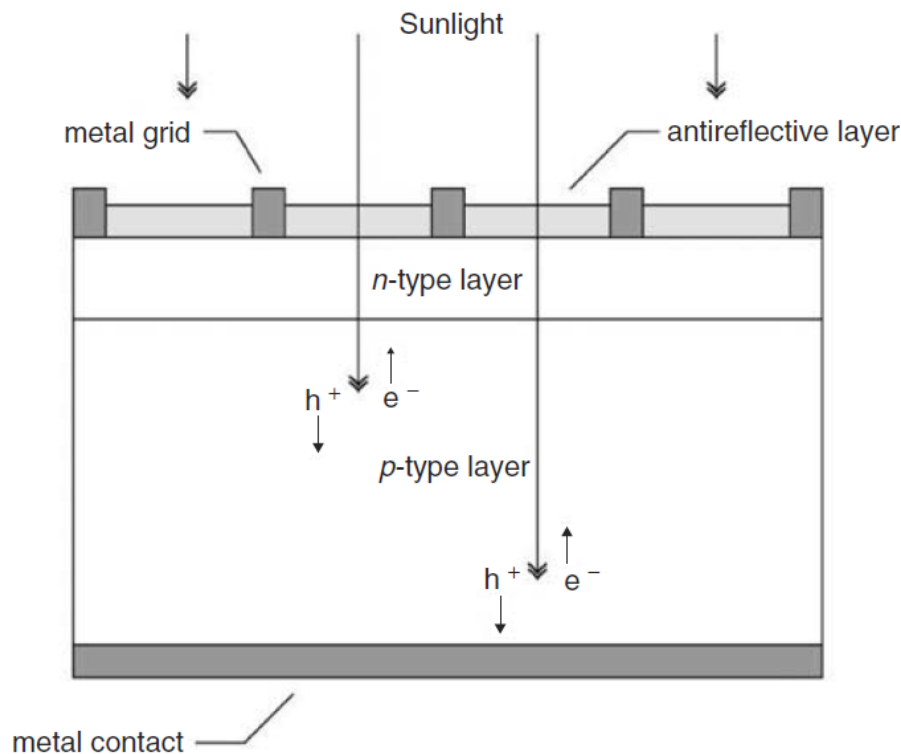
## Η φυσική του ηλιακού κυττάρου

Τα ηλιακά κύτταρα ημιαγωγών είναι αρκετά απλές συσκευές. Οι ημιαγωγοί έχουν την ικανότητα να απορροφούν το φως και να παραδίδουν μια μερίδα της ενέργειας των απορροφημένων φωτονίων στους μεταφορείς ρεύματος –ηλεκτρόνια και οπές. Μια δίοδος ημιαγωγών χωρίζει και συλλέγει τους μεταφορείς και οδηγεί το παραγμένο ηλεκτρικό ρεύμα κατά προτίμηση σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Κατά συνέπεια, ένα ηλιακό κύτταρο είναι απλά μια δίοδος ημιαγωγών που έχει σχεδιαστεί προσεκτικά και έχει κατασκευαστεί αποτελεσματικά ώστε να απορροφά και να μετατρέπει την ενέργεια από τον ήλιο σε ηλεκτρική ενέργεια.

Μια απλή συμβατική δομή ηλιακών κυττάρων απεικονίζεται στο σχήμα παρακάτω. Το φως του ήλιου είναι στην κορυφή, στο μέτωπο του ηλιακού κυττάρου. Ένα μεταλλικό πλέγμα διαμορφώνει μια από τις ηλεκτρικές επαφές της διόδου και επιτρέπει στο φως να πέσει στον ημιαγωγό ανάμεσα στις γραμμές πλέγματος και έτσι να απορροφηθεί και να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα αντανακλαστικό στρώμα μεταξύ των γραμμών πλέγματος αυξάνει το ποσό φωτός που διαβιβάζεται στον ημιαγωγό.

Η δίοδος ημιαγωγών διαμορφώνεται όταν ο *n*-τύπος ημιαγωγός και ο *p*-τύπος ημιαγωγός συγκεντρώνονται για να διαμορφώσουν μια μεταλλουργική σύνδεση. Αυτό επιτυγχάνεται χαρακτηριστικά μέσω της διάχυσης ή της εμφύτευσης των συγκεκριμένων προσμίξεων

(υλικά πρόσμιξης) ή μέσω μιας διαδικασίας απόθεσης. Η άλλη ηλεκτρική επαφή της διόδου διαμορφώνεται από έναν μεταλλικό στρώμα στην πλάτη του ηλιακού κυττάρου



Μια σχηματική αναπαράσταση ενός απλού συμβατικού ηλιακού κυττάρου. Δημιουργία των ζευγαριών ηλεκτρονίων-οπών,  $e^-$  και  $h^+$ , αντίστοιχα

Όλη η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, συμπεριλαμβανομένου του φωτός του ήλιου, μπορεί να αντιμετωπισθεί από φωτόνια που φέρνουν τα συγκεκριμένα ποσά ενέργειας που καθορίζονται από τις φασματικές ιδιότητες της πηγής τους. Τα φωτόνια εκθέτουν επίσης έναν κυματοειδή χαρακτήρα με μήκος κύματος,  $\lambda$ , που αφορά την ενέργεια  $E_\lambda$  των φωτονίων

$$E_\lambda = \frac{hc}{\lambda}$$

Όπου το  $h$  είναι η σταθερά του Planck και  $c$  ( $= 3 * 10^8$ ) η ταχύτητα του φωτός. Μόνο φωτόνια με την ικανοποιητική ενέργεια δημιουργούν ένα ζευγάρι οπών- ηλεκτρονίων, δηλαδή εκείνα με την μεγαλύτερη ενέργεια από το χάσμα ζωνών του ημιαγωγού ( $E_G$ ), θα συμβάλουν στη διαδικασία ενεργειακής μετατροπής.

Κατά συνέπεια, η φασματική σύνθεση του φωτός του ήλιου είναι μια σημαντική εκτίμηση στο σχέδιο των αποδοτικών ηλιακών κυττάρων.

Ο ήλιος έχει μια θερμοκρασία επιφάνειας περίπου 5762K και το φάσμα ακτινοβολίας του μπορεί να προσεγγιστεί από ένα μαύρο θερμαντικό σώμα σε αυτή την θερμοκρασία. Η εκπομπή της ακτινοβολίας από τον ήλιο, όπως με όλα τα μαύρα θερμαντικά σώματα, είναι ισοτροπική . Εντούτοις, η γήινη μεγάλη απόσταση από τον ήλιο (περίπου 93 εκατομμύρια μίλια ή 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα) σημαίνει ότι μόνο εκείνα τα φωτόνια που εκπέμπονται άμεσα στη γη συμβάλουν στο ηλιακό φάσμα όπως παρατηρούνται από τη γη. Επομένως, για τους περισσότερους πρακτικούς λόγους, το φως που αφορά τη γη μπορεί να θεωρηθεί ως παράλληλα ρεύματα από τα φωτόνια. Ακριβώς επάνω από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση ακτινοβολίας, ή η ηλιακή σταθερά, είναι περίπου 1.353 kW/to τετρ.μέτρο και η φασματική διανομή αναφέρονται ως **Air Mass 0** (AM0) την φασματική ακτινοβολία. Η μάζα αέρα είναι ένα μέτρο για το πώς η απορρόφηση στην ατμόσφαιρα έχει επιπτώσεις στο φασματικό περιεχόμενο και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γήινη επιφάνεια. Ο μαζικός αριθμός αέρα είναι, λαμβάνοντας υπόψη την ηλιακή σταθερά

$$Air\ mass = \frac{1}{\cos\theta}$$

Ο ήλιος έχει μια θερμοκρασία επιφάνειας περίπου 5762K και το φάσμα ακτινοβολίας του μπορεί να προσεγγιστεί από ένα μαύρο θερμαντικό σώμα σε αυτή την θερμοκρασία. Η εκπομπή της ακτινοβολίας από τον ήλιο, όπως με όλα τα μαύρα θερμαντικά σώματα, είναι ισοτροπική . Εντούτοις, η γήινη μεγάλη απόσταση από τον ήλιο (περίπου 93 εκατομμύρια μίλια ή 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα) σημαίνει ότι μόνο εκείνα τα φωτόνια που εκπέμπονται άμεσα στη γη συμβάλουν στο ηλιακό φάσμα όπως παρατηρούνται από τη γη. Επομένως, για τους περισσότερους πρακτικούς λόγους, το φως που αφορά τη γη μπορεί να θεωρηθεί ως παράλληλα ρεύματα από τα φωτόνια. Ακριβώς επάνω από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση ακτινοβολίας, ή η ηλιακή σταθερά, είναι περίπου 1.353 kW/to τετρ.μέτρο και η φασματική διανομή αναφέρονται ως **Air Mass 0** (AM0) την φασματική ακτινοβολία. Η μάζα αέρα είναι ένα μέτρο για το πώς η απορρόφηση στην ατμόσφαιρα έχει επιπτώσεις στο φασματικό περιεχόμενο και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γήινη επιφάνεια. Ο μαζικός αριθμός αέρα είναι, λαμβάνοντας υπόψη την ηλιακή σταθερά

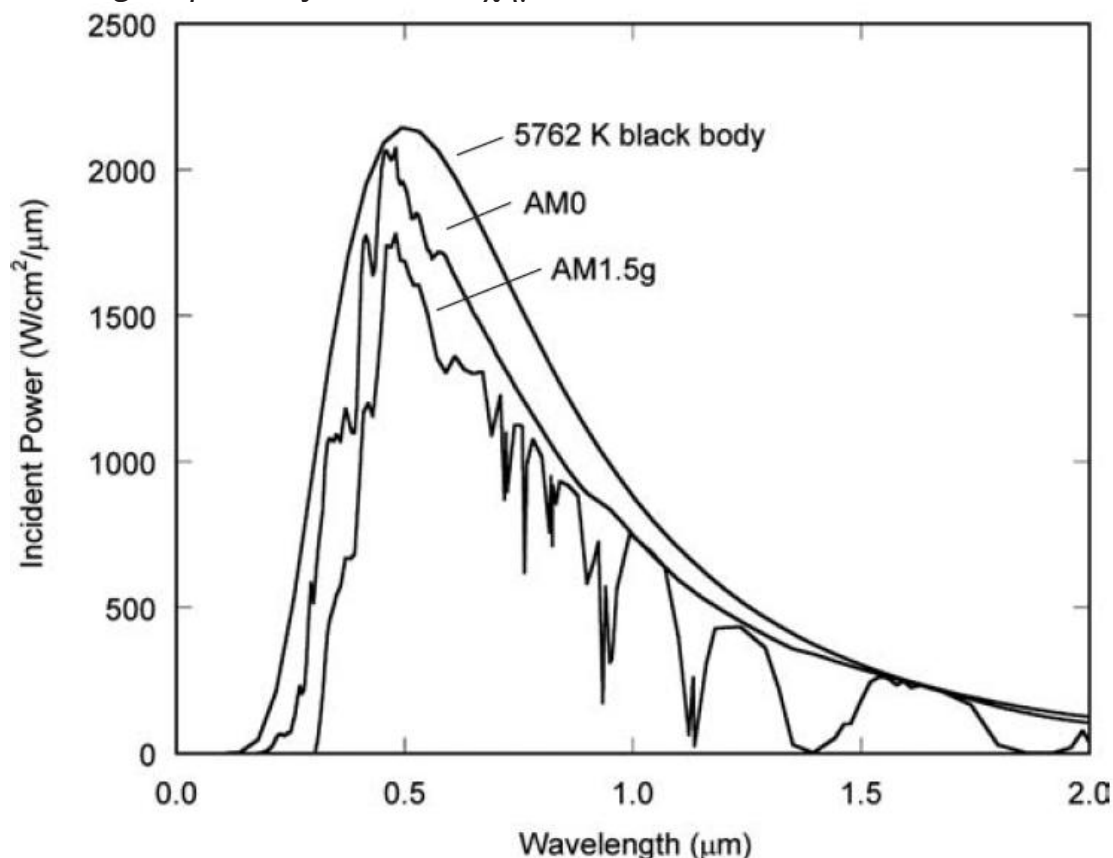
$$Air\ mass = \frac{1}{\cos\theta}$$

που  $\theta$  είναι η γωνία της πρόσπτωσης ( $\theta = 0$  όταν ο ήλιος είναι άμεσα υπερυψωμένος). Ο μαζικός αριθμός αέρα είναι μεγαλύτερος ή ίσος με ένα στη γήινη επιφάνεια.

Ευρέως χρησιμοποιημένα πρότυπα για τη σύγκριση της απόδοσης ηλιακών κυττάρων είναι το AM1.5 ( $\theta = 48.2$ ) φάσμα που ομαλοποιείται σε μια συνολική πυκνότητα ισχύος 1 kW/το τετρ.μέτρο. Το φασματικό περιεχόμενο του φωτός του ήλιου στη γήινη επιφάνεια έχει επίσης ένα διάχυτο (έμμεσο) συστατικό λόγω της διασποράς και της αντανάκλασης στην ατμόσφαιρα και το περιβάλλον τοπίο, και μπορεί να αποτελέσει μέχρι και το 20% του ελαφριού γεγονότος σε ένα ηλιακό κύτταρο. Ο μαζικός αριθμός αέρα επομένως καθορίζεται από το μετρημένο φάσμα το οποίο περιλαμβάνει το διάχυτο συστατικό.

Ένα (σφαιρικό) φάσμα AM1.5g περιλαμβάνει το διάχυτο συστατικό, ενώ ένα AM1.5d (άμεσο) όχι.

Ένα μαύρο σώμα ( $\tau = 5762$  K), AM0, και φάσματα ακτινοβολίας AM1.5g παρουσιάζονται στο σχήμα



Το φάσμα ακτινοβολίας για ένα μαύρο σώμα σε 5780 K, ένα AM0 φάσμα, και ένα σφαιρικό φάσμα AM1.5



Οι βασικές φυσικές αρχές που κρύβονται κάτω από τη λειτουργία των ηλιακών κυττάρων αποτελούν το αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου . Κατ' αρχάς, μια συνοπτική αναθεώρηση των θεμελιωδών ιδιοτήτων των ημιαγωγών περιλαμβάνει μια επισκόπηση της δομής ζωνών ημιαγωγών και της παραγωγής μεταφορέων, του επανασχεδιασμού, και της μεταφοράς.

Έπειτα, οι ηλεκτροστατικές ιδιότητες της διόδου- PN αναθεωρείται, ακολουθούμενη από μια περιγραφή των βασικών λειτουργικών χαρακτηριστικών του ηλιακού κυττάρου, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής (βασισμένης στη λύση από την εξίσωση διάχυσης μειονότητα-μεταφορέων) μια έκφραση για την ένταση –τάση χαρακτηριστική ενός εξιδανικευμένου ηλιακού κύτταρου . Αυτό χρησιμοποιείται για να καθορίσει τους βασικούς αριθμούς ηλιακών κυττάρων, δηλαδή την τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , το ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$  , τον παράγοντα αφθονίας  $FF$ , αποδοτικότητα μετατροπής  $\eta$ , και την αποδοτικότητα συλλογής  $\eta_c$ . Ένα μεγάλο μέρος της συζήτησης εδώ θα εστιάσει στον τρόπο με τον οποίο ο επανασχεδιασμός μεταφορέων

είναι ο αρχικός παράγοντας που ελέγχει την απόδοση ηλιακών κυττάρων.

Τέλος, μερικά πρόσθετα θέματα σχετικά

στη λειτουργία ηλιακών κυττάρων, το σχέδιο και η ανάλυση παρουσιάζονται. Αυτά περιλαμβάνουν τη σχέση μεταξύ του χάσματος ζωνών και αποδοτικότητας , τη φασματική απόκριση των ηλιακών κυττάρων, παρασιτικά ανθεκτικά αποτελέσματα, θερμοκρασιακά αποτελέσματα, εξάρτηση τάσης , μια συνοπτική εισαγωγή σε μερικές σύγχρονες έννοιες σχεδίου κυττάρων, και μια συνοπτική επισκόπηση της λεπτομερούς αριθμητικής διαμόρφωσης των ηλιακών κυττάρων

## ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Τα ηλιακά κύτταρα μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά ημιαγωγών, το πιο κοινό υλικό είναι το πυρίτιο (Si) –κρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό, και άμορφο. Τα ηλιακά κύτταρα κατασκευάζονται επίσης από άλλα υλικά ημιαγωγών όπως GaAs, GaInP, Cu(InGa)Se<sub>2</sub>, and CdTe.

Τα υλικά των ηλιακών κυττάρων επιλέγονται κατά ένα μεγάλο μέρος βάσει της αντιστοιχίας των χαρακτηριστικών απορρόφησής τους του ηλιακού φάσματος και στο κόστος επεξεργασίας τους.

Το πυρίτιο είναι μια κοινή επιλογή γιατί τα χαρακτηριστικά απορρόφησής του έχουν μια αρκετά καλή αντιστοιχία στο ηλιακό φάσμα, και διότι η τεχνολογία επεξεργασίας πυριτίου αναπτύσσεται γρήγορα στη ηλεκτρονική βιομηχανία ημιαγωγών.

### Δομή κρυστάλλου

Οι ηλεκτρονικοί ημιαγωγοί είναι πολύ καθαρά κρυστάλλινα υλικά. Η κρυστάλλινη φύση τους είναι επειδή τα άτομά τους ευθυγραμμίζονται σε μια κανονική περιοδική σειρά. Αυτή η περιοδικότητα, που συνδέεται με τις ατομικές ιδιότητες των συστατικών στοιχείων, είναι αυτό που δίνει στους ημιαγωγούς τις πολύ χρήσιμες ηλεκτρονικές τους ιδιότητες.

I	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	O
		Al	Si	P	S
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te

Σημειώστε ότι το πυρίτιο είναι στη στήλη IV, σημαίνοντας ότι έχει τέσσερα ηλεκτρόνια δηλαδή τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους που μπορούν να μοιραστούν με τα γειτονικά άτομα τους για να διαμορφώσουν τους ομοιοπολικούς δεσμούς με τα γειτονικά

Στο κρυσταλλικό πυρίτιο, τα άτομα τακτοποιούνται σε ένα δικτυωτό πλέγμα διαμαντιών (το στοιχείο του άνθρακα είναι επίσης στη στήλη IV) με την τετραεδρική σύνδεση - τέσσερις δεσμοί από κάθε άτομο όπου η γωνία μεταξύ των οποιωνδήποτε δύο δεσμών είναι 109,5 μοίρες.

Αυτή η ρύθμιση μπορεί να αντιπροσωπευθεί από δύο αλληλοδιαπεραστικά πρόσωπο-κεντροθετημένα κυβικά κύτταρα μονάδων, (face centered cubic=**fcc**), όπου το δεύτερο κύτταρο μονάδων είναι μετατοπισμένο ένα τέταρτο απόσταση κατά μήκος της διαγωνίου του πρώτου κυττάρου μονάδων **fcc**.

Η σταθερά δικτυωτού πλέγματος  $L$ , ισούται με το μήκος από τις άκρες του κυβικού κυττάρου μονάδων. Ολόκληρο το δικτυωτό πλέγμα μπορεί να κατασκευαστεί με τη συσσώρευση αυτών των κυττάρων μονάδων. Το δικτυωτό πλέγμα zincblende εμφανίζεται σε πολλούς δυαδικούς III-V και II-VI ημιαγωγούς όπως GaAs (μια III-V ένωση) και CdTe (μια II-VI ένωση).

Παραδείγματος χάριν, σε ένα GaAs το αλληλοδιαπεραστικό κύτταρο μονάδων **fcc** αποτελείται εξ ολοκλήρου από άτομα γαλλίου και το άλλο εξ ολοκλήρου από άτομα αρσενικού.

Το μέσο σθένος είναι τέσσερα για κάθε ένωση, έτσι ώστε να υπάρχουν τέσσερις δεσμοί σε κάθε άτομο με ομοιοπολικό δεσμό τα οποία περιλαμβάνουν δύο ηλεκτρόνια σθένους.

Μερικές ιδιότητες των ημιαγωγών εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του δικτυωτού πλέγματος κρυστάλλου, και η δομή του κρυστάλλου από την άποψη ενός κυβικού κυττάρου μονάδων κάνει τον προσδιορισμό του προσανατολισμού ευκολότερου με τη βοήθεια δεικτών.

## Δομή ενεργειακών ζωνών

Η περιοδική κρυστάλλινη δομή του ημιαγωγού καθιερώνει τις ηλεκτρονικές ιδιότητές του. Ένα ηλεκτρόνιο που κινείται σε ένα ημιαγωγικό υλικό είναι ανάλογο με ένα μόριο που περιορίζεται σε ένα τρισδιάστατο κιβώτιο που έχει μια σύνθετη εσωτερική δομή, λόγω των πιθανών τομέων που περιβάλλουν τον πυρήνα του συστατικού ατόμου και τα στενά συνδεδεμένα ηλεκτρόνια πυρήνων.

Η δυναμική συμπεριφορά του ηλεκτρονίου μπορεί να καθιερωθεί από το ηλεκτρόνιο  $\psi$  που λαμβάνεται με την επίλυση της εξίσωσης **Schrodinger** όπου το  $m$  είναι μάζα ηλεκτρονίων,  $h$  είναι η σταθερά **Planck**, το  $E$  είναι η ενέργεια του ηλεκτρονίου,  $U(\vec{r})$  είναι η περιοδική πιθανή ενέργεια μέσα στον ημιαγωγό.

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{h^2} [E - U(\vec{r})] \psi = 0$$

Η επίλυση αυτής της κβαντικής μηχανικής εξίσωσης είναι πέρα από το πεδίο αυτής της εργασίας, αλλά αρκεί για να πει ότι η λύση καθορίζει τη δομή ζωνών (οι ενέργειες ηλεκτρονίων και η σχέση μεταξύ της ενέργειας του ηλεκτρονίου και της ορμής) από τον ημιαγωγό και μας λέει ότι υπολόγισε μηχανικά την κίνηση του ηλεκτρονίου στο κρύσταλλο και είναι, σε μια καλή προσέγγιση, όπως αυτήν ενός ηλεκτρονίου στο ελεύθερο διάστημα εάν η μάζα,  $m$ , αντικατασταθεί από μια αποτελεσματική μάζα  $\tilde{m}$  από τον δεύτερο νόμο Newton της κίνησης. Έτσι θα έχουμε:

$$F = \tilde{m} \cdot a$$

Όπου  $F$  είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη και  $a$  η επιτάχυνση του ηλεκτρονίου.

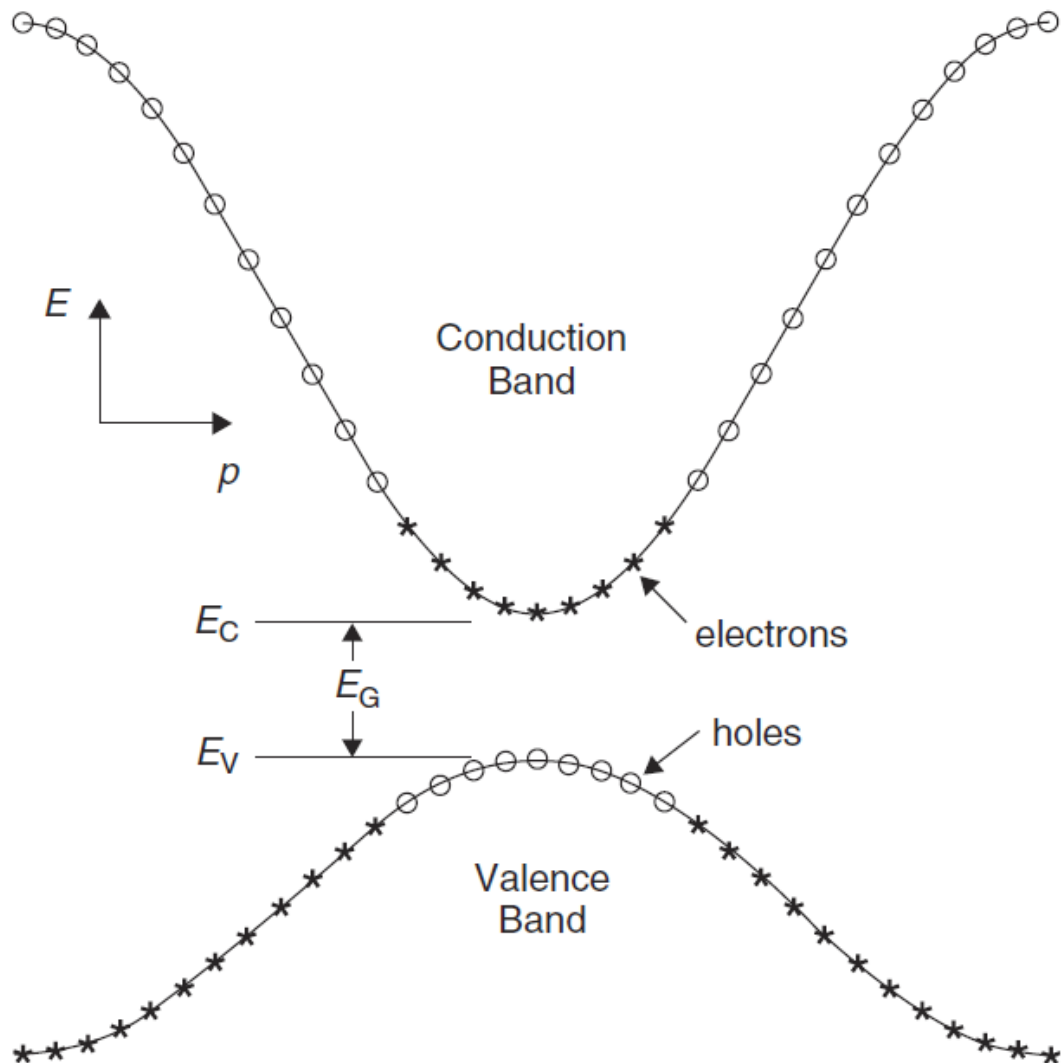
Οι ενέργειες ηλεκτρονίων σχεδιάζονται ενάντια στην ορμή κρυστάλλου,  $p = \hbar K$ , όπου το  $K$  είναι το διάνυσμα κυμάτων που αντιστοιχεί στις λύσεις **Schrodinger**.

Μόνο οι ενεργειακές ζώνες άμεσου ενδιαφέροντος παρουσιάζονται οι ενεργειακές ζώνες κάτω από τη ζώνη σθένους

καταλαμβάνονται πλήρως από τα ηλεκτρόνια και εκείνες οι ζώνες επάνω από τη διεξαγωγή θεωρούνται κενές

Η αποτελεσματική μάζα ηλεκτρονίων καθορίζεται από την κυρτότητα της ζώνης όπως

$$\tilde{m} = \left[ \frac{d^2 E}{dp^2} \right]^{-1} \left[ \frac{1}{h^2} \frac{d^2 E}{dk^2} \right]^{-1}$$



Ένα απλουστευμένο διάγραμμα ενεργειακών ζωνών  $T > 0K$  για έναν άμεσο ημιαγωγό στο χάσμα ζωνών ( $E_g$ )  
 Τα συγκινημένα ηλεκτρόνια και οι παραμένοντες οπές είναι οι αρνητικές και θετικές κινητές δαπάνες που δίνουν στους ημιαγωγούς τις μοναδικές ιδιότητες μεταφορών τους.

Κοντά στην κορυφή της ζώνης σθένους, η αποτελεσματική μάζα είναι πραγματικά αρνητική. Τα ηλεκτρόνια (\*) γεμίζουν τις θέσεις από κάτω προς τα επάνω και οι θέσεις κοντά στην κορυφή της ζώνης σθένους (o) οφείλονται σε μερικά ηλεκτρόνια θερμικά που διεγείρονται στη ζώνη διεξαγωγής. Αυτές οι κενές θέσεις θεωρούνται ως θετικά χρωματισμένοι μεταφορείς αποκαλούνται οπές με μια θετική αποτελεσματική μάζα.

Είναι εννοιολογικά πολύ ευκολότερο να εξεταστεί ένας σχετικά λίγος αριθμός οπών που έχουν θετική αποτελεσματική μάζα δεδομένου ότι θα συμπεριφερθούν όπως τα κλασικά θετικά χρωματισμένα μόρια.

Η αποτελεσματική μάζα δεν είναι σταθερή μέσα σε κάθε ζώνη. Η κορυφή της ζώνης σθένους (Valence band) και το κατώτατο σημείο της ζώνης διεξαγωγής είναι περίπου παραβολικές στη μορφή και επομένως η αποτελεσματική μάζα ηλεκτρονίων  $m_n$  κοντά στο κατώτατο σημείο της ζώνης διεξαγωγής είναι μια σταθερά, όπως είναι η αποτελεσματική μάζα οπών  $m_p$  κοντά στην κορυφή της ζώνης σθένους. Αυτό είναι μια πολύ πρακτική υπόθεση η οποία απλοποιεί πολύ τη κατασκευή των ηλιακών κύτταρων

Όταν το ελάχιστο της ζώνης διεξαγωγής εμφανίζεται σαν μέγιστο της ζώνης σθένους ημιαγωγός είναι ένας άμεσος **bandgap** ημιαγωγός. Όταν δεν είναι το ίδιο, ο ημιαγωγός λέγεται ότι είναι ένας έμμεσος **bandgap** ημιαγωγός.

Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την απορρόφηση του φωτός από έναν ημιαγωγό.

Ακόμη και τα άμορφα υλικά έχουν μια παρόμοια δομή ζωνών. Πέρα από τις σύντομες αποστάσεις, τα άτομα ταχτοποιούνται με περιοδικό τρόπο και μπορούμε να καθορίσουμε μια κυματομορφή ηλεκτρονίων.

## Πυκνότητα των οπών στη Ζώνη διεξαγωγής και στη Ζώνη σθένους

Τώρα που έχει προσεγγιστεί η δυναμική της κίνησης ηλεκτρονίων σε έναν ημιαγωγό από το αρνητικά χρεωμένο μόριο με τη μάζα  $\dot{m}_n$  στη ζώνη διεξαγωγής και από ένα θετικά χρεωμένο μόριο με τη μάζα  $\dot{m}_p$  στη ζώνη σθένους, αυτό είναι δυνατό να υπολογίσει την πυκνότητα των οπών σε κάθε ζώνη.

Αυτό περιλαμβάνει πάλι την επίλυση της εξίσωσης **Schrodinger**

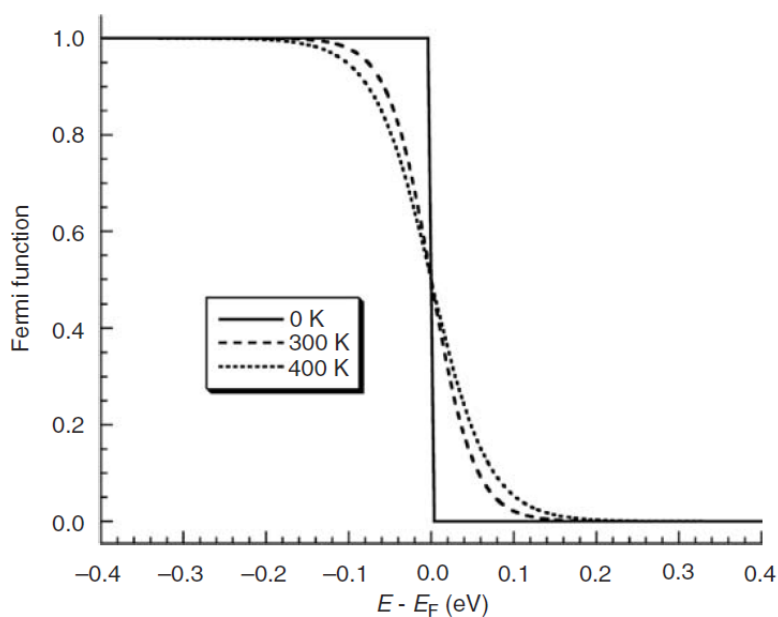
Η πυκνότητα των οπών στη ζώνη διεξαγωγής ισοται:

$$g_c(E) = \frac{\dot{m}_n \sqrt{2\dot{m}_n (E - E_c)}}{\pi^2 h^3} cm^{-3} eV^{-1}$$

Η πυκνότητα των οπών στη ζώνη σθένους ισοται:

$$g_c(E) = \frac{\dot{m}_p \sqrt{2\dot{m}_p (E - E_c)}}{\pi^2 h^3} cm^{-3} eV^{-1}$$

## Συγκεντρώσεις μεταφορέων ισοροπίας



Όταν ο ημιαγωγός είναι στη θερμική ισορροπία (δηλ. σε μια ομοιόμορφη θερμοκρασία χωρίς εξωτερικό η έγχυση ή παραγωγή των μεταφορέων), η fermi λειτουργία καθορίζει την αναλογία των διαθεσιμων οπων ,η ενέργεια των οπών ισούται:

$$f(E) = \frac{1}{1+e^{(E-E_F)/kT}}$$

όπου το  $E_F$  είναι η fermi ενέργεια, το  $K$  είναι σταθερά Boltzmann, και το  $T$  είναι η θερμοκρασία Kelvin. Όπως φαίνεται η fermi λειτουργία είναι μια ισχυρή λειτουργία της θερμοκρασίας. Σε απόλυτο μηδέν, η λειτουργία της είναι σταθερή και όλες οι οπές κάτω από το  $E_F$  γεμίζουν με ηλεκτρόνια και όλες εκείνες από πάνω από το  $E_F$  είναι κενές. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία αυξάνεται, η θερμική διέγερση θα αφήσει μερικές οπές κάτω από το  $E_F$  κενές και ο αντίστοιχος αριθμός κρατών επάνω από το  $E_F$  θα γεμίσει με τα συγκινημένα ηλεκτρόνια.

Οι συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών ισορροπίας (αριθμός ανά  $cm^3$ ) είναι

$$n_o = \int_{E_C}^{\infty} g_C(E) f(E) dE = \frac{2N_C}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}((E_F - E_C)/kT)$$

$$p_o = \int_{-\infty}^{E_V} g_V(E) [1 - f(E)] dE = \frac{2N_V}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}((E_F - E_V)/kT)$$

όπου  $F_{1/2}(\xi)$  είναι το fermi ολοκλήρωμα

$$F_{1/2}(\xi) = \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{\xi'} d\xi'}{1+e^{\xi'-\xi}}$$

Οι πυκνοτητες  $N_C$  και  $N_V$  ( $cm^3$ ) δινονται

$$N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2}$$



Όταν η fermi ενέργεια,  $E_F$ , είναι αρκετά μακριά ( $> 3 kT$ ) από καθεμία άκρη ζωνών, οι συγκεντρώσεις των μεταφορέων προσεγγίζονται (μέσα σε 2%)

$$n_o = N_C e^{(E_F - E_C)/kT}$$

$$p_o = N_V e^{(E_V - E_F)/kT}$$

Και ο ημιαγωγός λέγεται ότι είναι μη εκφυλισμένος. Στους μη εκφυλισμένους ημιαγωγούς (nondegenerate) οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων ισορροπίας κ των οπών είναι ανεξάρτητες από την ενέργεια fermi, και είναι

$$n_o p_o = n_i^2 = N_C N_V e^{(E_V - E_C)/kT} = N_C N_V e^{-E_G/kT}$$

Σε έναν εγγενή ημιαγωγό στη θερμική ισορροπία, ο αριθμός ηλεκτρονίων μέσα στη ζώνη διεξαγωγής και ο αριθμός οπών στη ζώνη σθένους είναι ίσος  $n_o = p_o = n_i$  όπου το  $n_i$  είναι η εγγενής συγκέντρωση μεταφορέων. Η εγγενής συγκέντρωση μεταφορέων μπορεί να υπολογιστεί από

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{(E_V - E_C)/2kT} = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_G/2kT}$$

Η fermi ενέργεια σε έναν εγγενή ημιαγωγό είναι

$$E_i = \frac{E_V + E_C}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_V}{N_C} \right)$$

που είναι χαρακτηριστικά πολύ κοντά στη μέση της ζώνης χάσματος. Η εγγενής συγκέντρωση μεταφορέων είναι χαρακτηριστικά πολύ μικρή έναντι των πυκνοτήτων των οπών και οι χαρακτηριστικές πυκνότητες είναι  $n_i \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  στο Si και οι εγγενείς ημιαγωγοί συμπεριφέρονται παρόμοια με τους μονωτές δηλαδή δεν είναι καλοί αγωγοί της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο αριθμός ηλεκτρονίων και οπών στις αντίστοιχες ζώνες τους, και η αγωγιμότητα του ημιαγωγού, μπορεί να ελεγχθεί μέσω της εισαγωγής των συγκεκριμένων ακαθαρσιών, ή των υλικών πρόσμιξης, οι οποίοι αποκαλούνται χορηγοί και αποδέκτες.

Όταν ενώνεται το πυρίτιο ημιαγωγού με το φώσφορο, ένα ηλεκτρόνιο δίνεται στη ζώνη διεξαγωγής για κάθε άτομο του φωσφόρου που εισάγεται αυτό μπορεί να φανεί επειδή ο φώσφορος είναι στη στήλη V του περιοδικού πίνακα των στοιχείων και έτσι έχει πέντε ηλεκτρόνια σθένους. Τέσσερα από αυτά χρησιμοποιούνται για να ικανοποιήσουν τους τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς στο δικτυωτό πλέγμα του πυριτίου και το πέμπτο είναι διαθέσιμο για να γεμίσει μια κενή θέση στη ζώνη διεξαγωγής.

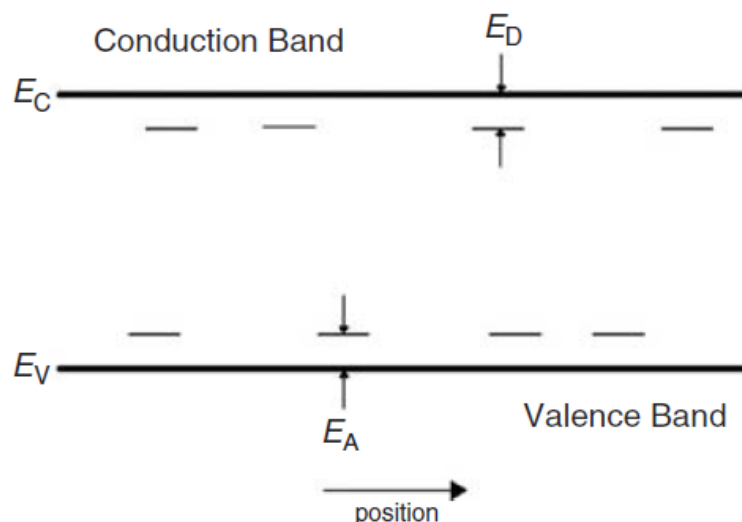
Όταν το πυρίτιο ενώνεται με το βόριο με σθένος τρία, δεδομένου ότι είναι στη στήλη III, κάθε άτομο βορίου δέχεται ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους, το οποίο αφήνει πίσω του μια οπή.

Όλες οι ακαθαρσίες εισάγουν πρόσθετη ηλεκτρονική στάθμη συχνά μέσα στην απαγορευμένη ζώνη μεταξύ της  $E_C$  και  $E_V$

Εάν η ενέργεια της στάθμης  $E_D$  που εισάγεται από ένα άτομο χορηγών είναι αρκετά κοντά στη ζώνη διεξαγωγής θα υπάρξει ικανοποιητική θερμική ενέργεια για να επιτρέψει το πρόσθετο ηλεκτρόνιο να καταλάβει μια θέση στη ζώνη διεξαγωγής.

Οι χορηγοί έπειτα θα φορτιστούν θετικά (ιονιστούν), ομοίως οι αποδεκτές  $E_A$  αρνητικά. Η εισαγωγή των ακαθαρσιών χορηγών και αποδεκτών σε έναν ημιαγωγό επιτρέπει τη δημιουργία *n-type* (τα ηλεκτρόνια είναι οι αρχικοί μεταφορείς του ηλεκτρικού ρεύματος) και *p-type* (οι οπές είναι οι αρχικοί μεταφορείς του ηλεκτρικού ρεύματος τρεχόντων) ημιαγωγών, αντίστοιχα.

Επίπεδα χορηγών και αποδεκτών σε έναν ημιαγωγό



Αυτή είναι η βάση για την κατασκευή όλων των συσκευών ημιαγωγών, συμπεριλαμβανομένων των ηλιακών κυττάρων.

Ο αριθμός ιονισμένων χορηγών και αποδεκτών είναι

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + g_D e^{(E_F - E_D)/kT}} = \frac{N_D}{1 + g_D e^{(E_F - E'_D)/kT}}$$

$$N_A^+ = \frac{N_A}{1 + g_A e^{(E_A - E_F)/kT}} = \frac{N_D}{1 + g_A e^{(E'_A - E_F)/kT}}$$

Όπου  $g_D$  και  $g_A$  είναι οι παράγοντες εκφυλισμού περιοχών, χορηγών και αποδεκτών αντίστοιχα. Χαρακτηριστικά,  $g_D = 2$  και

$g_A = 4$ . Αυτοί οι παράγοντες συνδυάζονται κανονικά έτσι ώστε

$$E'_D = E_D - kT, g_D$$

$$E'_A = E_A - kT, g_A$$

Συχνά, οι χορηγοί και οι αποδέκτες είναι εντελώς ιονισμένοι έτσι ώστε  $n_o \cong N_D$ , n-type και  $p_o \cong N_A$ , p-type

Η fermi ενέργεια μπορεί έπειτα να γραφτεί

$$E_F = E_i + kT \ln \frac{N_D}{n_i}, \text{n-type}$$

$$E_F = E_i + kT \ln \frac{N_A}{n_i}, \text{p-type}$$

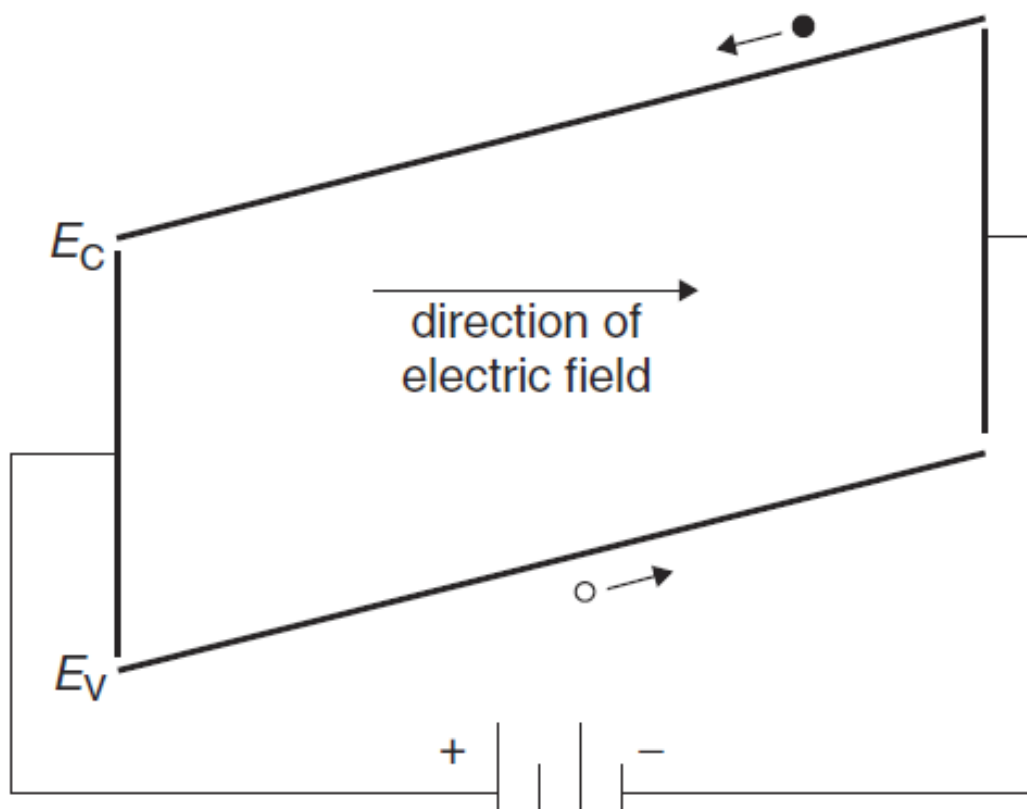
Όταν μια πολύ μεγάλη συγκέντρωση των υλικών πρόσμιξης εισάγεται στον ημιαγωγό, τα υλικά πρόσμιξης δεν θεωρούνται ως δευτερεύουσα διαταραχή στο σύστημα. Χαρακτηριστικά, αυτή η επίδραση πρόσμιξης φανερώνεται ως μείωση της ζώνης χάσματος  $E_G$  και έτσι έχουμε μια αύξηση στην εγγενή συγκέντρωση μεταφορέων.

Επειδή στενεύει η ζώνη χάσματος είναι καταστρεπτική στην απόδοση ηλιακών κυττάρων και έτσι τα ηλιακά κύτταρα σχεδιάζονται χαρακτηριστικά για να αποφύγουν αυτήν την επίδραση.

### Μεταφορά μεταφορέων

Τα ηλεκτρόνια και οι οπές σε έναν ημιαγωγό συμπεριφέρονται σαν έναν ελεύθερο μόριο της ίδιας ηλεκτρονικής δαπάνης με τις αποτελεσματικές μάζες του  $m_n$  και  $m_p$  αντίστοιχα.

Έτσι υπόκεινται στις κλασσικές διαδικασίες της ολίσθησης και της διάχυσης. Η ολίσθηση είναι η φόρτιση ενός μορίου σε ένα εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο. Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται πέρα από έναν ομοιόμορφα ημιαγωγό, οι ζώνες κάμπτονται προς τα πάνω στην κατεύθυνση του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου. Ηλεκτρόνια στη ζώνη διεξαγωγής φορτίζονται αρνητικά, κινούνται στην αντίθετη κατεύθυνση και οι οπές από τη ζώνη σθένους, φορτίζονται θετικά και κινούνται στην ίδια κατεύθυνση με τον εφαρμοσμένο τομέα.



Απεικόνιση της ολίσθησης σε έναν ημιαγωγό. Σημειώστε ότι ηλεκτρόνια και οπές κινούνται αντίθετα

Αυτό είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση της κίνησης των οπών και των ηλεκτρονίων στις συσκευές ημιαγωγών.

Η καθαρή επίδραση είναι ότι οι μεταφορείς εμφανίζονται να κινούνται, σε μια μακροσκοπική κλίμακα, με μια σταθερή ταχύτητα,  $U_d$ , η ταχύτητα κλίσης. Η ταχύτητα κλίσης είναι άμεσα ανάλογη προς το ηλεκτρικό πεδίο

$$\left| \vec{u}_d \right| = \left| \mu \frac{\vec{E}}{E} \right| = |\mu \nabla \varphi|$$

όπου  $\mu$  είναι η κινητικότητα μεταφορέων. Η κινητικότητα μεταφορέων είναι γενικά ανεξάρτητη από την δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου.

Η πυκνότητα ολίσθησης ρεύματος για τις οπές και τα ηλεκτρόνια μπορούν να γραφτούν

$$\vec{J}_p \xrightarrow{drift} = q p \vec{u}_{d,p} = q \mu_p p \frac{\vec{E}}{E} = -q \mu_p p \nabla \varphi$$

και

$$\vec{J}_n \xrightarrow{drift} = q n \vec{u}_{d,n} = q \mu_n n \frac{\vec{E}}{E} = -q \mu_n n \nabla \varphi$$

Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί διασποράς στα ηλιακά κύτταρα είναι τα φωτόνια στο δικτυωτό πλέγμα και οι ιονισμένες διασπορές ακαθαρσιών. Αυτές οι συστατικές κινητικότητες μπορούν να γραφτούν όπως,

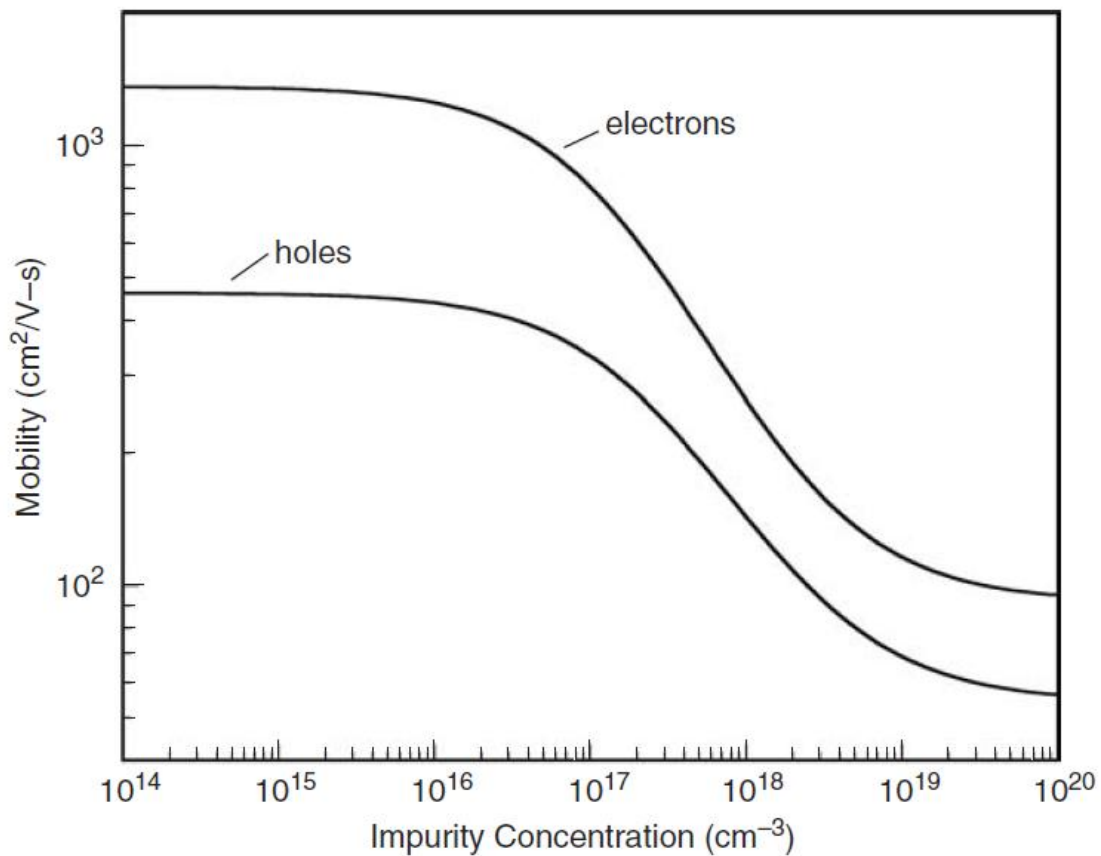
για τη διασπορά δικτυωτού πλέγματος  $\mu_L = C_L T^{-3/2}$

για την ιονισμένη διασπορά ακαθαρσιών  $\mu_I = \frac{C_I T^{3/2}}{N_D^+ N_A^-}$

Οι κινητικότητες μεταφορέων στο Si σε 300 K προσεγγίζονται

$$\mu_n = 92 + \frac{1268}{1 + \left( \frac{N_D^+ + N_A^-}{1.3 \times 10^{17}} \right)^{0.91}} \text{ cm}^2 / \text{V} - \text{s}$$

$$\mu_p = 54.3 + \frac{406.9}{1 + \left( \frac{N_D^+ + N_A^-}{2.35 \times 10^{17}} \right)^{0.88}} \text{ cm}^2 / \text{V} - \text{s}$$



Κινητικότητες ηλεκτρονίων και οπών στο πυρίτιο για  $T = 300\text{K}$

Τα ηλεκτρόνια και οι οπές στους ημιαγωγούς τείνουν, ως αποτέλεσμα της τυχαίας θερμικής κίνησής τους, να μετακινηθούν από τις περιοχές της υψηλής συγκέντρωσης προς τις περιοχές της χαμηλής συγκέντρωσης.

Αυτή η διαδικασία καλείται διάχυση και οι πυκνότητες ρεύματος διάχυσης δίνονται

$$\vec{J}_p^{diff} = -qD_p \nabla p$$

$$\vec{J}_n^{diff} = qD_n \nabla n$$

όπου  $D_p$  και  $D_n$  είναι οι συντελεστές διάχυσης οπών και ηλεκτρονίων αντίστοιχα.

Στη θερμική ισορροπία, δεν μπορεί να υπάρξει καθαρό ρεύμα οπών και καθαρό ρεύμα ηλεκτρονίων δηλαδή η ολίσθηση και η διάχυση πρέπει να ισορροπήσει

Στα μη εκφυλισμένα υλικά, αυτό οδηγεί στη σχέση Einstein

$$\frac{d}{\mu} = \frac{kT}{q}$$

και επιτρέπει στο συντελεστή διάχυσης να υπολογιστεί άμεσα από την κινητικότητα.

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{1}{q} n \left[ \frac{dn}{dE_F} \right]^{-1}$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{1}{q} p \left[ \frac{dp}{dE_F} \right]^{-1}$$

Ο συντελεστής διάχυσης αυξάνεται όταν μπαίνουν τα αποτελέσματα εκφυλισμού .

Τα συνολικά ρεύματα οπών και ηλεκτρονίων (διανυσματικές ποσότητες) είναι το άθροισμα των συστατικών της κλίσης τους και διάχυσης τους .

$$\overrightarrow{J_p} = \overrightarrow{J_p^{drift}} + \overrightarrow{J_p^{diff}} = q\mu_p p \vec{E} - QD_p \nabla_p = -q\mu_p p \nabla_\phi - QD_p \nabla_p$$

$$\overrightarrow{J_n} = \overrightarrow{J_n^{drift}} + \overrightarrow{J_n^{diff}} = q\mu_n n \vec{E} + QD_n \nabla_n = -q\mu_n n \nabla_\phi + QD_n \nabla_n$$

Το συνολικό ρεύμα είναι:

$$\overrightarrow{J} = \overrightarrow{J_p} + \overrightarrow{J_n} + \overrightarrow{J_{disp}}$$

Όπου  $\overrightarrow{J_{disp}}$  είναι το ρεύμα μετατόπισης

$$\overrightarrow{J_{disp}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  είναι ο διηλεκτρικός τομέας μετατοπίσεων.

Το ρεύμα μετατοπίσεων μπορεί να παραμεληθεί στα ηλιακά κύτταρα δεδομένου ότι είναι στατικές συσκευές (dc).

Η λειτουργία των περισσότερων συσκευών ημιαγωγών, συμπεριλαμβανομένων των ηλιακών κυττάρων, μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις:

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = q(p - n + N)$$

Αυτή είναι μια μορφή εξίσωσης Poisson, όπου το  $N$  είναι η καθαρή δαπάνη λόγω των υλικών πρόσμιξης και άλλων δαπανών. Οι εξισώσεις συνοχής οπών και ηλεκτρονίων είναι:

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = q \left( G - R_p - \frac{\partial p}{\partial t} \right)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = q \left( R_n - G + \frac{\partial n}{\partial t} \right)$$

Όπου το  $G$  είναι το οπτικό ποσοστό παραγωγής ζευγαριών ηλεκτρονιο-οπών. Η θερμική παραγωγή συμπεριλαμβάνεται στα  $R_p$  και  $R_n$ . Οι πυκνότητες οπών και ρεύματος ηλεκτρονίων είναι:

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \nabla(\varphi - \varphi_p) - kT\mu_p \nabla p$$

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \nabla(\varphi + \varphi_n) + kT\mu_n \nabla n$$

Οι όροι  $\varphi_p$  και  $\varphi_n$  είναι οι αποκαλούμενες παράμετροι ζωνών.



Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να δώσει μια βασική κατανόηση της λειτουργίας των ηλιακών κυττάρων, τα χαρακτηριστικά των υλικών ηλιακών κυττάρων που επιτρέπουν τη μετατροπή του φωτός στην ηλεκτρική ενέργεια . Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν τη δυνατότητα των ημιαγωγών να απορροφούν τα φωτόνια και να δίνουν ενέργεια στους μεταφορείς ηλεκτρικού ρεύματος και της δυνατότητας των ημιαγωγών να έχουν ηλεκτρική συμπεριφορά .

Οι βασικές λειτουργικές αρχές του ηλιακού κυττάρου PN προήλθε από τις (απλουστευμένες) εξισώσεις περιγράφοντας τη δυναμική των οπών και των ηλεκτρονίων στους ημιαγωγούς. Αυτό οδήγησε στον καθορισμό των αριθμών των ηλιακών κυττάρων, στην ανοιχτή τάση ( $V_{OC}$ ), το ρεύμα βραχυκυκλώματος ( $I_{SC}$ ), ο παράγοντας αφθονίας ( $FF$ ), και η αποδοτικότητα των κυττάρων ( $\eta$ ).

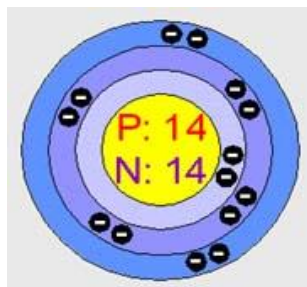
Οι δυο παράγοντες που καθορίζουν την αποδοτικότητα των ηλιακών κυττάρων η παραγωγή και ο επανασυνδυασμός ζευγαριού ηλεκτρόνιο-οπών .

Αποδείχθηκε ότι το πυρίτιο, με ένα χάσμα ζώνης 1,12 eV, είναι μια εύλογα καλή αντιστοιχία στο ηλιακό φάσμα.

# ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

## Χαρακτηριστικά Ημιαγωγών

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου που βρίσκεται στην **εξωτερική του στοιβάδα** (σθένους). Ο περισσότερο γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si) για αυτό και θα επικεντρωθούμε σε αυτό.



Πυρίτιο (Si)

Το πυρίτιο έχει **ατομικό αριθμό 14** και έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 4 ηλεκτρόνια. Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα ή περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (είναι "γενικά")

συμπληρωμένη με 8 e) ψάχνουν άλλα άτομα με τα οποία μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια ή να μοιραστούν κάποια με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους.

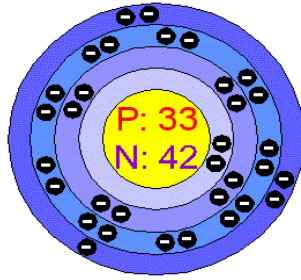
Σε αυτήν την τάση οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πυριτίου αφού όταν συνυπάρχουν πολλά άτομα μαζί διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν ηλεκτρόνια με όλα τα γειτονικά τους άτομα και τελικά με αυτόν τον τρόπο να αποκτούν μια συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα και **κρυσταλλική δομή**. Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα που έχουν τα κρυσταλλικά υλικά.

Στην κρυσταλλική του μορφή όμως το πυρίτιο είναι σταθερό. Δεν έχει ανάγκη ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια κάτι που ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του.

### **Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών**

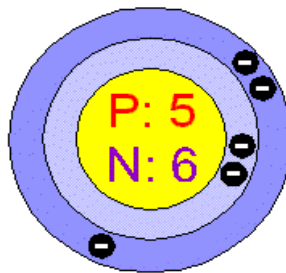
Τις **ημιαγωγές ιδιότητες** του το πυρίτιο τις αποκτά με τεχνικό τρόπο. Αυτό πρακτικά γίνεται **με την πρόσμειξη** με άλλα στοιχεία τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στην στοιβάδα σθένους των. Αυτή η πρόσμειξη τελικά κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία (υλικό **τύπου p**) είτε σε αρνητικά φορτία (υλικό **τύπου n**)

Για να φτιαχτεί λοιπόν ένας ημιαγωγός **τύπου n** ή αλλιώς ένας αρνητικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου θα πρέπει να γίνει πρόσμειξη ενός υλικού με 5e στην εξωτερική του στοιβάδα όπως για παράδειγμα το **Αρσενικό (As)**.



Αρσένιο (As)

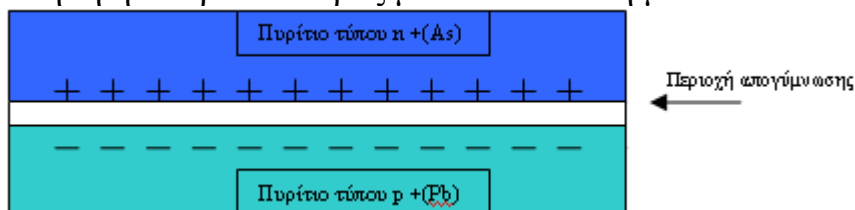
Αντίστοιχα για να δημιουργήσουμε έναν ημιαγωγό **τύπου p** η αλλιώς θετικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη στον κρύσταλλο κάποιου υλικού όπως το **βόριο (B)** που έχει 3e στην εξωτερική του στοιβάδα.



Βόριο (B)

### Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου)

Εάν φέρουμε σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου **τύπου n** και **τύπου p** το ένα απέναντι από το άλλο δημιουργείται μια δίοδος η αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση μόνο.



Τα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής **n** έλκονται από τις «οπές» τις επαφής **p**.

Αυτό το ζευγάρι των δύο υλικών είναι το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού και η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

### **Η επίδραση της Ηλιακής ακτινοβολίας**

Η ηλιακή ακτινοβολία έρχεται με την μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων. Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε μια διάταξη φβ κελιού περνούν αδιατάραχτα την επαφή **τύπου n** και χτυπούν τα άτομα της περιοχής **τύπου p**. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής **τύπου p** αρχίζουν και κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της διόδου όπου και έλκονται πλέον από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής.

Αφού ξεπεράσουν το **ενεργειακό χάσμα** αυτής της περιοχής μετά είναι αδύνατον να επιστρέψουν. Στο κομμάτι της επαφής **n** πλέον έχουμε μια περίσσεια ηλεκτρονίων που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να **παράγει ηλεκτρικό ρεύμα** εάν τοποθετήσουμε μια διάταξη όπως ένας μεταλλικός αγωγός στο πάνω μέρος της επαφής **n** και στο κάτω της επαφής **p** και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται. Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

## **Κατηγορίες Ηλιακών Φωτοβολταϊκών Στοιχείων-Φωτοβολταϊκών κυψελών**

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία - πλαίσια χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες

### **(1)Φωτοβολταϊκά pn ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ**

α. φωτοβολταϊκά (photovoltaic) Μονοκρυσταλλικού πυριτίου με αποδόσεις πλαισίων 14,5% έως 21%,

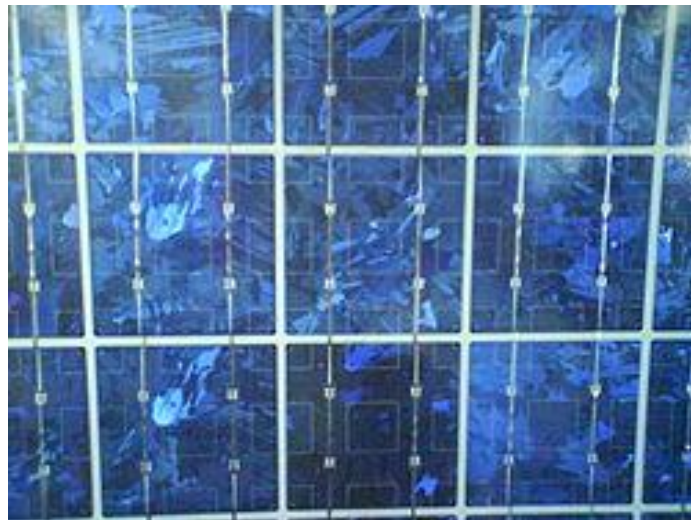
β. φωτοβολταϊκά (photovoltaic) Πολυκρυσταλλικού πυριτίου με αποδόσεις πλαισίων 13% έως 14,5%.

### **(2)Φωτοβολταϊκά pn ΛΕΠΤΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ (thin film pv)**

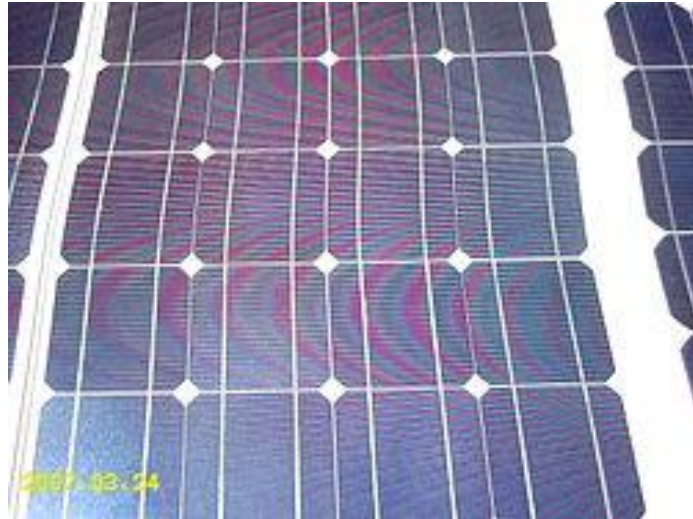
α. **φωτοβολταικά (photovoltaic) από α μορφο Πυρίτιο  $a\text{-Si}$** ,  
ονομαστική απόδοση ~7%.

β. **φωτοβολταικά (photovoltaic) από Χαλκοπυρίτες CIS / CIGS**,  
ονομαστική απόδοση από 7% έως 11%.

Το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φωτοβολταικών. Το πυρίτιο, ανάλογα με την επεξεργασία του, δίνει μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή άμορφα υλικά, από τα οποία παράγονται τα **φωτοβολταικά (photovoltaic) στοιχεία**. Τα λεπτά υλικά είναι ένας τρόπος να μειωθεί το κόστος των φωτοβολταικών πλαισίων και να αυξηθεί η απόδοσή τους. Η τεχνολογία **φωτοβολταικών πλαισίων thin film** βρίσκεται σε αναπτυσσόμενο στάδιο αφού με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας και χρήση διαφορετικών υλικών αναμένεται αύξηση της απόδοσης, σταθεροποίηση των χαρακτηριστικών τους και αύξηση της διείσδυσης στην αγορά. Σήμερα πάντως αποτελούν την πιο φθηνή επιλογή φωτοβολταικών πλαισίων.



**Φωτοβολταικά από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο**



### **Φωτοβολταϊκά από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο**

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ (ή πλαίσια, ή όπως λέγονται συχνά στο εμπόριο, «κρύσταλλα») φωτοβολταϊκών στοιχείων (ή «κυψελών», ή «κυττάρων»), μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνήθως τετράγωνο, με πλευρά 120-160mm. Δυο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων: το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε *μονοκρυσταλλικό* ή *πολυκρυσταλλικό*. Το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα, όσο και μειονεκτήματα, και κατά τη μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται η αξιολόγηση των ειδικών συνθηκών της εφαρμογής (κατεύθυνση και διάρκεια της ηλιοφάνειας, τυχόν σκιάσεις κλπ.) ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία.

Στο εμπόριο διατίθενται φωτοβολταϊκά πάνελ – τα οποία δεν είναι παρά πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους, επικαλυμμένα με ειδικές μεμβράνες και εγκιβωτισμένα σε γυαλί με πλαίσιο από αλουμίνιο – σε διάφορες τιμές ονομαστικής ισχύος, ανάλογα με την τεχνολογία και τον αριθμό των φωτοβολταϊκών κυψελών που τα αποτελούν. Έτσι, ένα πάνελ 36 κυψελών μπορεί να έχει ονομαστική ισχύ

70-85 W, ενώ μεγαλύτερα πάνελ μπορεί να φτάσουν και τα 200 W ή και παραπάνω.

Η κατασκευή μιας γεννήτριας κρυσταλλικού πυριτίου μπορεί να γίνει και από ερασιτέχνες, μετά από την προμήθεια των στοιχείων. Το κόστος είναι απίθανο να είναι χαμηλότερο από την αγορά έτοιμης γεννήτριας, καθώς η προμήθεια ποιοτικών στοιχείων είναι πολύ δύσκολη. Εκτός από το πυρίτιο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως το Κάδμιο - Τελλούριο (CdTe) και ο ινδοδισεληνιούχος χαλκός. Σε αυτές τις κατασκευές, η μορφή του στοιχείου διαφέρει σημαντικά από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου, και έχει συνήθως τη μορφή λωρίδας πλάτους μερικών χιλιοστών και μήκους αρκετών εκατοστών. Τα πάνελ συνδέονται μεταξύ τους και δημιουργούν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει από 2 έως και αρκετές εκατοντάδες φωτοβολταϊκές γεννήτριες.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για το λόγο αυτό οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης: κλασικά παραδείγματα είναι ο υπολογιστής τσέπης («κομπιουτεράκι») και οι δορυφόροι. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αναστροφείς (inverters) - που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής κλπ.) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος(AC).



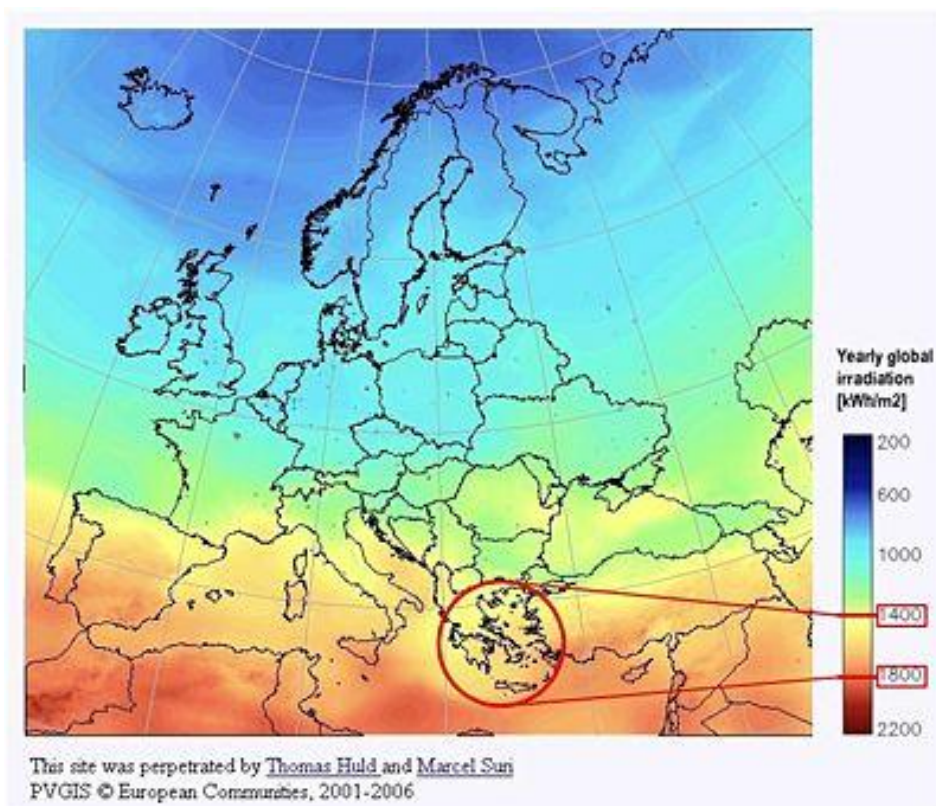


## Φωτοβολταϊκή συστοιχία

## Βαθμός απόδοσης

Ο **βαθμός απόδοσης** εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία, που σχεδιάστηκαν τον 19ο αιώνα, δεν είχαν παρά 1-2% απόδοση, ενώ το 1954 τα εργαστήρια *Bell Laboratories* δημιούργησαν τα πρώτα Φ/Β στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6%. Στην πορεία του χρόνου όλο και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης: η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα

στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Οι προϋποθέσεις αξιοποίησης των Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα είναι από τις καλύτερες στην Ευρώπη, αφού η συνολική ενέργεια που δέχεται κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας στην διάρκεια ενός έτους κυμαίνεται από 1400-1800 kWh.



## Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον: δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα
- Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα Φ/Β συστήματα μπορούν

να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής

- Η λειτουργία του συστήματος είναι ολοσχερώς αθόρυβη
- Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής: οι κατασκευαστές εγγυώνται τα «κρύσταλλα» για 20-30 χρόνια λειτουργίας
- Υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως είναι π.χ. η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου,
- Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές: τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Φ/Β συστήματος είναι ότι μπορεί να διασυνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτροδότησης (διασυνδεδεμένο σύστημα), καταργώντας με τον τρόπο αυτό την ανάγκη για εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πωλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου,
- Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να καταλογιστεί κανείς στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος τους, το οποίο, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό. Μια γενική ενδεικτική τιμή είναι 4000 ευρώ ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ (kW) ηλεκτρικής ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μια τυπική οικιακή κατανάλωση απαιτεί από 1,5 έως 3,5 κιλοβάτ, το κόστος της εγκατάστασης δεν είναι αμελητέο. Το ποσό αυτό, μπορεί να αποσβεστεί σε περίπου 5-6 χρόνια και το Φ/Β σύστημα θα συνεχίσει να παράγει δωρεάν ενέργεια για τουλάχιστον άλλα 25 χρόνια. Ωστόσο, το ευρύ κοινό έχει αρχίσει να στρέφεται όλο και πιο πολύ στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στα φωτοβολταϊκά ειδικότερα, για την κάλυψη ή την συμπλήρωση των ενεργειακών του αναγκών.

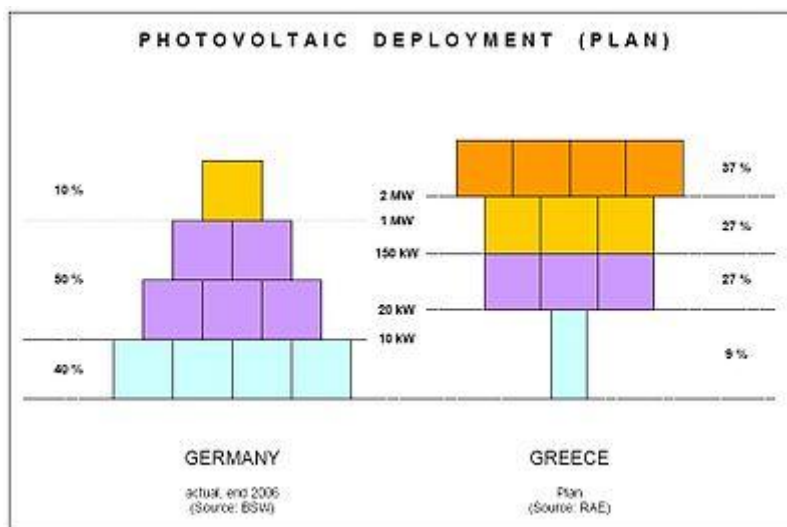
## Κίνητρα

## Στην Ελλάδα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο της για το 2020 το 20% της κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Ως προς την ηλιοθερμική ενέργεια η Ελλάδα ήταν πρωτοπόρος χώρα στην Ευρώπη τις τελευταίες δεκαετίες με περίπου ένα εκατομμύριο εγκατεστημένους ηλιακούς θερμοσίφωνες, που συμβάλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην προστασία του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας το ανεξάντλητο ηλιακό δυναμικό. Τώρα μένει να γίνει το ίδιο και ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προϋποθέσεις μάλιστα για τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα είναι ακόμα καλύτερες, αφού τα Φ/Β συστήματα παρουσιάζουν την μέγιστη παραγωγή ακριβώς εκείνες τις ώρες της ημέρας που και η κατανάλωση (ζήτηση) φτάνει στο μέγιστο και η ΔΕΗ ζητά από όλους τους καταναλωτές να περιορίσουν την ζήτηση ή αναγκάζεται να κάνει περικοπές (ελεγχόμενη συσκότιση). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα επιδοτούνται από το Ελληνικό κράτος μέσω του νέου επενδυτικού νόμου Ν. 3522/06 και του αναπτυξιακού νόμου Ν. 3299/04 για επενδυτές μεσαίας και μεγάλης κλίμακας (επιδότηση αγοράς εξοπλισμού έως και 40% ανάλογα με την περιοχή της εγκατάστασης και τα επιχειρηματικά κριτήρια που ικανοποιούνται). Στη συνέχεια, με βάση το νόμο Ν. 3468/06 για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ο επενδυτής συνάπτει δεκαετές συμβόλαιο – με μονομερή δυνατότητα ανανέωσης της σύμβασης από την πλευρά του επενδυτή για ακόμη δέκα χρόνια – για την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει στον ΔΕΣΜΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) για τις διασυνδεδεμένες περιοχές, ή απευθείας στη ΔΕΗ για τις μη-διασυνδεδεμένες περιοχές. Η τιμή πώλησης κυμαίνεται από 0,40 έως 0,50 Ευρώ ανά κιλοβατώρα (kWh) ανάλογα με το μέγεθος και την περιοχή της εγκατάστασης. Όμως, και ο ιδιώτης μπορεί να επωφεληθεί του νόμου 3468, πουλώνοντας την πλεονάζουσα ενέργεια της εγκατάστασης ιδιόχρησης που διαθέτει στις ίδιες ανταγωνιστικές τιμές, με επιπλέον όφελος φοροελάφρυνση έως και 700 Ευρώ.

Τα κίνητρα αυτά έχουν ήδη δείξει τα πρώτα αποτελέσματα, και πλέον βλέπουμε τη δημιουργία φωτοβολταϊκών πάρκων σε πολλές περιοχές της χώρας, και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε καινούργια ή και παλιότερα σπίτια. Με την τρέχουσα νομοθεσία η Ελληνική πολιτεία στοχεύει στην δημιουργία μεγάλων ως πολύ μεγάλων φωτοβολταϊκών πάρκων, σε αντίθεση με άλλες χώρες, που όπως η Γερμανία στοχεύουν στην ανάπτυξη πολλών μικρών συστημάτων. Μία σχετική σύγκριση φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Τα στοιχεία του διαγράμματος προέρχονται από τον σύνδεσμο εταιρειών ηλιακής

ενέργειας της Γερμανίας (BSW) και από την Ελληνική Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ).



## Στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία είναι αντίστοιχη με την ελληνική. Πολλές πόλεις χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν παράσχει ανάλογα κίνητρα για την εγκατάσταση Φ/Β τόσο σε οικιακές όσο και σε εταιρικές εγκαταστάσεις. Πρόσφατα, η πόλη με την μεγαλύτερη ηλιοφάνεια στην Γερμανία, το Φράιμπουργκ (Freiburg im Breisgau) διατηρώντας τον τίτλο της "πράσινης πόλης" ανακοίνωσε την εγκατάσταση Φ/Β σε οικίες και δημόσια κτίρια. Οι οικιακοί καταναλωτές στην πόλη πωλούν τα ποσά ενέργειας που περισσεύουν στον παροχέα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόμοιες προσπάθειες γίνονται, επίσης, στην Νότια Γαλλία και στην Ιταλία, καθώς οι περιοχές αυτές πλεονεκτούν από την άποψη ημερήσιας ηλιοφάνειας. Προσδοκάται, ωστόσο, η εγκατάσταση Φ/Β και σε βορειότερες περιοχές, ιδιαίτερα όταν βελτιωθεί ο συντελεστής απόδοσής τους.

## Τα κύρια στοιχεία ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος

- Τα κύτταρα

Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο αποτελεί ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα, το οποίο όταν εκτεθεί στο φως παράγει ηλεκτρισμό. Το παραγόμενο ρεύμα

είναι συνάρτηση του προσπίπτοντος φωτός. Το φωτοβολταϊκό κύτταρο παράγει συνεχές ρεύμα.

Το πυρίτιο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Παράγεται με αναγωγή από το διοξείδιο του πυριτίου (το πιο σύνηθες στοιχείο του φλοιού της γης και ιδίως της άμμου ή του χαλαζία). Το ακατέργαστο πυρίτιο που παράγεται βιομηχανικά, πρέπει στη συνέχεια να υποβληθεί σε καθαρισμό και επεξεργασία. Έτσι παράγεται υπό τη μορφή πλινθωμάτων, που ονομάζονται «πλακίδια». Τα πλινθώματα αυτά κόβονται σε πολύ λεπτές πλάκες πάχους 200 μικρομέτρων, τα οποία στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία και επιμετάλλωση για να γίνουν ημιαγωγοί: πρόκειται για τα φωτοβολταϊκά κύτταρα.

Ανάλογα με το εάν κατασκευάζονται από ενιαίους κρυστάλλους πυριτίου ή όχι, τα κύτταρα κατατάσσονται σε μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά με διαφορετικές τεχνικές προδιαγραφές το κάθε ένα. Τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα έχουν καλύτερη απόδοση αλλά τα πολυκρυσταλλικά έχουν μικρότερο κόστος και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

- **Οι μονάδες**

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα χρησιμοποιούνται ορισμένες φορές μόνα τους (φωτισμός κήπου, υπολογιστής τσέπης, κ.λπ.) ή ομαδοποιημένα σε μονάδες.

Μια ηλιακή φωτοβολταϊκή μονάδα (ή φωτοβολταϊκό πλαίσιο) αποτελεί μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που αποτελείται από ένα σύνολο ηλεκτρολογικά συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών κυττάρων, το οποίο λειτουργεί ως βασική μονάδα των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Με τον όρο «ισχύς αιχμής» εννοούμε τη μέγιστη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρισμού ενός κυττάρου ή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (καθώς και οποιασδήποτε άλλης δομής παραγωγής ηλεκτρισμού).

Η ισχύς αιχμής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι της τάξεως των 100 έως 200 watt ανά τετραγωνικό μέτρο (ήτοι απόδοση 10 έως 15 %) γεγονός που παρέχει ισχύ αιχμής 50 έως 250 W ανά πλαίσιο, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του, ιδίως το μέγεθός του.

Αυτή η ισχύς παρέχεται υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος, κάτι που εξυπηρετεί για τη σύνδεση μιας μπαταρίας ή για πολυάριθμες άλλες εφαρμογές, αλλά εάν μας ενδιαφέρει η διοχέτευση του ρεύματος σε δίκτυο πρέπει να υπάρξει μετατροπή σε εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω αντιστροφέα. Η παρεχόμενη τάση εξαρτάται από τον τύπο των πλαισίων

και από τη σύνδεση των κυττάρων. Μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 100 volt.

- **Οι δομές**

Με τον όρο αυτό εννοούμε τα εξαρτήματα πάνω στα οποία τοποθετούνται οι μονάδες.

Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά πάρκα (επίγειοι ηλιακοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής), οι μονάδες στερεώνονται σε μεταλλικές δομές το ύψος και η κλίση των οποίων υπολογίζονται με ακρίβεια σε συνάρτηση με την ηλιοφάνεια και τον προσανατολισμό του πάρκου, ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της εγκατάστασης.

Σήμερα, οι τρόποι ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών μονάδων ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του έργου (ατομική κατοικία, κτήρια συλλογικής χρήσης, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, χώροι στάθμευσης, κ.λπ.) και τους αρχιτεκτονικούς στόχους (στην πρόσοψη, στην οροφή ή αλλού).

Επομένως οι τύποι των δομών είναι και αυτοί εξίσου πολυάριθμοι, και η έρευνα εξακολουθεί να αυξάνει τις δυνατότητες τοποθέτησης. Υπάρχουν τα εξής:

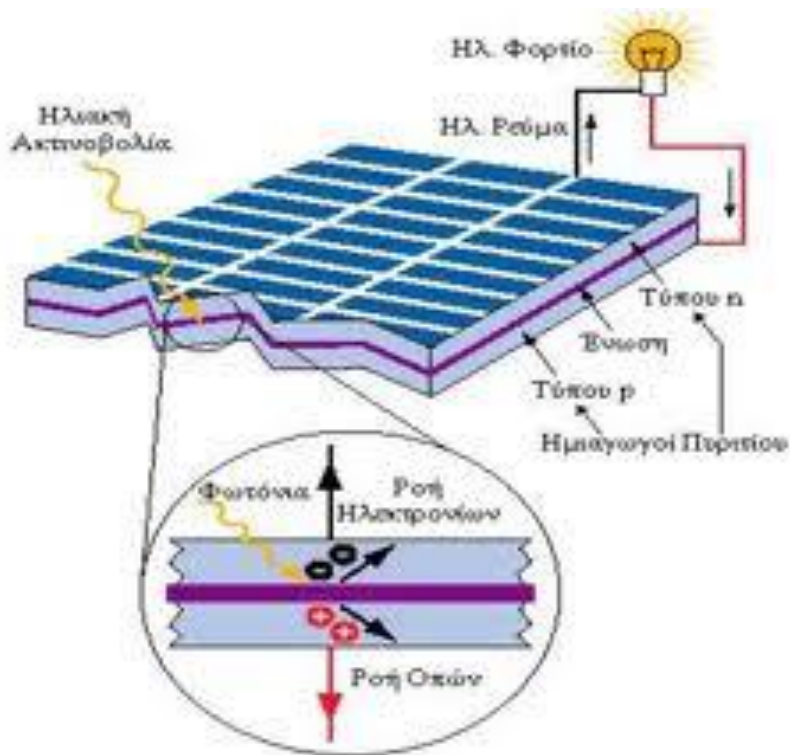
- Δομή τοποθέτησης πάνω στην οροφή (SPT)
- Δομή ενσωμάτωσης στην οροφή (SIT)
- Δομή σκίασης ηλίου (SBS)
- Τριγωνική δομή εδάφους (STS)

- **Οι αντιστροφείς**

Ο αντιστροφέας αποτελεί μια ηλεκτρονική διάταξη ισχύος που παρέχει τάση και εναλλασσόμενο ρεύμα με βάση μια πηγή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος. Ο αντιστροφέας είναι ένας μετατροπέας τύπου συνεχές/εναλλασσόμενο.

- **Τα υπόλοιπα εξαρτήματα**

Υπάρχουν και άλλα εξαρτήματα που συμπληρώνουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ανάλογα με την προοριζόμενη χρήση του: διακόπτης ασφαλείας, μετρητής παραγωγής και κατανάλωσης, ρυθμιστής, οθόνη, κ.λπ.



## ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Φ/Β

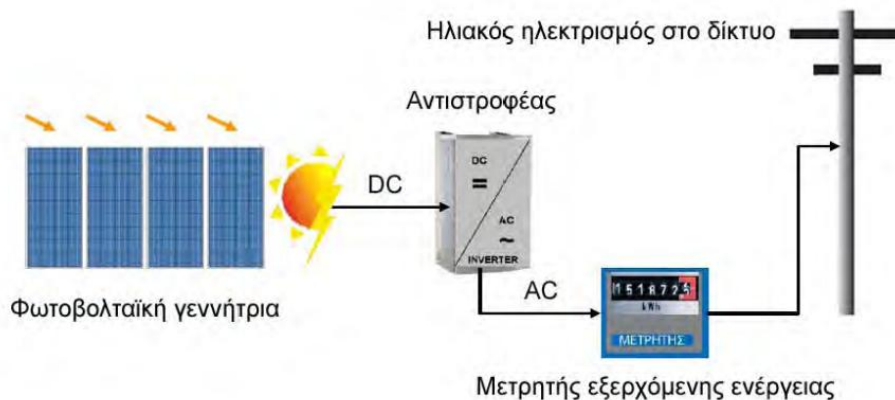
Το ηλιακό φως είναι ουσιαστικά μικρά πακέτα ενέργειας που λέγονται φωτόνια. Τα φωτόνια περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Το γαλάζιο χρώμα ή το υπεριώδες π.χ. έχουν περισσότερη ενέργεια από το κόκκινο ή το υπέρυθρο. Όταν λοιπόν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (που είναι ουσιαστικά ένας "ημιαγωγός"), άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από το φωτοβολταϊκό. Αυτά τα τελευταία φωτόνια είναι που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτόνια αυτά αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού να μετακινηθούν σε άλλη θέση και ως γνωστόν ο ηλεκτρισμός δεν είναι τίποτε άλλο παρά κίνηση ηλεκτρονίων. Σ' αυτή την απλή



αρχή της φυσικής λοιπόν βασίζεται μια από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού στις μέρες μας.

## ΑΠΟ ΤΙ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΕΝΑ Φ/Β

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων (modules) με τις μεταλλικές βάσεις τους, καθώς και αντιστροφείς (inverter) που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Η καρδιά του συστήματος είναι προφανώς τα φωτοβολταϊκά. Αν και υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες διαφορετικές μεταξύ τους, η πιο συνήθης είναι αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου. Η πρώτη ύλη για την παραγωγή αυτών των φωτοβολταϊκών είναι (όπως λέει και το όνομα) το διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) που το παίρνουμε από χαλαζιακά πετρώματα που χρησιμοποιούνται επίσης και για την κατασκευή των chips στους υπολογιστές



## ΠΥΡΙΤΙΟ

Το πυρίτιο, αφού υποστεί ειδική επεξεργασία (καθαρισμό σε υψηλό βαθμό  $>99,99999\%$ , αντίστοιχο αυτού που έχουν τα chips για τους υπολογιστές) γίνεται πολύ λεπτές φέτες (ηλιακά στοιχεία ή αλλιώς ηλιακές κυψέλες) που ενώνονται ηλεκτρικά μεταξύ τους για να σχηματίσουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.



**Φωτοβολταικα**

**στοιχεια**

## **Πυριτίου (Si)**

Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή **φωτοβολταικων στοιχείων** στην 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 φωτοβολταικών**.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του πυριτίου είναι:

- Μπορεί να βρεθεί πάρα πολύ εύκολα στην φύση. Είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Το *διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>)* (ή κοινώς η άμμος) και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γης. Είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον.
- Μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Επίσης είναι σχετικά εύκολο να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή.
- Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους **1250C** κάτι που επιτρέπει την χρήση του πυριτίου σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος που τα **φωτοβολταικά στοιχεία** πυριτίου ανταπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.
- Πολύ σημαντικό στοιχείο, που συνέβαλε στην γρήγορη ανάπτυξη τα φωτοβολταικα στοιχεία τα τελευταία χρόνια, ήταν η ήδη αναπτυγμένη τεχνολογία, στην βιομηχανία της επεξεργασίας του πυριτίου, στον τομέα της **ηλεκτρονικής** (υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ). Το 2007 μάλιστα ήταν η πρώτη χρονιά που υπήρχε μεγαλύτερη ζήτηση (**σε τόνους κρυσταλλικού πυριτίου**) στην αγορά των φωτοβολταικών στοιχείων σε σχέση με αυτήν των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής.
- Μια κατηγοριοποίηση για τα φωτοβολταικά στοιχεία θα μπορούσε να γίνει με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται.

## Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων πυριτίου «μεγάλου πάχους»

### 1) Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Single Crystalline Silicon, sc-Si )



Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. 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 CZ (**Czochralski**) και η μέθοδος FZ (**float zone**). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, είναι της **SunPower** με απόδοση πλαισίου 18,5%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.

## 2) Φωτοβολταϊκά κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)



Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά.

Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

### 3) Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)



Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αναπτύσσεται από την **Evergreen Solar**. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου.

Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω

στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

## **Τύποι Φωτοβολταϊκών υλικών λεπτών επιστρώσεων, thin film**

### **1) Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)**



Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο).

Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του **18,8%** η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.

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



Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) 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 με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκα **thin films** πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%.

Το σημαντικότερο **πλεονέκτημα** για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις **υψηλές θερμοκρασίες**. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το **μειονέκτημα** των άμορφων πλαισίων 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 φωτοβολταϊκα στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την **διάρκεια ζωής** των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.

### 3) Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)



Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκα στοιχεία έχει φθάσει το 16%.

Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Σημαντικότερος κατασκευαστής για φωτοβολταϊκα στοιχεία **CdTe** είναι η **First Solar**. Τροχοπέδη για την 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 στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή **έλλειψη του Τελλουρίου**. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (**BIPV Building Integrated Photovoltaic**).

#### 4) Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)



Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσενικό δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες.

Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταικα στοιχεία **GaAs** είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές **ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators)**. Τα φωτοβολταικα στοιχεία **GaAs** έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για **διαστημικές εφαρμογές**. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

## Κεφαλαίο 6<sup>ο</sup> Νέοι τύποι φωτοβολταϊκών

### Φωτοβολταϊκά παράγουν ρεύμα και το βράδυ

Αμερικανοί και Ελβετοί επιστήμονες, από δύο κορυφαίες Πολυτεχνικές σχολές του κόσμου, δημιούργησαν ένα νέου τύπου φωτοβολταϊκό σύστημα, που μιμείται τη φωτοσύνθεση των φυτών και καταφέρνει να μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε καύσιμο υδρογόνο. Το μηχάνημα χρησιμοποιεί τις ακτίνες του ήλιου και ένα οξείδιο του μετάλλου, τη δημητρία (ceria), για να διασπάσει το διοξείδιο του άνθρακα ή το νερό, παράγοντας καύσιμα που στη συνέχεια μπορούν να... αποθηκευτούν ή να μεταφερθούν αλλού. Τα συμβατικά φωτοβολταϊκά παράγουν μόνο επιτόπιο ηλεκτρισμό και δεν μπορούν να αποδώσουν ρεύμα το βράδυ, όπως υπόσχεται η νέα τεχνική. Οι ερευνητές συγκεντρώνουν το ηλιακό φως σε ένα κύλινδρο επικαλυμμένο με τη δημητρία. Η νέα τεχνολογία αξιοποιεί την φυσική ιδιότητα της τελευταίας να "εκπνέει" οξυγόνο όταν θερμαίνεται και να το "εισπνέει" όταν ψύχεται. Καθώς το διοξείδιο του άνθρακα και/ή το νερό διοχετεύεται στο όχημα (όπως συμβαίνει με την φωτοσύνθεση των φυτών), η δημητρία αμέσως αφαιρεί το οξυγόνο από αυτά καθώς ψύχεται και έτσι, διασπώντας τα, παράγει υδρογόνο και/ή μονοξείδιο του άνθρακα. Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί να τροφοδοτήσει κυψέλες καυσίμου υδρογόνου στα αυτοκίνητα. Εναλλακτικά, ένας συνδυασμός παραγομένου υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία "αερίου σύνθεσης" (syngas), που με τη σειρά του αποτελεί πρώτη ύλη για καύσιμα, όπως η συνθετική βενζίνη. Η πρωτοτυπία της νέας τεχνικής, σύμφωνα με τους εφευρέτες της, έγκειται στην αξιοποίηση της δημητρίας, η οποία, αν και γενικά άγνωστη στο ευρύ κοινό, βρίσκεται σε σχετική αφθονία και θεωρείται το πιο κοινό μέταλλο από αυτά που ανήκουν στην κατηγορία των λεγόμενων "σπάνιων γαιών". Οι ερευνητές ανέφεραν ότι, εκτός από υδρογόνο, με το ίδιο μηχάνημα θα μπορούσε να παραχθεί επίσης μεθάνιο. Προς το παρόν πάντως, έχει δημιουργηθεί μόνο μια πρωτότυπη συσκευή, η οποία είναι ακόμα μη αποδοτική ενεργειακά, καθώς το παραγόμενο καύσιμο αξιοποιεί μόνο το 0,7% έως 0,8% της συλλεγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Η περισσότερη ενέργεια χάνεται μέσω θερμικών απωλειών ή από την αντανάκλαση πίσω στον ουρανό των ηλιακών ακτίνων. Οι επιστήμονες, όμως, αισιοδοξούν ότι μελλοντικά μπορούν να ανεβάσουν στο 19% την αποδοτικότητα του νέου μηχανήματος με μια σειρά από βελτιώσεις (θερμικές μονώσεις κ.α.), οπότε η συσκευή θα είναι εμπορικά βιώσιμη.

## Νέα ηλιακή κυψέλη

Μια νέα ηλιακή κυψέλη, ικανή να αυξήσει την αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών κατά 25%, συγκριτικά με τα συμβατικά πάνελ σιλικόνης, ανέπτυξαν ερευνητές από το πανεπιστήμιο του Κέμπριτζ. Όπως ανακοινώθηκε, οι Βρετανοί ερευνητές ανέπτυξαν μια υβριδική ηλιακή κυψέλη, που μπορεί να μετατρέψει το 44% του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή 25% περισσότερο συγκριτικά με τις συμβατικές ηλιακές κυψέλες. Οι ηλιακές κυψέλες μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια.

Μέσω ημιαγώγιμων υλικών, όπως η σιλικόνη, απορροφούν ενέργεια από τα σωματίδια του φωτός, που ονομάζονται φωτόνια, και τροφοδοτούν τα ηλεκτρόνια για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Το πρόβλημα είναι ότι τα πάνελ σιλικόνης δεν μπορούν να απορροφήσουν όλη την ενέργεια του φωτονίου, με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος να χάνεται. Συνήθως μια ηλιακή κυψέλη παράγει ένα ηλεκτρόνιο για κάθε φωτόνιο που αιχμαλωτίζεται.

## **«Έξυπνα» ρούχα – φορτιστές με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά**

Ρούχα που φορτίζουν ηλεκτρονικές συσκευές, από MP3 και κινητά μέχρι φορητούς υπολογιστές, ανέπτυξαν ερευνητές από το πανεπιστήμιο του Κολοράντο.

Τα «έξυπνα» ρούχα, που όπως υποστηρίζουν οι δημιουργοί τους είναι πολύ άνετα, έχουν ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά και εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια για τη φόρτιση των συσκευών όταν το άτομο που τα φορά βρίσκεται έξω από το σπίτι .

Εκτός του ότι συμβάλλουν στη μείωση της χρήσης μπαταριών, που ρυπαίνουν το περιβάλλον, τα ρούχα φτιάχνονται αποκλειστικά από φυσικά υλικά, όπως το βαμβάκι, που προστατεύουν από τις βλαβερές ακτίνες του ήλιου, ενώ δεν χρησιμοποιούνται υφάσματα που έχουν ως βάση το πετρέλαιο.

Σύμφωνα με την Eulanda Sanders, επικεφαλής του προγράμματος και καθηγήτρια στο τμήμα Εμπορίου του πανεπιστημίου του Κολοράντο, στην αγορά κυκλοφορούν κάποια ρούχα που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, ωστόσο δεν είναι εύκολο να πλυθούν, δεν είναι αισθητικά ωραία και τα φωτοβολταϊκά τους είναι ελαττωματικά.

«Στόχος μας είναι να δημιουργήσουμε φυσικά, άνετα, λειτουργικά ρούχα φορτιστές, που θα έχουν μεγάλη διάρκεια και θα είναι αισθητικά ωραία», επισημαίνουν οι ερευνητές που συμμετέχουν στο project.

Στους παράγοντες που θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο για την επιτυχία των «έξυπνων» ρούχων συγκαταλέγεται το κόστος, το αν τα φωτοβολταϊκά θα είναι εύκαμπτα, αλλά και η θέση που θα τοποθετηθούν έτσι ώστε να απορροφούν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια από τον ήλιο.

**Φωτοβολταϊκά στο διάστημα από δορυφόρο-  
λουλούδι**

Αναζητώντας μοναδικές λύσεις εναλλακτικής ενέργειας, η NASA αποφάσισε να διαθέσει κονδύλια για την ανάπτυξη ενός γιγάντιου δορυφόρου σε σχήμα άνθους, με στόχο τη συλλογή και εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Ο δορυφόρος SPS-ALPHA (Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array) είναι ένας βιομηχανικός\* δορυφόρος που μοιάζει με λουλούδι και έχει σχεδιαστεί για να συλλέγει την ηλιακή ενέργεια και να την “ακτινοβολεί” πίσω στη Γη. Η ιδέα των φωτοβολταϊκών συστοιχιών στο διάστημα μπορεί να ακούγεται εξωπραγματική, αλλά δεν θεωρείται ανεφάρμοστη, σε θεωρητικό τουλάχιστον επίπεδο.

Σε αντίθεση με τα επίγεια φωτοβολταϊκά που σταματούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν ο ήλιος δύει, ένα φωτοβολταϊκό πάνελ στο διάστημα θα ήταν εκτεθημένο στις ακτίνες του ηλίου συνέχεια, χωρίς διαλλείμματα. Επίσης, η έλλειψη ατμόσφαιρας στο διάστημα σημαίνει ότι τίποτα δεν εμποδίζει τις ακτίνες του ηλίου να φτάσουν στα πάνελ. Ως μεγάλο μειονέκτημα μιας τέτοιας φωτοβολταϊκής μονάδας θεωρείται το υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Ένα ακόμα πρόβλημα εντοπίζεται στον υπολογισμό της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που θα παρήγαγε μια τέτοια μονάδα, αλλά και η μεταφορά της προς την Γη, καθώς η ασύρματη αποστολή ενέργειας δεν θεωρείται τελειοποιημένη ως τεχνολογία. Ο άνθρωπος που συνέλαβε την ιδέα, ο Τζον Μανκινς του Artemis Innovation Management Solutions, υποστηρίζει πως ο φωτοβολταϊκός δορυφόρος SPS-ALPHA αντιμετωπίζει όλα τα παραπάνω προβλήματα.

Ενώ η εγκατάσταση μοιάζει με γιγάντιο λουλούδι, χάρη στο σχεδιασμό της, είναι στην πραγματικότητα μια διάταξη ελαφρών, ανεξάρτητων κατόπτρων λεπτού υμενίου (thin-film). Τα κάτοπτρα ανακατευθύνουν το εισερχόμενο ηλιακό φως προς φωτοβολταϊκά κύτταρα τοποθετημένα στην πλευρά του δορυφόρου που “κοιτάει” τον ήλιο.

Όταν ολοκληρωθεί η συλλογή ηλιακής ενέργειας, το μπροστινό μέρος της μονάδας (με μέτωπο προς τη Γη), εξοπλισμένο με πομπούς ενεργειακών μικροκυμάτων, στέλνει την ενέργεια πίσω στη Γη, με τη μορφή ραδιοκυμάτων χαμηλής έντασης. Ο Μανκινς υποστηρίζει πως τέτοια διαστημικά φωτοβολταϊκά θα είχαν τη δυνατότητα να στέλνουν δεκάδες χιλιάδες μεγαβάτ ενέργειας ασύρματα. Εκτιμά επίσης ότι θα μπορούσε να συμπεριστεί το κόστος καθώς ο τρόπος διάταξης επιτυγχάνει συνθήκες μαζικής παραγωγής. Η NASA φαίνεται να δείχνει ενδιαφέρον για το σχέδιο, καθώς διαθέτει χρήματα για την ανάπτυξή του. Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί πρωτότυπα μικρής κλίμακας.

## **Εύκαμπτα φωτοβολταϊκά υψηλής απόδοσης αναπτύσσει πρόγραμμα της ΕΕ**

Το πρόγραμμα ανάπτυξης ενός φωτοβολταϊκού λεπτού υμενίου από σιλικόνη αναπτύσσει το γερμανικό ερευνητικό κέντρο Forschungszentrum Julich. Το πρόγραμμα τελεί υπό την αιγίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και έχει προϋπολογισμό 9,3 εκατ. Ευρώ. Στόχος είναι η δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού διπλής επίστρωσης με λεπτά στρώματα σιλικόνης, πάχους ενός μικρομέτρου και απόδοσης 12%.

Αυτή τη στιγμή τα περισσότερα φωτοβολταϊκά thin-film έχουν απόδοση που κυμαίνεται στο 10%. Παρότι επιτυγχάνουν μικρότερη απόδοση από τα συμβατικά φωτοβολταϊκά σιλικόνης, τα thin-film έχουν μικρότερο κόστος παραγωγής, καθώς απαιτούν λιγότερα υλικά.

Η διπλή επίστρωση θα επιτρέψει επίσης στα φωτοβολταϊκά κύτταρα να απορροφήσουν μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ενέργειας.

Οι ερευνητές πρόκειται να πειραματιστούν με διάφορα νανοϋλικά και οπτικά λειτουργικά επιστρώματα ώστε να διακριβώσουν τον βαθμό απόδοσης που επιτυγχάνουν σε συνδυασμό με το εύκαμπτο στρώμα σιλικόνης.

Το πρόγραμμα θα διαρκέσει ως το Φεβρουάριο του 2015.

Οι φορείς που συμμετέχουν στο πρόγραμμα είναι οι εξής: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Fyzik'alni ustav AV CR V.V.I, Univerza v Ljubljani, CVD Technologies Limited, Universiteit Utrecht, Centre national de la recherche scientifique, Uniresearch BV, Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, Technische Universität Dresden, Oerlikon Solar AG, Technische Universiteit Delft, Malibu GmbH & Co. KG, FAP Forschungs- und Applikationslabor Plasmatechnik GmbH Dresden, Euroglas GmbH, SolarExcel B.V and Singulus Stangl Solar GmbH.



## **Φωτοβολταϊκά με νανοτεχνολογία Made in Greece στο Πρόγραμμα «Ήλιος»**

Σε απορρόφηση νανοφωτοβολταϊκών ελληνικής τεχνολογίας στο πλαίσιο της υλοποίησης του Προγράμματος Ήλιος φιλοδοξούν επιστημονικά κέντρα και ελληνικές εταιρείες που συμμετέχουν στο πρόγραμμα ΝανΟργάνικ.

Όπως αναφέρει το Newsit, το Εργαστήριο Νανοτεχνολογίας του ΑΠΘ αναπτύσσει φωτοβολταϊκά στοιχεία με νανοτεχνολογίες.

Στόχος είναι η μαζική παραγωγή εύκαμπτων φωτοβολταϊκών (thin-film) υψηλής απόδοσης και ικανότητας προσαρμογής σε πλήθος εφαρμογών.

Στην παρούσα φάση αναζητούνται τρόποι μεγιστοποίησης της απόδοσης των εν λόγω φωτοβολταϊκών. Όπως αναφέρει το ρεπορτάζ το πρόγραμμα ΝανΟργάνικ, χρηματοδοτείται από το ΕΣΠΑ.

«Εξοικονομούν περισσότερο χώρο, καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και φυσικούς πόρους, αποκτούν μεγάλες δυνατότητες ευελιξίας στο χώρο, είναι πλήρως ανακυκλώσιμα» ανέφερε στο Newsit ο υπεύθυνος του Εργαστηρίου Νανοτεχνολογίας του ΑΠΘ καθηγητής Στέργιος Λογοθετίδης.

Στο ΝανΟργάνικ συμμετέχουν ακόμα το Τμήμα Χημείας του Πανεπιστήμιου Πατρών, το Ερευνητικό Ινστιτούτο Χημικής Μηχανικής και Χημικών Διεργασιών Υψηλής Θερμοκρασίας του ΙΤΕ από την Πάτρα, η εταιρεία ανάπτυξης καινοτόμων νέων υλικών και συστημάτων Advent και η εταιρεία Πρίσμα Ηλεκτρονικά ABEE.

Ευρύτερος στόχος του ΝανΟργάνικ είναι η δημιουργία μιας πλήρους τεχνολογίας οργανικών ηλεκτρονικών η οποία περιλαμβάνει: α) την ανάπτυξη προηγμένων οργανικών ημιαγωγών, διαφανών ηλεκτροδίων και νανο-δομικών υλικών φραγμού, β) τον συνδυασμό των τεχνολογιών εκτύπωσης και κενού για την ανάπτυξη οργανικών ηλεκτρονικών διατάξεων, τόσο σε σκληρά όσο και σε εύκαμπτα υποστρώματα (π.χ. οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων και οργανικών κυκλωμάτων) και γ) τη συμβατότητα των υλικών και των τεχνικών ανάπτυξης με διαδικασίες ευρείας κλίμακας και χαμηλού κόστους, με στόχο την άμεση εφαρμογή τους σε βιομηχανική κλίμακα για την κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων σε πολυμερικά υποστρώματα.

## **Φωτοβολταϊκά thin-film: υψηλή αποδοτικότητα και αντοχή από αμερικανικές εταιρείες**

Ποσοστό απόδοσης 23,5% κατέγραψαν τα φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου (γαλλίου-αρσενιδίου) της καλιφορνέζικης Alta Devices, ανοίγοντας το δρόμο της εμπορικής εκμετάλλευσης όπως διατείνεται η εταιρεία.

Η Alta Devices δηλώνει πως επικεντρώνεται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία γαλλίου-αρσενιδίου διότι έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υπό υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.

Παρότι τα λεπτά φωτοβολταϊκά γαλλίου-αρσενιδίου έχουν υψηλό κόστος παραγωγής, η Alta Devices υποστηρίζει πως έχει αναπτύξει μια μέθοδο παραγωγής η οποία απαιτεί πολύ λεπτές στρώσεις των υλικών, διατηρώντας το κόστος σε χαμηλά επίπεδα.

Την απόδοση έχει πιστοποιήσει το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ.

Την ίδια στιγμή, ο κατασκευαστής εύκαμπτων φωτοβολταϊκών καδμίου-τελλουριδίου Abound Solar που εδρεύει στο Κολοράντο ξεκινάει την παραγωγή Φ/Β ισχύος 82,8 βατ και απόδοσης 12,2%, η οποία βρίσκεται υπό αξιολόγηση. Η εταιρεία ευελπιστεί ότι θα ξεκινήσει μαζική παραγωγή στο δεύτερο εξάμηνο του 2012.

Τα λεπτά φωτοβολταϊκά διακρίνονται για την ευκαμψία τους η οποία τα καθιστά κατάλληλα για σειρά χρήσεων, όπως πχ η ενσωμάτωσή τους σε κτηριακές υποδομές.

## Τρισδιάστατα φωτοβολταϊκά κάθετης διάταξης – Επαναστατική τεχνολογία του MIT

Η έρευνα για την εκμετάλλευση του ήλιου επικεντρώνεται διεθνώς στη βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυττάρων και στη μείωση του κόστους παραγωγής τους.

Ωστόσο, πολύ μικρή σημασία έχει δοθεί στη μελέτη της διάταξης των κυττάρων τα οποία τοποθετούνται συνήθως σε επίπεδες χερσαίες επιφάνειες και στέγες ή παρακολουθούν την κίνηση του ήλιου καθώς αυτός διασχίζει τον ουράνιο θόλο.

Μια ερευνητική ομάδα του Massachusetts Institute of Technology (MIT) ακολουθεί μια διαφορετική προσέγγιση: την κατασκευή κύβων ή πύργων με κάθετες, τρισδιάστατες διατάξεις φωτοβολταϊκών κυττάρων. Τα πρώτα πειράματα έχουν δείξει πως η απόδοση των εν λόγω φωτοβολταϊκών είναι από δύο έως 20 φορές υψηλότερη εκείνης των επίπεδων φωτοβολταϊκών στην ίδια έκταση.

Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρήθηκαν εκεί όπου οι συνθήκες κάθε άλλο παρά ιδανικές για την εκμετάλλευση του ήλιου μπορούν να χαρακτηριστούν: σε περιοχές απομακρυσμένες από τον ισημερινό, κατά τους χειμερινούς μήνες και σε συννεφιασμένες μέρες. Τα ευρήματα της έρευνας η οποία βασίστηκε τόσο σε μοντελοποίηση όσο και σε πειράματα στο ύπαιθρο δημοσιεύονται στην επιθεώρηση *Energy and Environmental Science*.

“Πιστεύω πως αυτή η προσέγγιση θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μελλοντική εξέλιξη των φωτοβολταϊκών” δηλώνει ο επικεφαλής συγγραφέας της έρευνας, καθηγητής του MIT, Τζέφρυ Γκρόσμαν.

Η έρευνα έδειξε πως το υψηλό κόστος της ενέργειας που παράγεται από τα “τρειςδιάστατα” φωτοβολταϊκά συγκριτικά με τα επίπεδα αντισταθμίζεται μερικώς από την πολύ υψηλότερη απόδοση σε συγκεκριμένη έκταση, όπως επίσης και από τη μικρή διακύμανση στην ηλεκτροπαραγωγή κατά τη διάρκεια της ημέρας ανεξαρτήτως νεφώσεων ή άλλων συνθηκών. Οι βελτιώσεις αυτές καθιστούν την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά περισσότερο προβλέψιμη και ομοιόμορφη, πράγμα που θα μπορούσε να διευκολύνει την ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα ηλεκτρικού ρεύματος.

Αιτία της καλύτερης απόδοσης είναι η ικανότητα των τρισδιάστατων διατάξεων για συλλέγουν υψηλότερες ποσότητες ηλιακού φωτός τις πρώτες πρωινές ώρες, τα απογεύματα και τους χειμερινούς μήνες όταν ο ήλιος βρίσκεται κοντύτερα στον ορίζοντα, σημειώνει ο ερευνητής του MIT Μάρκο Μπερνάντι.

## Επιλογος

Με την ενεργειακή κρίση που έχουμε παγκοσμίως εξαιτίας της μείωσης όλο και περισσότερο των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων, περισσότερο θα στρεφόμαστε σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

Έτσι συνεχώς θα αναπτύσσονται καινούριες τεχνολογίες στις διάφορες πηγές ενέργειας όπως και στα φωτοβολταϊκά.

Μέχρι στιγμής οι επόμενες εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως η κυματική, γεωθερμική, αιολική και βιομάζα δεν έχουν αναπτύξει τεχνολογία κατάλληλη για την άμεση απορρόφηση της ενέργειας που παράγουν και έτσι δημιουργείται περισσότερο ενδιαφέρον στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν και πρέπει να έχουν σημαντικό ρόλο στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, γι' αυτό και θα πρέπει να αποκτήσουν σημαντικό ρόλο στον ενεργειακό εφοδιασμό της Ευρώπης. Παράλληλα όμως θα πρέπει να προωθείται η εξοικονόμηση και η μείωση των απωλειών σε ενέργεια και φυσικούς πόρους.

Τα παραπάνω στοιχεία δόθηκαν για την μελέτη και την γνώση περί των βασικών αρχών των Φωτοβολταϊκών καθώς και την χρήση υλικών και περαιτέρω βελτιώσεων της υπάρχουσας τεχνολογίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων Συγγραφέας: Καπλάνης, Σωκράτης Ν. **Εκδότης: Ίων Έτος Έκδοσης: 2004**

ΗΛΙΑΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ Συγγραφέας: Καπλάνης, Σωκράτης Ν. **Εκδότης: Ίων Έτος Έκδοσης: 2004**

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ** Συγγραφέας: ΚΑΓΚΑΡΑΚΗΣ **Εκδότης: ΣΥΜΜΕΤΡΙ  
Α Έτος Έκδοσης: 1992**

Περιβαλλοντική τεχνική & θεσμικό πλαίσιο εφαρμογής

Συγγραφέας: ΒΟΓΙΑΤΖΗΣ  
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ **Εκδότης: ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ Έτος Έκδοσης: 2010**

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ**

Συγγραφέας: ΠΕΡΔΙΟΣ Δ.ΣΤΑΜΑΤΗΣ **Εκδότης: ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ Έτος  
Έκδοσης:(Γ' ΕΚΔΟΣΗ 2011)**

**ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΕΠΙΘΕΩΡΗΤΕΣ: 530 ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ &  
ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ**

Συγγραφέας: ΠΕΡΔΙΟΣ Δ.ΣΤΑΜΑΤΗΣ **Εκδότης: ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ Έτος  
Έκδοσης: 2010**

**ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ  
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ**

Συγγραφέας: Χριστίνα Κωνσταντινίδου **Εκδότης: ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ Έτος  
Έκδοσης: 2009**

**ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Συγγραφέας: Παπαϊωάννου Γ. Herr H. Harterich  
M. **Εκδότης: Ίων Έτος Έκδοσης: 2009**

Κλιματική αλλαγή, βιώσιμη ανάπτυξη και ανανεώσιμες  
πηγές ενέργειας

Συγγραφέας: ΣΥΛΛΟΓΙΚΟ ΕΡΓΟ **Εκδότης: Ζήτη Έτος  
Έκδοσης: 2009**

- Tomas Markvart, “ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ”,  
Εκδόσεις ΙΩΝ,2003
- Κ. Καγκαράκης. “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ,  
1992
- Martin A. Green. *Solar cells*. Prentice-Hall, 1982
- Βασιλική Περράκη, “Φυσική των φωτοβολταϊκών στοιχείων”, Εκδόσεις  
Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2006
- Ι.Ε Φραγκιαδάκης. “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ,  
2007 Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition
- Green M, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System  
Applications*, Chap. 1,  
  
Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1–12 (1982).
- Pierret R, in Pierret R, Neudeck G (Eds), *Modular Series on Solid State  
Devices, Volume VI:  
Advanced Semiconductor Fundamentals*, Addison-Wesley, Reading, MA  
(1987).
- Sze S, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Edition, John Wiley &  
Sons, Inc., New York,  
NY (1981).
- Boer K, *Survey of Semiconductor Physics: Electrons and Other Particles  
in Bulk Semiconductors*,  
Van Nostrand Reinhold, New York, NY (1990).
- Shur M, *Physics of Semiconductor Devices*, Prentice Hall, Englewood  
Cliffs, NJ (1990).
- Singh J, *Physics of Semiconductors and Their Heterostructures*,  
McGraw-Hill, New York, NY  
(1993).
- Pierret R, *Semiconductor Device Fundamentals*, Chap. 2, Addison-  
Wesley, Reading, MA,  
23–74 (1996).
- Slotboom J, De Graff H, *Solid-State Electron.* **19**, 857–862 (1976).
- Pankove J, *Optical Processes in Semiconductors*, Chap. 3, Dover  
Publications, New York, NY,  
34–81 (1971).
- Sanii F, Giles F, Schwartz R, Gray J, *Solid-State Electron.* **35**, 311–317  
(1992).
- Barnett A, Honsberg C, Kirkpatrick D, *et al ., Proc. 4th World  
Conference on Photovoltaic  
Energy Conversion*, 2560–2564 (2006)

