



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Σχεδιασμός και Λειτουργία Συστημάτων ΑΠΕ

**ΔΙΑΛΕΞΗ 05:
Φωτοβολταϊκά (Φ/Β) Συστήματα Ι**

Δρ. Τριανταφυλλιά Νικολάου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΛΕΞΗΣ

- Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/Β συστημάτων, απόδοση και αποδοτική λειτουργία (σταθερές και μεταβλητές συνθήκες).
- Υλικά κατασκευής Φ/Β διατάξεων
- Φ/Β πλαίσιο και τεχνικά χαρακτηριστικά
- Ανάλυση των ειδικότερων τεχνικών χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκών γεννητριών και τεχνικές σύγκρισης μεταξύ των για τη βέλτιστη επιλογή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των Φ/Β συστημάτων

- Απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και σε πολύ μικρή κλίμακα
- Είναι εύχρηστα. Σε μικρά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν από τους ίδιους τους χρήστες
- Μπορούν να εγκατασταθούν μέσα στις πόλεις και δεν προσβάλλουν αισθητικά το περιβάλλον
- Μπορούν να συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας (υβριδικά συστήματα)
- Μπορούν να επεκταθούν ανά πάσα στιγμή για να αντιμετωπίσουν τις αυξημένες ανάγκες των χρηστών
- Έχουν αθόρυβη λειτουργία και μηδενικές εκπομπές ρύπων
- Οι απαιτήσεις συντήρησης είναι σχεδόν μηδενικές
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία

Τα πλεονεκτήματα των Φ/Β συστημάτων

- **Υψηλή Αξιοπιστία – μεγάλη διάρκεια ζωής:** Η αρχική τους κατασκευή ήταν για χρήση στο διάστημα όπου οι επισκευές είναι δαπανηρές έως ακατόρθωτες. Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες σήμερα τροφοδοτούν με ρεύμα σχεδόν όλους τους δορυφόρους.
- **Μηδενικό κόστος λειτουργίας:** Χρησιμοποιούν το φως του ήλιου για να παράγουν ηλεκτρισμό. Δεν καταναλώνουν πρώτες ύλες.
- **Δεν απαιτείται συντήρηση :** Τα Φωτοβολταϊκά συστήματα δεν έχουν κινούμενα μέρη έτσι δεν χρειάζονται καθόλου συντήρηση κατά την λειτουργία τους.
- **Δεν μολύνουν το περιβάλλον :** Δεν παράγουν υποπροϊόντα ούτε χρειάζονται καύσιμα για να λειτουργήσουν. Επίσης δεν προκαλούν ηχορύπανση αφού η λειτουργία τους είναι εντελώς αθόρυβη. Επίσης κατασκευάζονται από ανακυκλώσιμα υλικά (γυαλί, αλουμίνιο, πυρίτιο) συνεπώς είναι περιβαλλοντικά καθαρά.
- **Ευελιξία:** Τα φωτοβολταϊκά συστήματα τοποθετούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ενέργεια. Σε περίπτωση που οι ανάγκες αυξηθούν πολύ εύκολα το σύστημα αναβαθμίζεται για να καλύψει ενεργειακά την νέα ζήτηση.
- **Αυτονομία:** Παρέχουν πλήρη ενεργειακή αυτονομία. Έτσι μπορούν να τοποθετηθούν σε δύσβατες περιοχές, σε πλωτές εξέδρες και γενικά όπου το δίκτυο της ΔΕΗ είναι οικονομικά ασύμφορο να φτάσει.

Κατηγορίες Φ/Β συστημάτων

- 1) **Διασυνδεδεμένα με το δίκτυο Φ/Β συστήματα:** η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας εφ' όσον υπάρχει διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο
- 2) **Αυτόνομα Φ/Β συστήματα:** μικρά Φ/Β συστήματα σε κεραιές τηλεπικοινωνιακών σταθμών, εξοχικά σπίτια, αντλίες άντλησης νερού, χιονοδρομικά κέντρα, τροχόσπιτα, φάρους, μετεωρολογικούς σταθμούς, υπαίθρια φωτιστικά σώματα, σκάφη και άλλα τα οποία καθίστανται ενεργειακά αυτόνομα
- 3) **Υβριδικά Φ/Β συστήματα:** Όταν τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα συνδυασθούν και με άλλη ανανεώσιμη ή συμβατική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννήτρια, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, κ.λ.π.)

Εφαρμογές Φ/Β συστημάτων

α) Καταναλωτικά προϊόντα (0.001-100Wp) σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο ή σε τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, κλπ., για την εξυπηρέτηση αναγκών φωτισμού και ψύξης και για προϊόντα όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές

β) Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100Wp –200KWp)

- αφαλάτωση / άντληση / καθαρισμό νερού
- φωτισμό (δρόμων, πάρκων, αεροδρομίων)
- συστήματα τηλεπικοινωνιών, τηλεμετρήσεων και συναγερμού
- συστήματα σηματοδότησης (οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας)
- ψύξη (αγροτικών προϊόντων, φαρμάκων κ.λπ.)

γ) Συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο (200 KWp - αρκετά MWp)

- Φ/Β συστήματα μεγέθους έως μερικών εκατοντάδων kWp που τροφοδοτούν κατοικίες ή άλλα κτίρια και όπου η τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια τροφοδοτείται προς το δίκτυο
- Φ/Β σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο

Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- Ένα υλικό ή μία συσκευή που είναι ικανή να μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται στα φωτόνια του φωτός σε ηλεκτρική τάση και ρεύμα ονομάζεται **φωτοβολταϊκό**.
- Τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούν υλικά ημιαγωγών για να μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό.
- Οι ημιαγωγοί δεν είναι ούτε πολύ καλοί, ούτε πολύ κακοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αγωγιμότητα των ημιαγωγών βρίσκεται μεταξύ των δύο άκρων, δηλαδή των αγωγών και των μονωτών.
- Οι πιο καλοί ημιαγωγοί έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Ο πλέον χρησιμοποιούμενος ημιαγωγός, στην πράξη, είναι το πυρίτιο. Άλλοι ημιαγωγοί είναι το γερμάνιο και το αρσενικούχο γάλλιο.
- Το ηλεκτρικό ρεύμα στους ημιαγωγούς οφείλεται τόσο στη ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων (αρνητικών φορτίων), όσο και στη ροή θετικών φορτίων (οπών).

Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- **Ενδογενής Ημιαγωγός**

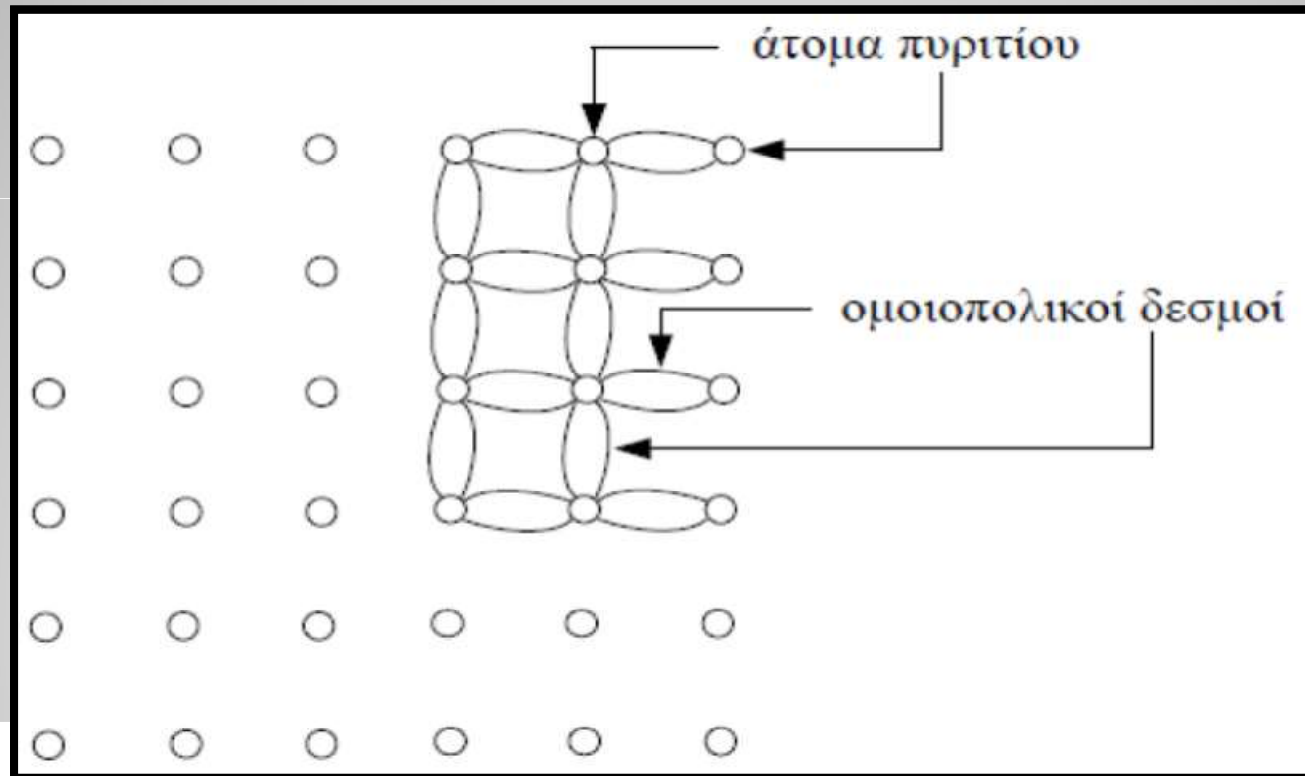
- Η κρυσταλλική δομή ενός ημιαγωγού πυριτίου αποτελείται από μοναδιαίες τετραεδρικές δομές, τα οποία έχουν ένα άτομο πυριτίου σε κάθε κορυφή. Κάθε άτομο πυριτίου σχηματίζει 4 δεσμούς, που λέγονται ομοιοπολικοί δεσμοί, μεταξύ των 4 ηλεκτρονίων σθένους κάθε ατόμου πυριτίου και ηλεκτρονίων γειτονικών ατόμων. Οι ομοιοπολικοί αυτοί δεσμοί προσδίδουν στερεότητα στον κρύσταλλο του πυριτίου.

- Ένας κρύσταλλος πυριτίου είναι ένας ενδογενής ημιαγωγός πυριτίου, αν κάθε άτομο στον κρύσταλλο, είναι άτομο πυριτίου. Δηλαδή, ένας ενδογενής ημιαγωγός πυριτίου, είναι ένας καθαρός ημιαγωγός πυριτίου.

- Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται συμβολικά στις δύο διαστάσεις η κρυσταλλική δομή ενός ενδογενούς ημιαγωγού πυριτίου.

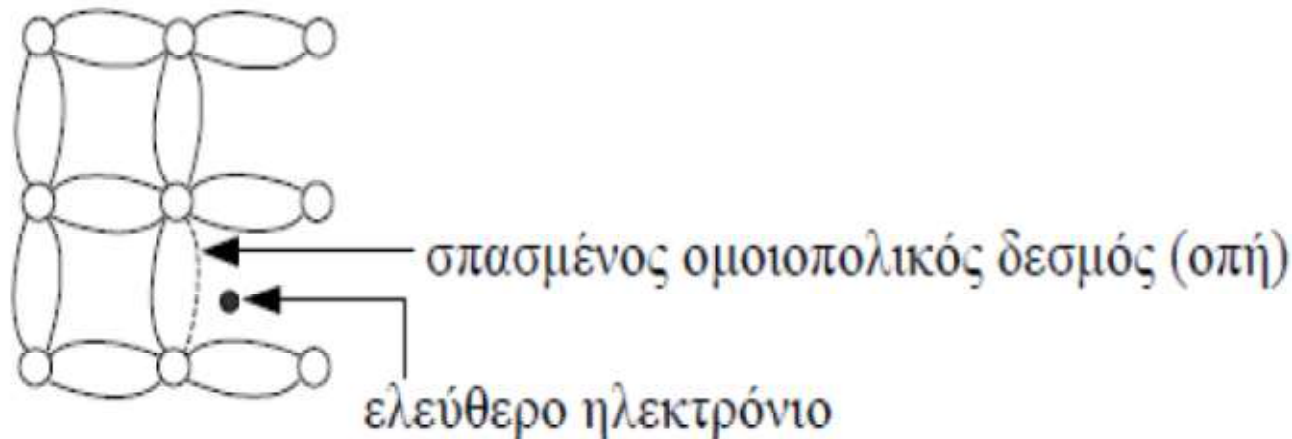
Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται συμβολικά στις δύο διαστάσεις η κρυσταλλική δομή ενός ενδογενούς ημιαγωγού πυριτίου.



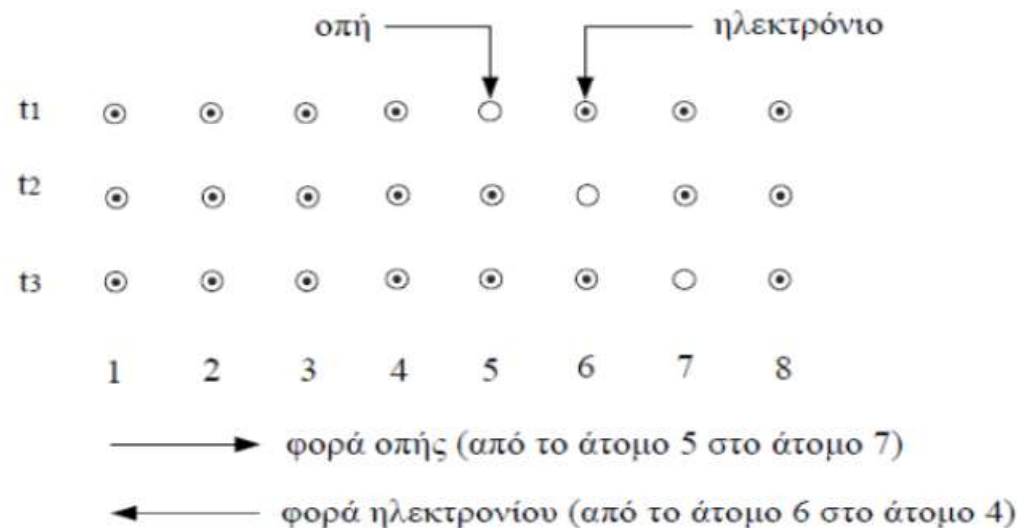
Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με το απόλυτο μηδέν (-273°C), ο κρύσταλλος ενδογενούς πυριτίου συμπεριφέρεται σαν μονωτής, αφού δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος. Για να δημιουργηθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος, θα πρέπει να ελευθερωθούν κάποια ηλεκτρόνια. Προκειμένου να ελευθερωθούν κάποια ηλεκτρόνια, απαιτείται ενέργεια. Μία τέτοια μορφή ενέργειας είναι η θερμότητα, οπότε σε θερμοκρασία δωματίου (27°C) υπάρχει αρκετή ενέργεια, με αποτέλεσμα να σπάσουν κάποιοι από τους ομοιοπολικούς δεσμούς και να απελευθερωθούν κάποια ηλεκτρόνια. Στο παρακάτω Σχήμα φαίνεται συμβολικά στις δύο διαστάσεις η κρυσταλλική δομή ενός ενδογενούς ημιαγωγού πυριτίου, όπου έχει σπάσει ένας ομοιοπολικός δεσμός και έχει δημιουργηθεί ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο.



Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

Η απομάκρυνση του ηλεκτρονίου από τον ομοιοπολικό δεσμό αφήνει ένα κενό, το οποίο ονομάζεται οπή. Η οπή συμπεριφέρεται σαν θετικό φορτίο, επειδή έλκει και συλλαμβάνει οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο βρεθεί κοντά της. Ο τρόπος με τον οποίο η οπή συνεισφέρει στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού παρουσιάζεται με τη βοήθεια του παρακάτω Σχήματος, στο οποίο φαίνεται ότι τη χρονική στιγμή t_1 υπάρχει μία οπή στο πέμπτο άτομο. Στην περίπτωση αυτή είναι σχετικά εύκολο, ένα ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικού ατόμου, έστω του έκτου ατόμου, να εγκαταλείψει τον ομοιοπολικό δεσμό, να γίνει ελεύθερο ηλεκτρόνιο και να συμπληρώσει την οπή του πέμπτου ατόμου. Όταν το ηλεκτρόνιο σθένους του έκτου ατόμου εγκαταλείπει τον ομοιοπολικό δεσμό, δημιουργείται μία οπή στη θέση του, δηλαδή στο έκτο άτομο. Έτσι λοιπόν, τη χρονική στιγμή t_2 η οπή έχει μετακινηθεί στο έκτο άτομο (από το πέμπτο άτομο που ήταν τη χρονική στιγμή t_1) και το ηλεκτρόνιο σθένους έχει μετακινηθεί στο πέμπτο άτομο (από το έκτο άτομο που ήταν τη χρονική στιγμή t_1). Παρόμοια, τη χρονική στιγμή t_3 , η οπή έχει μετακινηθεί στο έβδομο άτομο και το ηλεκτρόνιο σθένους έχει μετακινηθεί στο τέταρτο άτομο. Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η οπή κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση, σε σχέση με το ηλεκτρόνιο σθένους. Η κίνηση των οπών συνιστά τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- Έτσι λοιπόν, στους ημιαγωγούς, η αγωγιμότητα οφείλεται στη ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων (αρνητικών φορτίων) καθώς και στη ροή οπών (θετικών φορτίων).
- Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις.

Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- **Εξωγενής Ημιαγωγός**

- Στη θερμοκρασία δωματίου ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των οπών ενός καθαρού (ενδογενούς) ημιαγωγού δεν είναι αρκετός να προκαλέσει ροή ηλεκτρικού ρεύματος, που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις πρακτικών εφαρμογών.

- Μία μέθοδος αύξησης της αγωγιμότητας του ενδογενούς ημιαγωγού πυριτίου είναι η νόθευση (εμπλουτισμός), δηλαδή η προσθήκη πεντασθενών ή τρισθενών ατόμων, οπότε σχηματίζεται ένας εξωγενής (νοθευμένος) ημιαγωγός πυριτίου τύπου n, ή τύπου p, αντίστοιχα. Ο εξωγενής ημιαγωγός πυριτίου τύπου n προκύπτει με προσθήκη πεντασθενών ατόμων, όπως ο φώσφορος, στον καθαρό κρύσταλλο πυριτίου.

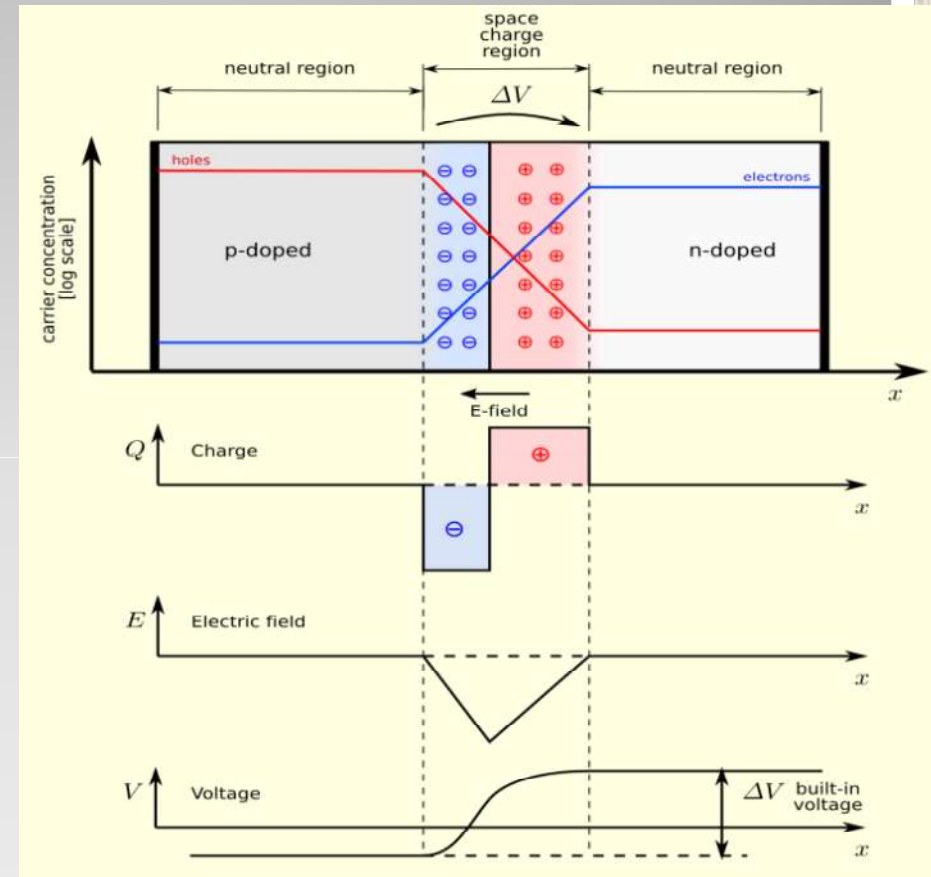
Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- **Επαφή pn**

- Σε μία κοινή ράβδο πυριτίου ορθογωνικής διατομής, το ηλεκτρικό ρεύμα οφείλεται στη ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων, όταν ο ημιαγωγός είναι τύπου n, ή στη ροή οπών, όταν ο ημιαγωγός είναι τύπου p.
- Η ράβδος πυριτίου συμπεριφέρεται σαν μία κοινή αντίσταση, όπου το ρεύμα είναι ανάλογο της τάσης. Αν μία ράβδος πυριτίου εμπλουτιστεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η μισή να είναι τύπου p και η άλλη μισή να είναι τύπου n, τότε σχηματίζεται μία ένωση pn.

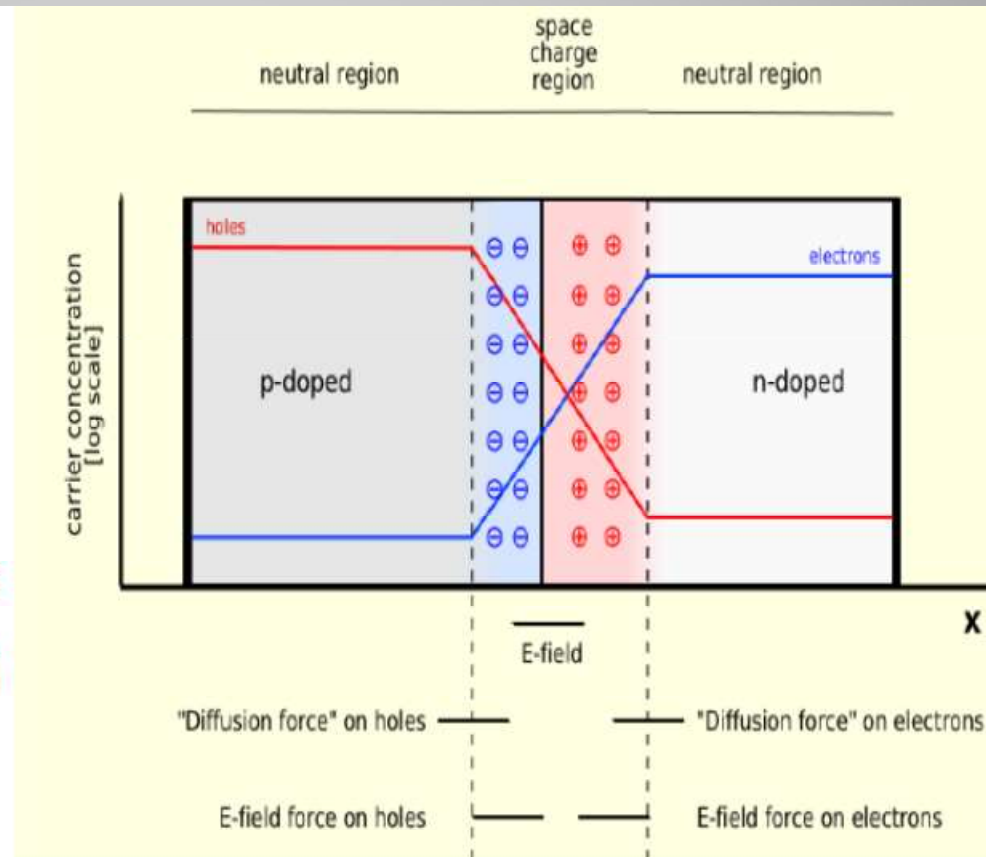
Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- Στο Σχήμα φαίνεται μία επαφή pn, όπου στον ημιαγωγό τύπου p οι οπές είναι φορείς πλειονότητας και απεικονίζονται με το σύμβολο "+", ενώ στον ημιαγωγό τύπου n τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι φορείς πλειονότητας και απεικονίζονται με το σύμβολο "-".
- Το όριο, όπου το υλικό τύπου p συναντά το υλικό τύπου n, ονομάζεται επαφή.



Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

Η ύπαρξη θετικού φορτίου δεξιά της επαφής και εντός της περιοχής απογύμνωσης και η ύπαρξη αρνητικού φορτίου αριστερά της επαφής και εντός της περιοχής απογύμνωσης δημιουργεί μία διαφορά δυναμικού ΔV στην περιοχή απογύμνωσης. Αυτή η διαφορά δυναμικού ονομάζεται φράγμα δυναμικού, επειδή λειτουργεί σαν φράγμα, το οποίο θα πρέπει να ξεπεράσουν οι οπές προκειμένου να διαχυθούν στην περιοχή τύπου n, καθώς και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προκειμένου να διαχυθούν στην περιοχή τύπου p. Σε θερμοκρασία δωματίου, το φράγμα δυναμικού είναι περίπου 0,7 V για την επαφή pn πυριτίου.

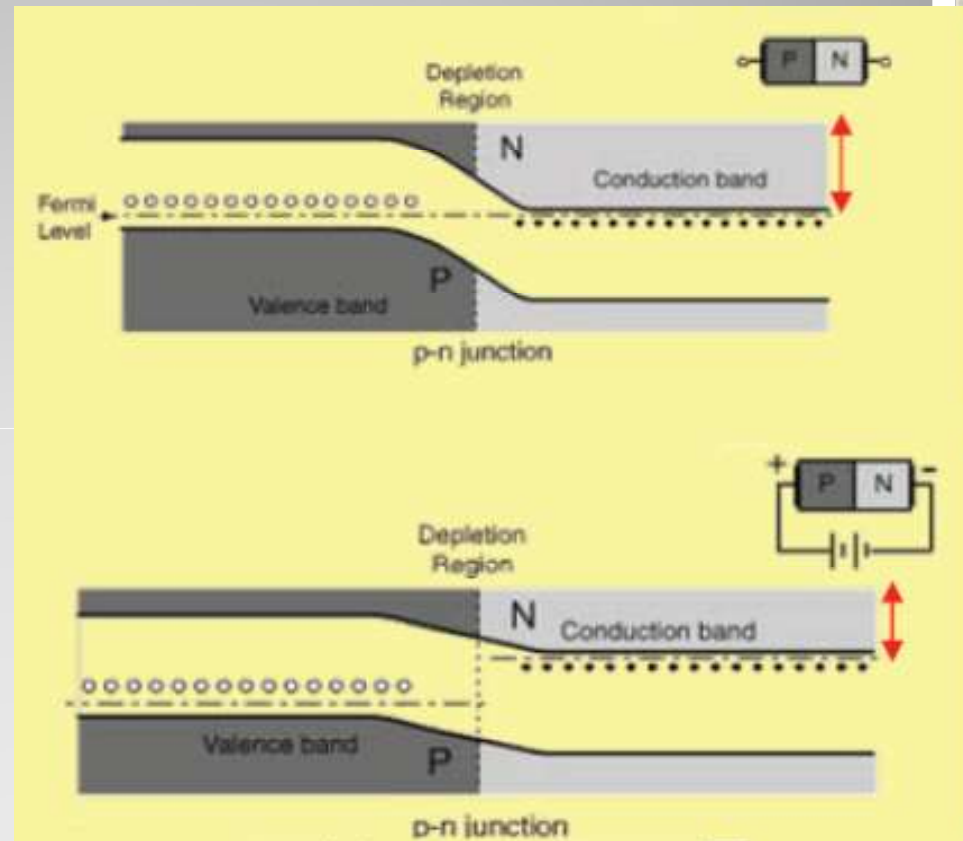


Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- **Ορθή Πόλωση**
- Έστω ότι ο θετικός πόλος μίας εξωτερικής πηγής τάσης E συνδέεται με την περιοχή p της ένωσης pn και ο αρνητικός πόλος της εξωτερικής πηγής τάσης συνδέεται με την περιοχή n της ένωσης pn .
- Η σύνδεση αυτή ονομάζεται ορθή πόλωση της ένωσης pn .
- Η σύνδεση της εξωτερικής πηγής τάσης στο κύκλωμα αναγκάζει τις οπές να κινηθούν από την περιοχή τύπου p προς την επαφή και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν από την περιοχή τύπου n προς την επαφή.
- Οι οπές αυτές εξουδετερώνουν κάποια από τα αρνητικά φορτία της περιοχής απογύμνωσης και επίσης τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια εξουδετερώνουν κάποια από τα θετικά φορτία της περιοχής απογύμνωσης. Έτσι μειώνεται, τόσο το εύρος της περιοχής απογύμνωσης, όσο και η διαφορά δυναμικού ΔV .

Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- Αν η τάση E της εξωτερικής πηγής τάσης είναι μικρότερη από το φράγμα δυναμικού, οι οπές και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δε διαθέτουν αρκετή ενέργεια για να διασχίσουν την περιοχή απογύμνωσης.
- Όταν η τάση E της εξωτερικής πηγής τάσης είναι μεγαλύτερη από το φράγμα δυναμικού, οι οπές και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια καταφέρνουν να διασχίσουν την περιοχή απογύμνωσης και με τον τρόπο αυτό ρέει ένα συνεχές ρεύμα I μέσα στην επαφή pn.
- Όταν αυξάνει η τάση ορθής πόλωσης E , αυξάνει και το συνεχές ρεύμα I που ρέει μέσα στην επαφή pn.



Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- **Ανάστροφη Πόλωση**

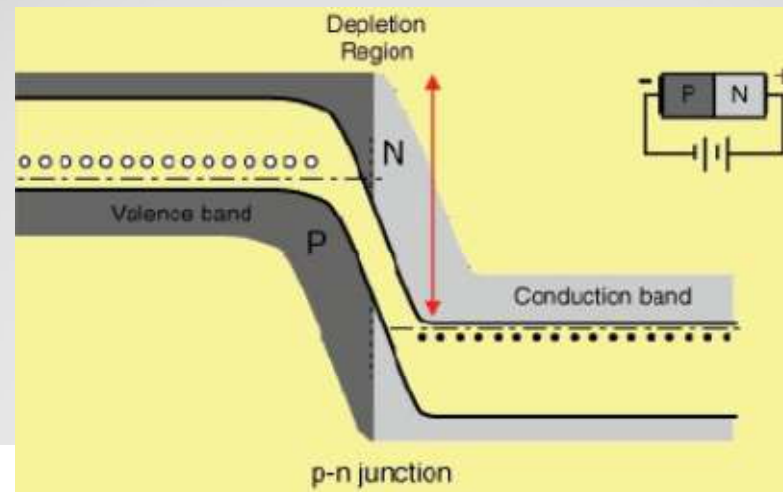
- Έστω ότι ο αρνητικός πόλος μίας εξωτερικής πηγής τάσης E συνδέεται με την περιοχή p της ένωσης pn και ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής τάσης συνδέεται με την περιοχή n της ένωσης pn .
- Η σύνδεση αυτή ονομάζεται ανάστροφη πόλωση της ένωσης pn .
- Η σύνδεση της εξωτερικής πηγής τάσης στο κύκλωμα, αναγκάζει τις οπές και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να απομακρυνθούν από την επαφή. Έτσι αυξάνεται, τόσο το εύρος της περιοχής απογύμνωσης, όσο και η διαφορά δυναμικού ΔV .
- Τελικά, η τάση ΔV στα άκρα της περιοχής απογύμνωσης θα αυξηθεί, μέχρι να γίνει ίση με την τάση ανάστροφης πόλωσης E .
- Διαπιστώνεται ότι υπάρχει αναλογία μεταξύ της περιοχής απογύμνωσης μίας ένωσης pn και ενός πυκνωτή, αφού η χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης φορτίζεται μέχρι η τάση στα άκρα της γίνει ίση με την τάση ανάστροφης πόλωσης.

Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

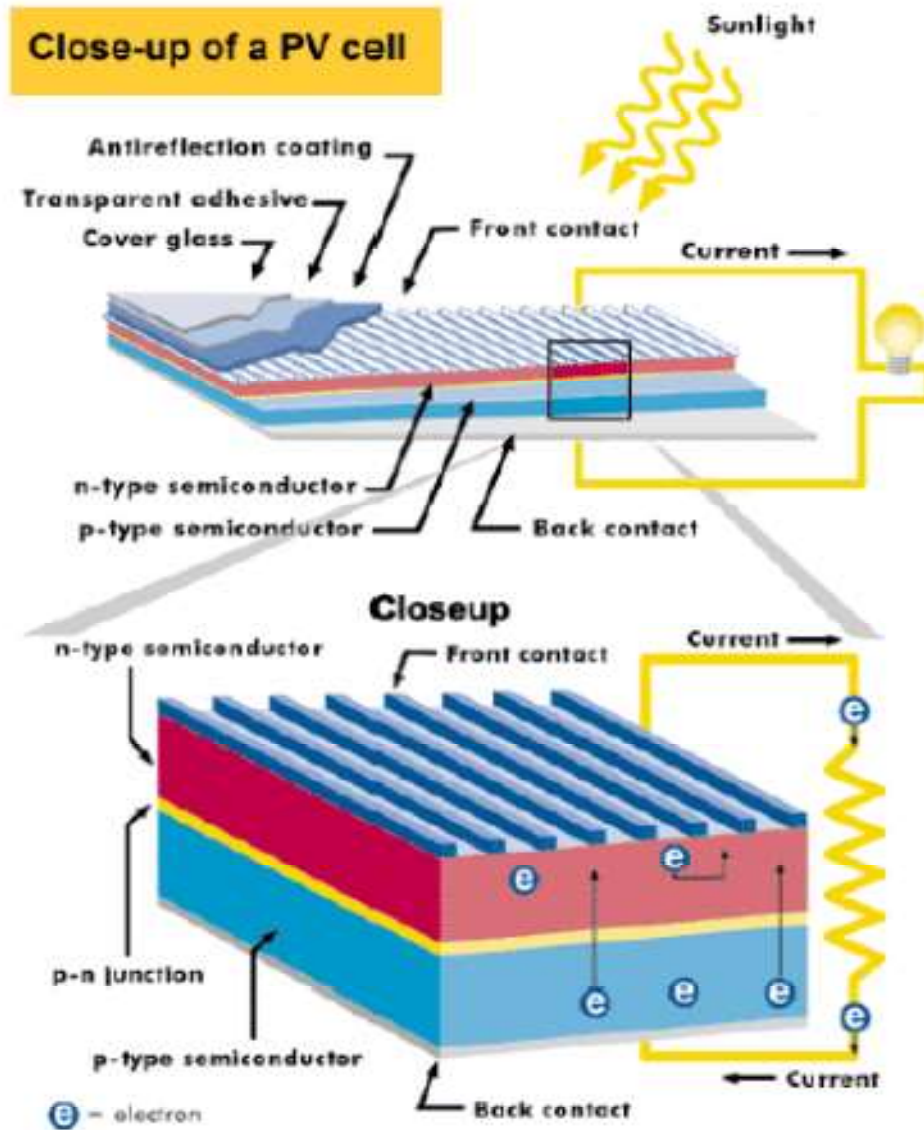
- Όταν η τάση ΔV γίνει ίση με την τάση E , εμποδίζεται η ροή φορέων πλειονότητας στην επαφή, οπότε το ρεύμα των φορέων πλειονότητας μηδενίζεται.
- Στην πραγματικότητα, κατά την ανάστροφη πόλωση μίας ένωσης $p-n$, ρέει ένα πολύ μικρό ρεύμα της τάξης μερικών nA . Αυτό το μικρό ρεύμα ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα και οφείλεται στο ρεύμα των φορέων μειονότητας και στο επιφανειακό ρεύμα διαρροής.
- Το ρεύμα των φορέων μειονότητας ονομάζεται επίσης ρεύμα κόρου και εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός, η αύξηση της θερμοκρασίας δημιουργεί λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια στην περιοχή p και λίγες οπές στην περιοχή n . Οι φορείς αυτοί, είναι φορείς μειονότητας.

Εισαγωγή στους ημιαγωγούς

- Όταν η ένωση pn είναι ανάστροφα πολωμένη, οι φορείς μειονότητας κινούνται προς την επαφή.
- Έτσι δημιουργείται ένα μικρό ρεύμα, το ρεύμα κόρου.
- Το επιφανειακό ρεύμα διαρροής προκαλείται από επιφανειακές προσμείξεις και ατέλειες στην κρυσταλλική δομή της ένωσης pn.
- Το επιφανειακό ρεύμα διαρροής είναι ανάλογο της τάσης ανάστροφης πόλωσης.



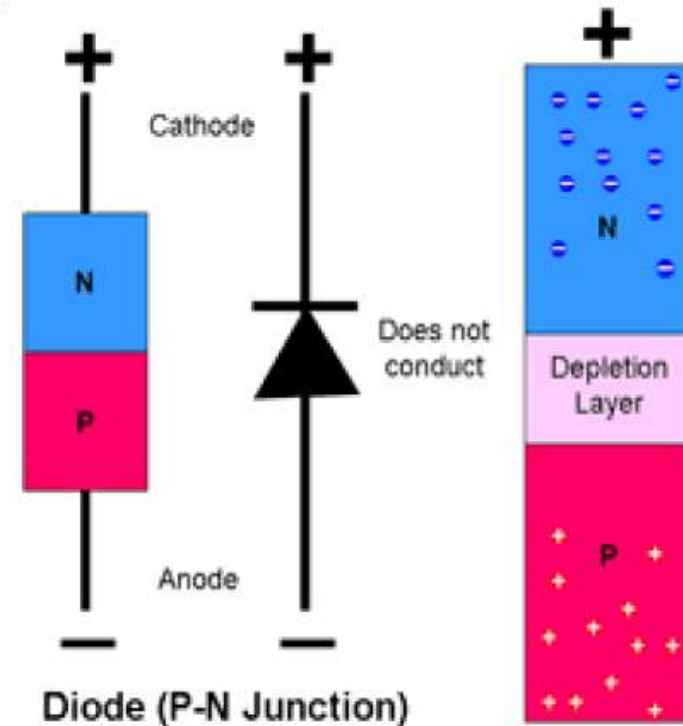
Βασική δομή φ/β



Σχήμα 1: Βασική δομή ενός ηλιακού κελιού

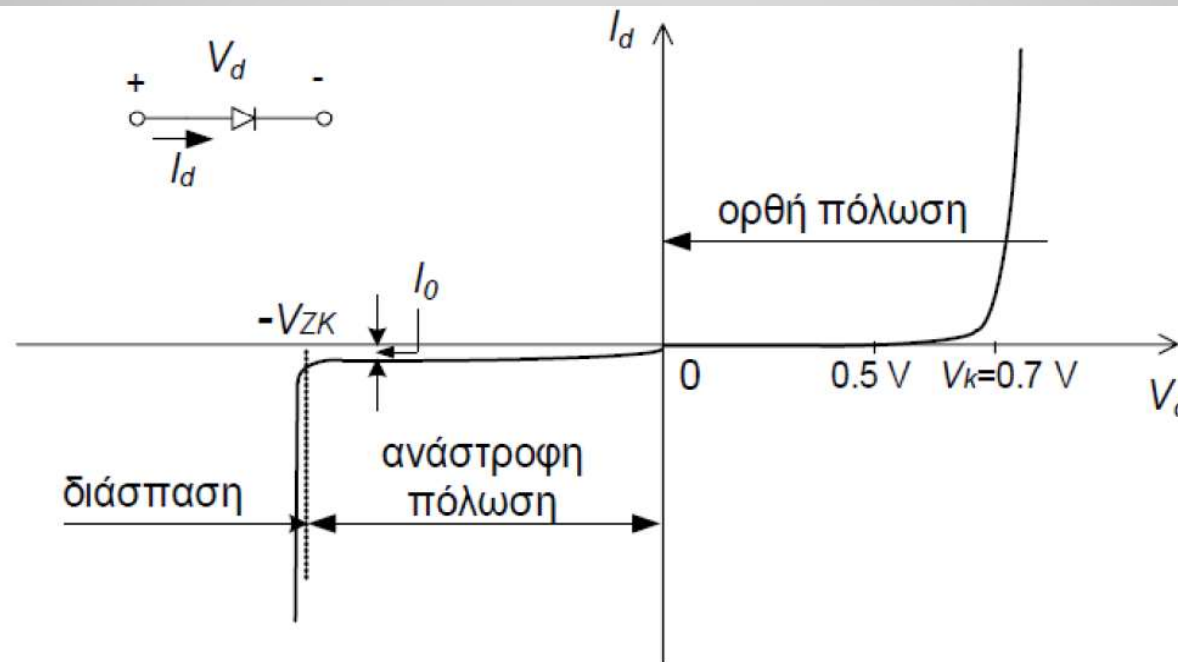
Επαφή p-n

Η επαφή p-n είναι ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών. Η επαφή p-n ονομάζεται δίοδος επειδή συμπεριφέρεται σαν δίοδος του ηλεκτρικού ρεύματος, αφού επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος κατά τη μία φορά. Πράγματι, όταν η δίοδος είναι πολωμένη ορθά, τότε άγει, δηλαδή διέρχεται μέσα από τη δίοδο ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο οφείλεται στη ροή οπών από την περιοχή p προς την περιοχή n καθώς και στη ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων από την περιοχή n προς την περιοχή p. Όταν η δίοδος είναι πολωμένη ανάστροφα, τότε πρακτικά δεν άγει, καθώς διέρχεται μέσα από τη δίοδο ένα πολύ μικρό ρεύμα (της τάξης των μερικών nA), το οποίο ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα. Το βέλος που υπάρχει στο σύμβολο της διόδου δείχνει τη φορά του ρεύματος i , που διέρχεται μέσα από τη δίοδο, όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη.



Επαφή p-n

- Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή της χαρακτηριστικής ρεύματος - τάσης $I_d - V_d$ της διόδου πυριτίου. Οι άξονες δεν είναι υπό κλίμακα, προκειμένου να φανούν καλύτερα οι λεπτομέρειες της χαρακτηριστικής ρεύματος - τάσης ($I_d - V_d$). Στο Σχήμα φαίνεται επίσης το σύμβολο της διόδου, η τάση V_d μεταξύ των ακροδεκτών της και το ρεύμα I_d που τη διαρρέει.



Χαρακτηριστική διόδου

Η διάδος λειτουργεί στην περιοχή ορθής πόλωσης, όταν η τάση μεταξύ των ακροδεκτών της είναι θετική ($V_d > 0$). Στην περιοχή ορθής πόλωσης, η I_d - V_d χαρακτηριστική της διόδου προσεγγίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια από τη σχέση:

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad \text{ή} \quad I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

όπου I_d είναι το ρεύμα της διόδου (σε A) κατά τη φορά του βέλους της διόδου, V_d είναι η τάση στα άκρα της διόδου (σε V), I_0 είναι το ρεύμα κόρου (σε A), q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C), k είναι η σταθερά Boltzmann ($k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J / °K), T είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin (°K), και V_T είναι η θερμική τάση, η οποία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q} \simeq \frac{T}{11600}$$

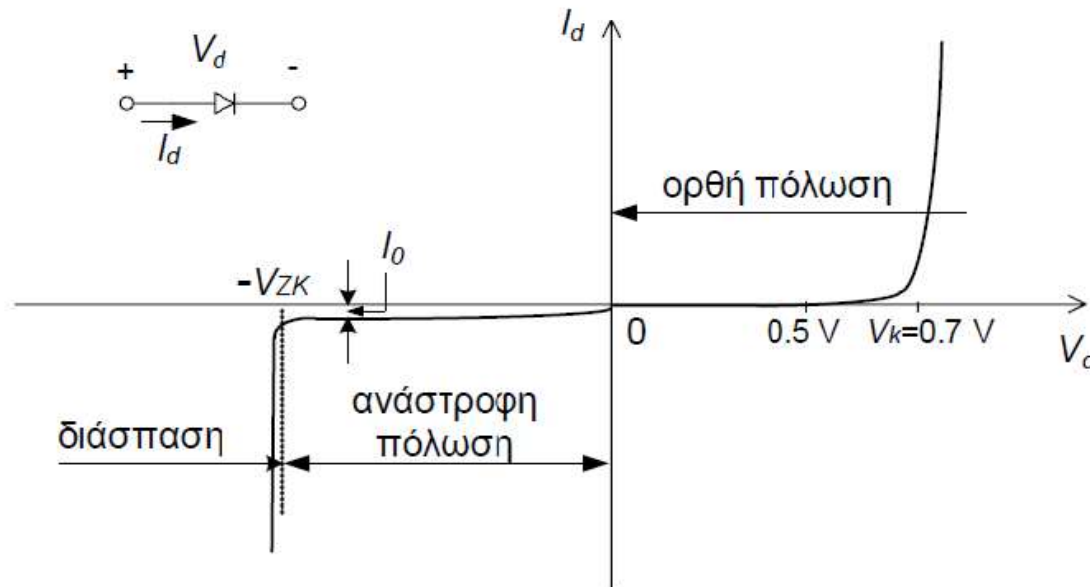
Σε θερμοκρασία δωματίου 20 °C ή $T = 293$ °K, η θερμική τάση V_T είναι περίπου 25 mV.

Χαρακτηριστική διόδου

Εκτός από τη θερμική τάση V_T , και το ρεύμα κόρου I_0 εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Γενικά, **το ρεύμα κόρου I_0 διπλασιάζεται κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνει κατά 5°C** . Παρατηρώντας τη χαρακτηριστική της διόδου, διαπιστώνεται ότι όταν η τάση στα άκρα της διόδου V_D είναι μικρότερη από 0.5 V , το ρεύμα της διόδου είναι υπερβολικά μικρό. Η τιμή των 0.5 V ονομάζεται τάση έναρξης αγωγής της διόδου. Για τάσεις μεταξύ 0.6 και 0.8 V , η διόδος άγει και το ρεύμα που τη διαρρέει αυξάνει ταχύτατα. Γενικά, θεωρείται ότι η τάση των 0.7 V διακρίνει τα μικρά από τα μεγάλα ρεύματα ορθής πόλωσης, για αυτό η τάση των 0.7 V ονομάζεται τάση κατωφλίου V_k . Η τάση κατωφλίου είναι περίπου ίση με το φράγμα δυναμικού. Γενικά, **η τάση κατωφλίου ελαττώνεται κατά περίπου 2 mV , για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C** . Επειδή για τάσεις μεταξύ 0.6 V και 0.8 V το ρεύμα της διόδου αυξάνει ταχύτατα, θα πρέπει να σχεδιάζεται με προσοχή το εξωτερικό κύκλωμα της διόδου, έτσι ώστε να περιορίζει σε επιθυμητές τιμές το ρεύμα ορθής πόλωσης που διαρρέει τη διόδο, όταν αυτή άγει. Αν το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα ορθής πόλωσης της διόδου υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή, που ονομάζεται περιορισμός ισχύος, τότε η διόδος καταστρέφεται.

Ανάστροφη πόλωση

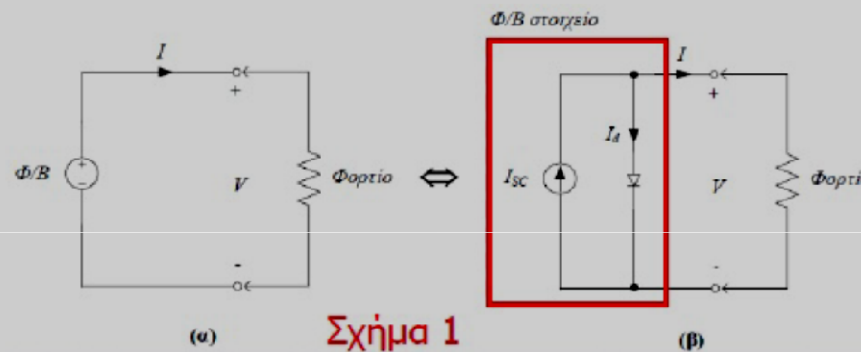
Η διόδος λειτουργεί στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης όταν η τάση μεταξύ των ακροδεκτών της είναι αρνητική και ταυτόχρονα η απόλυτη τιμή της τάσης ακροδεκτών της δεν ξεπερνά την τάση διάσπασης ($-V_{ZK} < V_d < 0$). Στην ανάστροφη πόλωση ισχύει ότι $V_d < 0$ και επιπλέον επειδή η απόλυτη τιμή της είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη θερμική τάση V_T , ο όρος $e^{\frac{V_d}{V_T}}$ τείνει στο μηδέν, οπότε από τη σχέση (1) προκύπτει ότι το ρεύμα της διόδου κατά την ανάστροφη πόλωση δίνεται από τη σχέση: $I_D = -I_0$. Δηλαδή το ανάστροφο ρεύμα (ρεύμα κατά την ανάστροφη πόλωση) είναι αρνητικό και περίπου ίσο με το ρεύμα κόρου. Το ανάστροφο ρεύμα εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, το ανάστροφο ρεύμα διπλασιάζεται κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνει κατά 10°C .



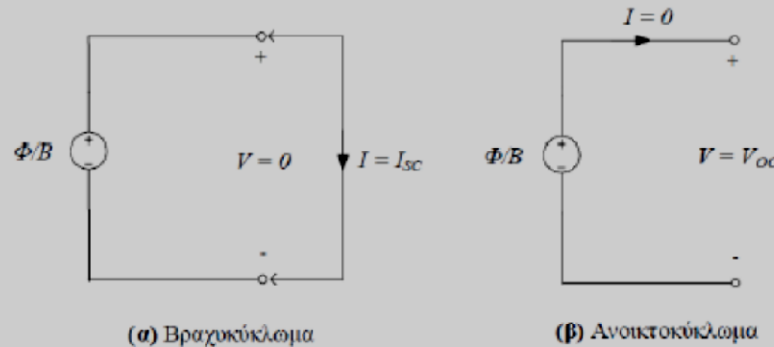
Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Απλό Ισοδύναμο Κύκλωμα

Ένα απλό ισοδύναμο μοντέλο κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται από μία πραγματική δίοδο παράλληλα με μία ιδανική πηγή ρεύματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η ιδανική πηγή ρεύματος δίνει ρεύμα ανάλογο της ηλιακής έντασης στην οποία εκτίθεται το φωτοβολταϊκό (φ/β) στοιχείο. Υπάρχουν δύο συνθήκες με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το πραγματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, οι συνθήκες αυτές είναι: (α) το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} που ρέει όταν οι ακροδέκτες είναι βραχυκυκλωμένοι, και (β) η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} μεταξύ των ακροδεκτών όταν τα άκρα μένουν ανοικτά.



(α) φωτοβολταϊκό στοιχείο τροφοδοτεί φορτίο. (β) απλό ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου που αποτελείται από πηγή ρεύματος παράλληλα με πραγματική δίοδο.



Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} ενός φ/β στοιχείου.

Όταν βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες του ισοδύναμου κυκλώματος του φ/β στοιχείου, η πραγματική διάδος δε διαρρέεται από ρεύμα αφού $V = 0$, οπότε όλο το ρεύμα της ιδανικής πηγής ρεύματος ρέει μέσα από τους βραχυκυκλωμένους ακροδέκτες I_{SC} . Επειδή αυτό το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα πρέπει να είναι ίσο με I_{SC} , προκύπτει το μέτρο του ρεύματος της ιδανικής πηγής ρεύματος θα πρέπει να είναι ίσο με I_{SC} . Τώρα μπορούμε να διατυπώσουμε σχέσεις για τον υπολογισμό του ρεύματος και της τάσης του ισοδύναμου κυκλώματος του φ/β στοιχείου του Σχήματος 1(β). Από το νόμο ρευμάτων Kirchhoff στο κύκλωμα του Σχήματος 1(β) έχουμε:

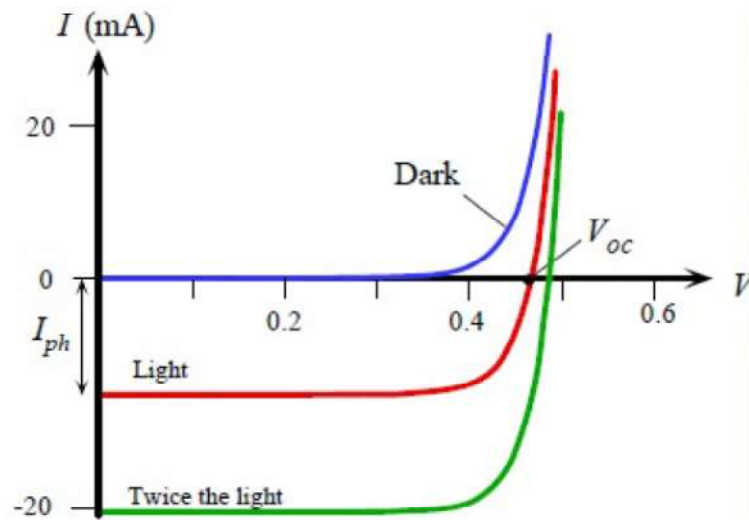
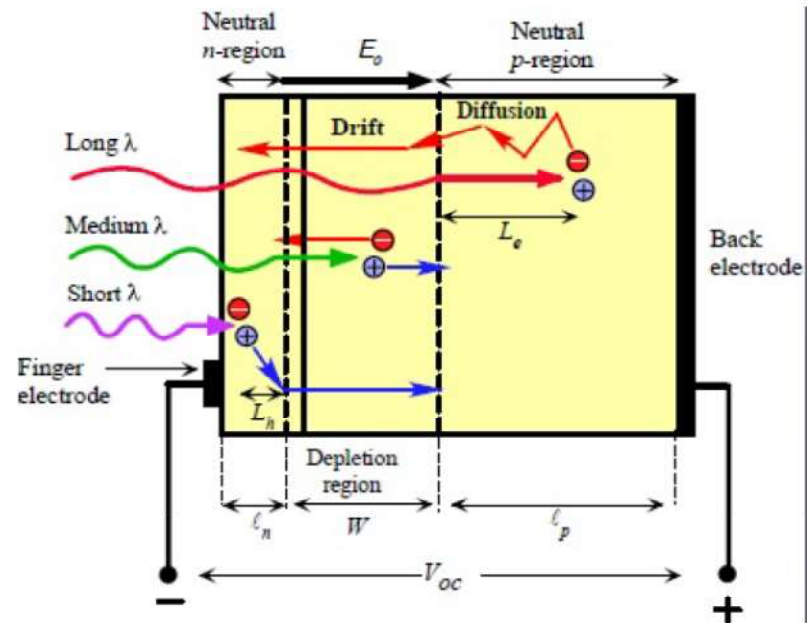
$$I = I_{SC} - I_d \quad \longrightarrow \quad I = I_{SC} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T}} - 1 \right)$$

Εάν $I_0 = 0$ τότε θα έχουμε:

$$0 = I_{SC} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad \longrightarrow \quad \boxed{I_{SC} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T}} - 1 \right)} \quad \rightarrow \quad \frac{I_{SC}}{I_0} + 1 = e^{\frac{q \cdot V_{OC}}{k \cdot T}} \quad \rightarrow$$

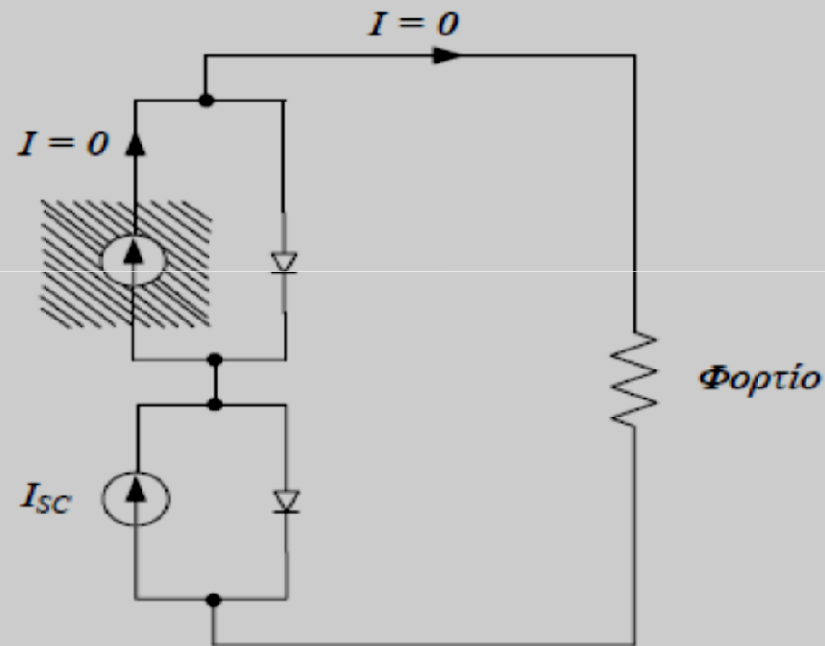
$$\boxed{V_{OC} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right)}$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} είναι ανάλογο της ηλιακής έντασης.



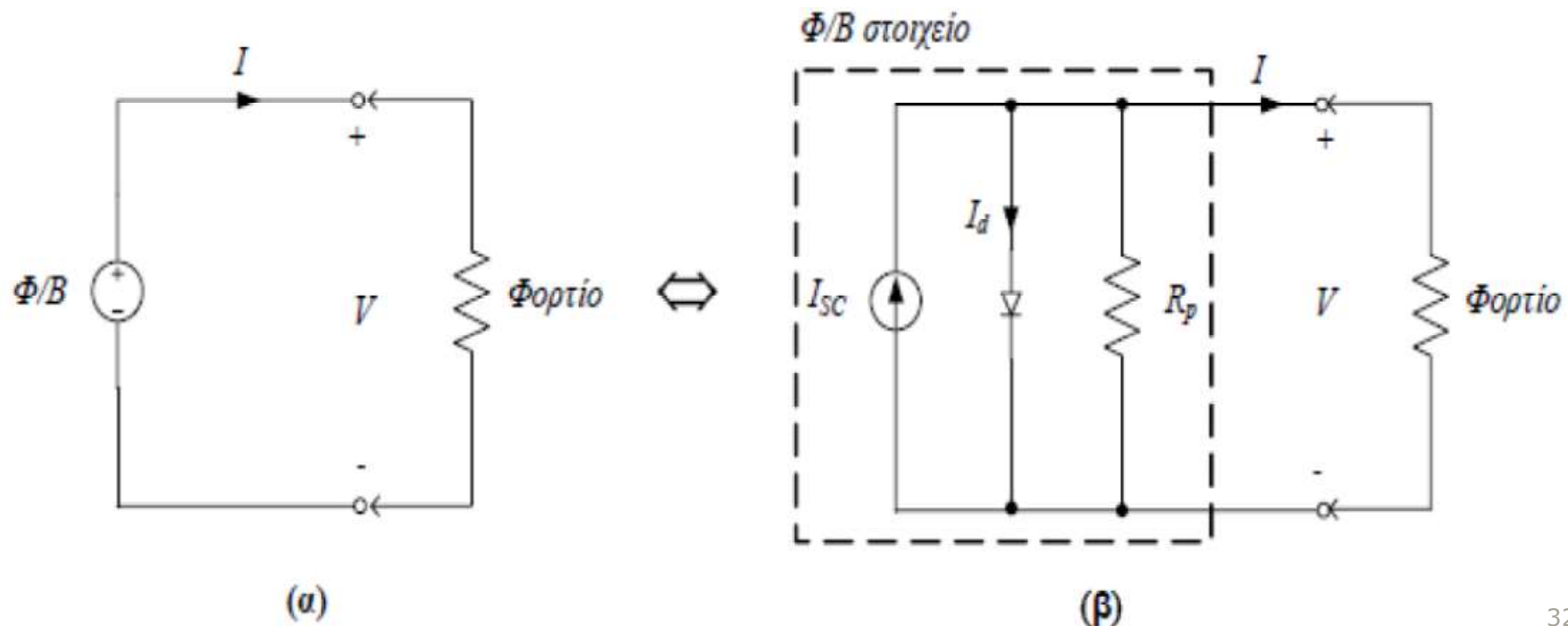
Ακριβέστερο Ισοδύναμο Κύκλωμα

Υπάρχουν φορές που χρειάζεται ένα ακριβέστερο ισοδύναμο μοντέλο κυκλώματος για το φωτοβολταϊκό στοιχείο, σε σχέση με το απλό κύκλωμα του προηγούμενου Σχήματος 1. Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί η επίδραση της σκίασης σε μία σειρά φ/β στοιχείων που συνδέονται στη σειρά, όπως στο παράδειγμα του παρακάτω σχήματος όπου συνδέονται στη σειρά δύο φ/β στοιχεία. Αν είναι υπό σκιά ένα οποιοδήποτε από τα φ/β στοιχεία που είναι συνδεδεμένα στη σειρά, τότε το φ/β αυτό στοιχείο δεν παράγει ρεύμα.



Στο απλό ισοδύναμο κύκλωμα για το ϕ/β στοιχείο (Σχήμα 1) το ρεύμα μέσα από την πηγή ρεύματος αυτού του ϕ/β στοιχείου είναι μηδέν και η δίοδος του είναι ανάστροφα πολωμένη οπότε δε διαρρέεται από ρεύμα (εκτός από ένα μικρό ρεύμα κόρου). Αυτό σημαίνει ότι το απλό ισοδύναμο κύκλωμα δείχνει ότι δεν θα παραδοθεί ισχύς στο φορτίο αν ένα οποιοδήποτε από τα ϕ/β στοιχεία είναι υπό σκιά. Παρόλο που αληθεύει ότι τα ϕ/β στοιχεία είναι πολύ ευαίσθητα στη σκίαση, στην πραγματικότητα η κατάσταση δεν είναι τόσο άσχημη. Έτσι, υπάρχει ανάγκη για ένα ακριβέστερο κύκλωμα μοντέλο ϕ/β στοιχείου προκειμένου να μπορούμε να μοντελοποιούμε ρεαλιστικά προβλήματα όπως αυτό της σκίασης του ϕ/β στοιχείου.

Το παρακάτω Σχήμα 2 δείχνει ένα ακριβέστερο μοντέλο κυκλώματος του ϕ/β στοιχείου, το οποίο μοντέλο περιέχει μία παράλληλη αντίσταση διαρροής R_p . Η ιδανική πηγή ρεύματος I_{SC} στην περίπτωση αυτή δίνει ρεύμα στη δίοδο, την παράλληλη αντίσταση, και το φορτίο:



$$I = (I_{SC} - I_d) - \frac{V}{R_p}$$

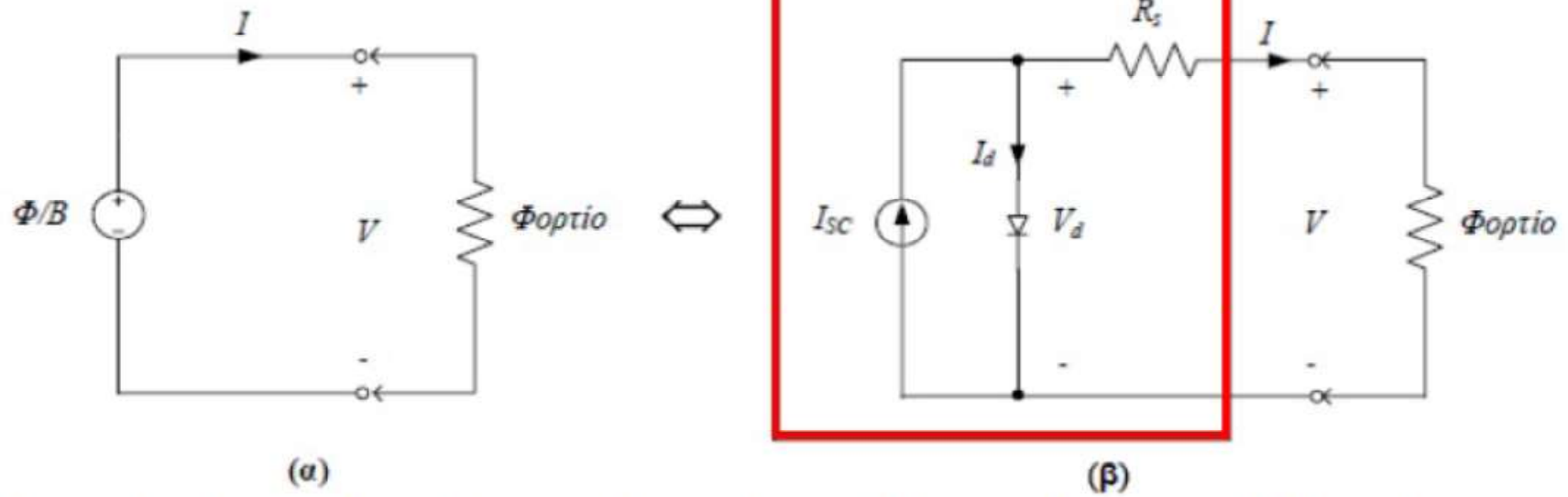
Ο όρος μέσα στην παρένθεση της σχέσης είναι το ίδιο ρεύμα με αυτό που είχαμε για το απλό μοντέλο του Σχήματος 1.

Έτσι, η σχέση αυτή μας λέει ότι σε κάθε δοσμένη τάση, η παράλληλη αντίσταση διαρροής προκαλεί μείωση στο ρεύμα φορτίου για το ιδανικό μοντέλο ίση με $\frac{V}{R_p}$

Για να έχει ένα φ/β στοιχείο απώλειες μικρότερες από 1% λόγω της παράλληλης αντίστασης διαρροής, η R_p θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από:

$$R_p > \frac{100 \cdot V_{oc}}{I_{sc}}$$

Σχήμα 3



Στο απλό κυκλωματικό μοντέλο του φ/β στοιχείου του Σχήματος 1 έχει προστεθεί μία αντίσταση σειράς R_s .

Ένα ακόμα καλύτερο ισοδύναμο μοντέλο θα περιέχει εκτός από την παράλληλη αντίσταση R_p και μία αντίσταση σειράς R_s . Πριν αναλύσουμε αυτό το μοντέλο, ας θεωρήσουμε το μοντέλο κυκλώματος του Σχήματος 3 όπου σε σχέση με το απλό μοντέλο του Σχήματος 1 έχει προστεθεί μία αντίσταση σειράς R_s . Η αντίσταση σειράς R_s οφείλεται στην αντίσταση μεταξύ του φ/β στοιχείου και των ακροδεκτών του καθώς και στην αντίσταση του ημιαγωγού (υλικού κατασκευής του φ/β στοιχείου). Από το Σχήμα 3 έχουμε:

$$I = I_{SC} - I_d \rightarrow I = I_{SC} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T}} - 1 \right)$$

Η επίδραση της αντίστασης σειράς R_s περιγράφεται από τη σχέση:

$$V_d = V + I \cdot R_s$$

Άρα από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

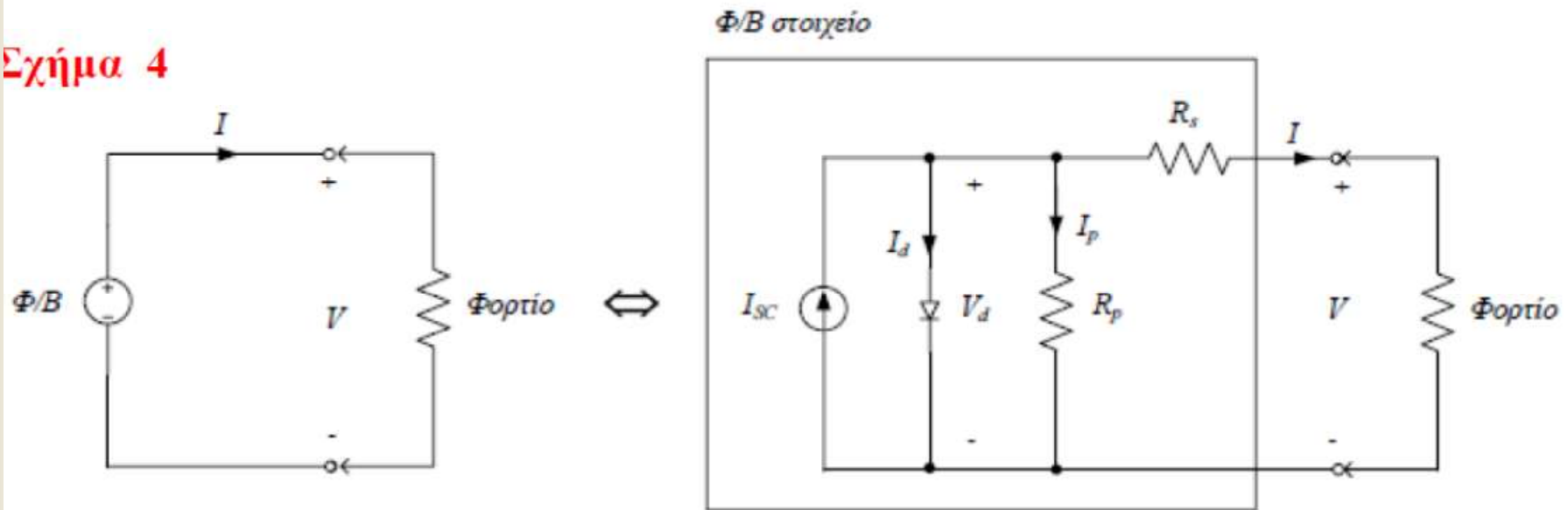
$$I = I_{SC} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{k \cdot T}} - 1 \right)$$

Για να έχει ένα φ/β στοιχείο απώλειες μικρότερες από 1% λόγω της αντίστασης σειράς, η R_s θα πρέπει να είναι μικρότερη από:

$$R_s < \frac{0,01 \cdot V_{OC}}{I_{SC}}$$

Για ένα μεγάλο φ/β στοιχείο, το I_{SC} είναι περίπου 7 A και η V_{OC} είναι περίπου 0.6 V, οπότε η αντίσταση σειράς θα πρέπει να είναι μικρότερη από περίπου 0.0009 Ω.

Σχήμα 4



$$I = I_{SC} - I_d - I_p \Rightarrow$$

$$I = I_{SC} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p}$$

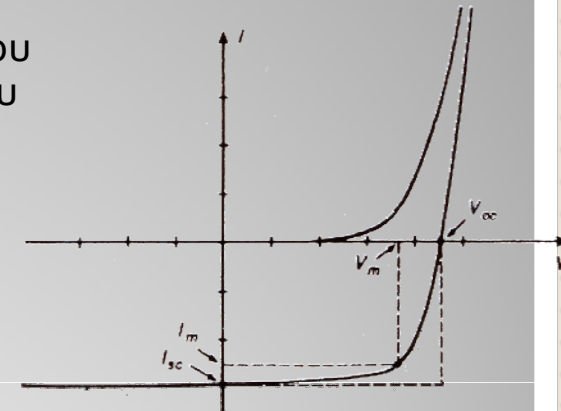
$$I = I_{SC} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{kT}} - 1 \right) - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \right)$$

Ο συντελεστής πλήρωσης & ο βαθμός απόδοσης

Συντελεστής πλήρωσης FF

- ο FF δίνεται από το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V του στοιχείου, σε συνθήκες ακτινοβολίας, προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές I_{sc} και V_{oc}

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$



- Συντελεστής απόδοσης στοιχείων (η):

$$\eta = \frac{P_m}{HA} = \frac{I_m V_m}{HA} = \frac{FF \cdot I_a V_{oc}}{HA}$$

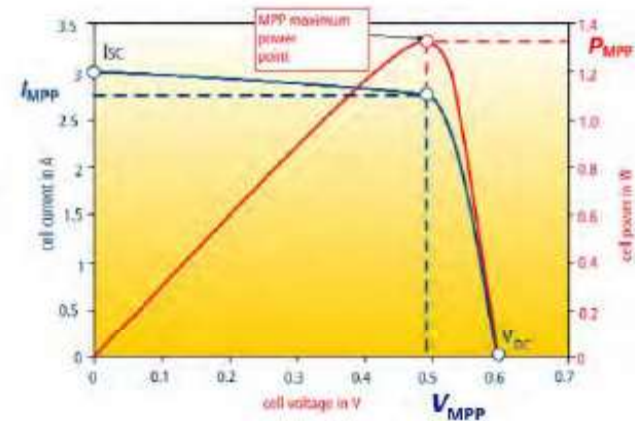
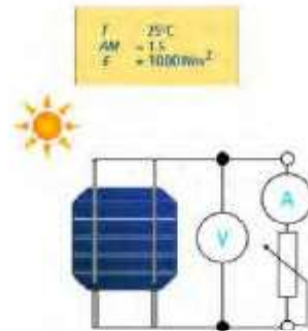
όπου H είναι η ένταση της ακτινοβολίας (W/m^2) που δέχεται η επιφάνεια του Φ/B εμβαδού A (m^2)

- Στην ηλιακή ακτινοβολία, τα $2/3$ των φωτονίων έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου ($1,1eV$). Επίσης, η V_m των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίση με το $1/3$ της E_m της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως βρίσκουμε ότι η θεωρητική απόδοση των ηλιακών Φ/B πυριτίου είναι περίπου:

$$\eta = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} = 22\%$$

Η αποδοτική λειτουργία των Φ/Β στοιχείων – σε σταθερές συνθήκες

- Η τάση των Φ/Β μεταβάλλεται ριζικά (και μη γραμμικά) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή
- Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές. Παράλληλα, μεταβάλλεται ομαλά και η ισχύς που παράγει το στοιχείο, με μέγιστη P_m σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και έντασης I_m , που καθορίζει, σε σχέση με το ζεύγος τιμών V_{oc} και I_{sc} , το συντελεστή απόδοσης του στοιχείου (η)

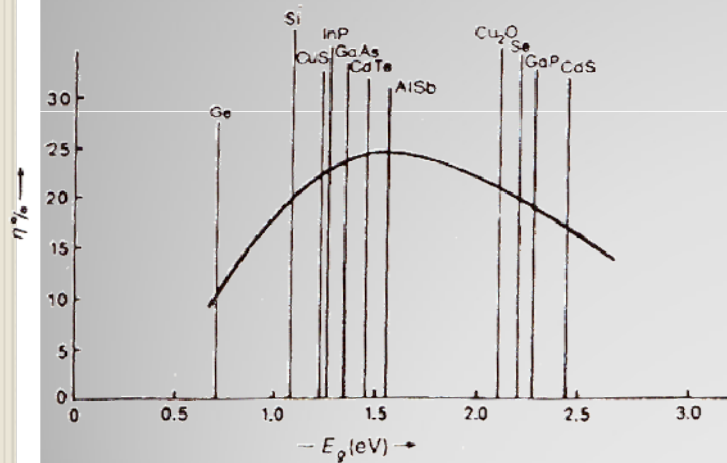


Σχήμα 8: Καμπύλες I-V και P-V ενός ηλιακού κελιού

Χαρακτηριστικά μεγέθη αποτελούν:

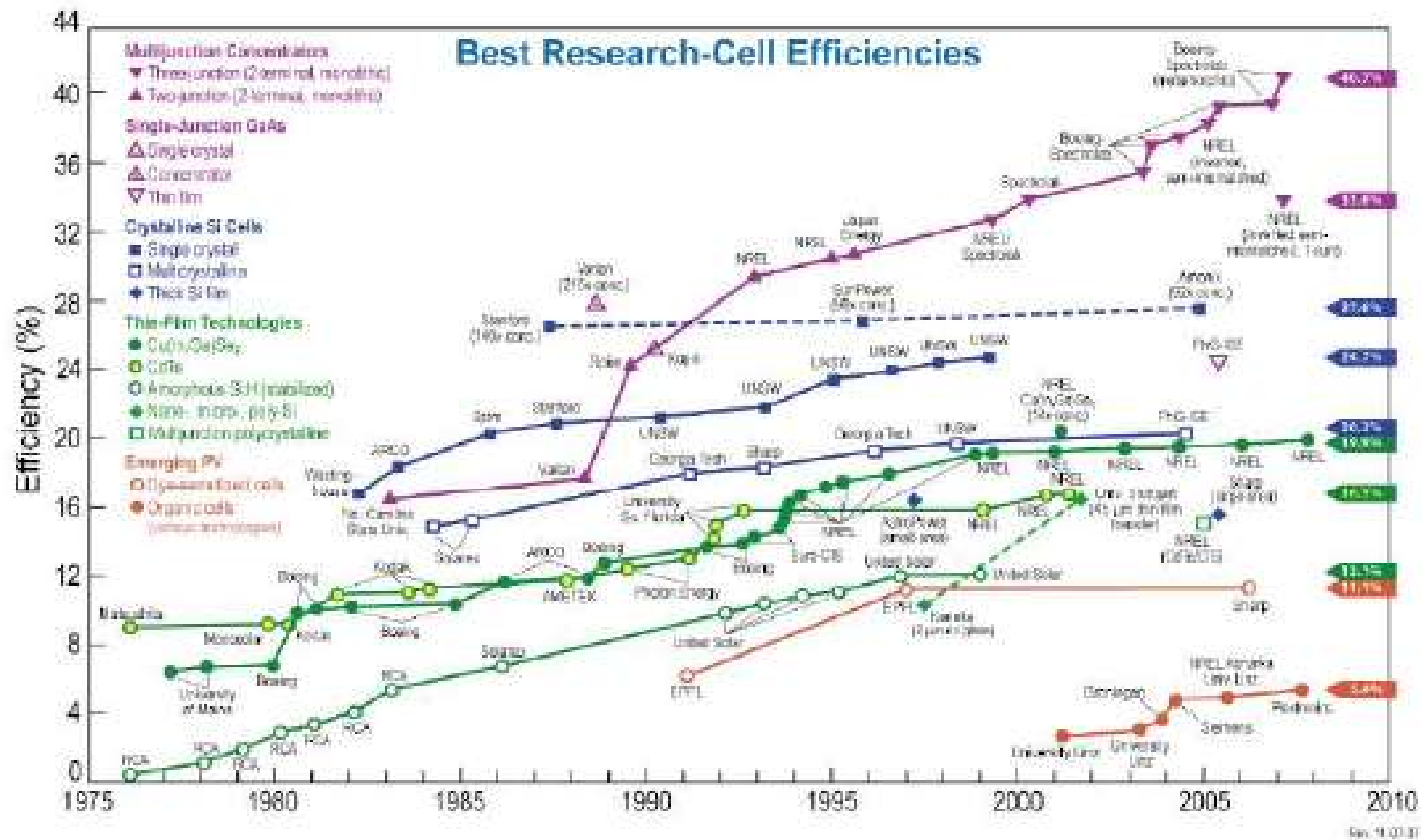
- Η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} : είναι η τάση που επικρατεί στην έξοδο ενός ηλιακού κελιού όταν τα δύο άκρα του είναι ανοικτά
- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης: I_{sc} : είναι το ρεύμα που διαρρέει το ηλιακό κελί όταν τα δύο άκρα του βραχυκυκλωθούν.
- Η μέγιστη ισχύς του κελιού P_{mpp} (maximum power point): είναι η μέγιστη ισχύς του ηλιακού κελιού που αντιστοιχεί σε τάση V_{mpp} και ένταση I_{mpp} .

Αξιολόγηση των ημιαγωγών για ηλιακές Φ/Β εφαρμογές



ΥΛΙΚΟ	ΤΥΠΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	Μέγιστη απόδ. σε ακτινοβ. AM1
n-Ga _{0,3} Al _{0,7} As/p-GaAs	Ομοένωση – ετεροδομή	24%
GaAs	Ομοένωση	22%
n-AlAs/p-GaAs	Ετεροένωση	18,5
Si (μονοκρυσταλλικό)	Ομοένωση	18%
Si (πολυκρυσταλλικό)	Ομοένωση	16%
Au/Si ₃ N ₄ /p-Si	Σότκυ	10%
p-Cu _x S/n-CdS	Ετεροένωση	10%

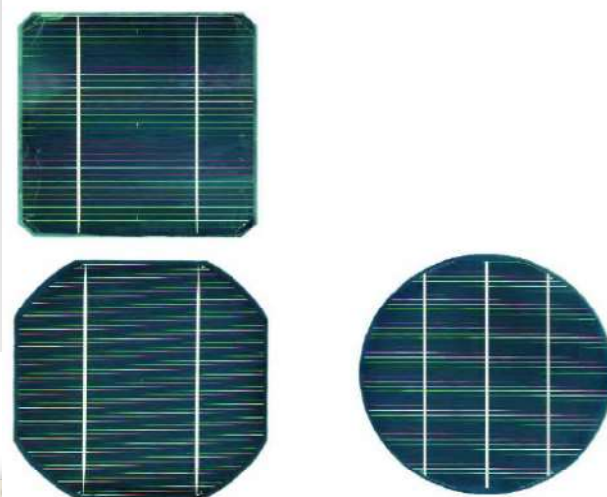
Τύποι ϕ/β και αποδόσεις



Σχήμα 2: Τύποι ηλιακών κελιών και καταγεγραμμένες μέγιστες αποδόσεις

A. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

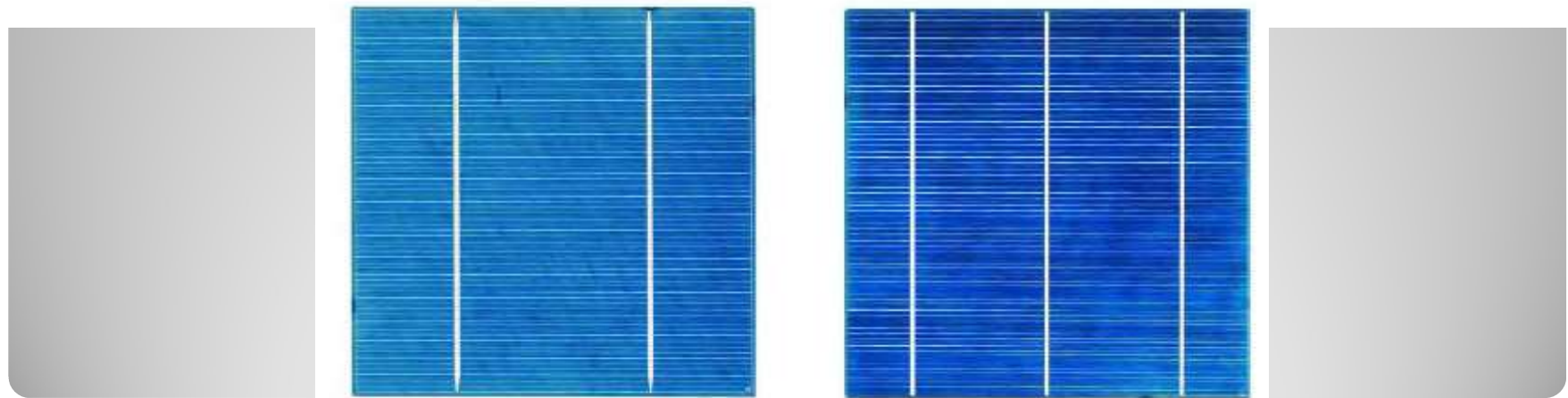
Τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από έναν μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο (wafer) πυριτίου. Τα κελιά αυτά κατασκευάζονται με μία διαδικασία γνωστή ως διαδικασία "Czochralski". Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, της τάξης του 15-18% αλλά και υψηλότερο κόστος. Τα ηλιακά κελιά κατασκευάζονται σε σχήμα κύκλου, ή σχεδόν κύκλου καθώς και τετράγωνα. Τα κυκλικά ηλιακά κελιά είναι φθηνότερα από τα υπόλοιπα επειδή είναι λιγότερα τα υπολείμματα κατά την κατασκευή τους. Ωστόσο δε χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ επειδή δεν χρησιμοποιείται αποδοτικά μία επιφάνεια, λόγω των κενών μεταξύ τους όταν τοποθετούνται δίπλα το ένα στο άλλο. Αποτελούν όμως μία καλή προοπτική για ενσωμάτωση σε κτίρια όταν απαιτείται μερική διαπερατότητα στο φως. Το χρώμα τους είναι συνήθως βαθύ μπλε έως μαύρο όταν διαθέτουν αντι-ανακλαστική (AR) επίστρωση ή γκρι (χωρίς αντι-ανακλαστική επίστρωση).



Σχήμα 3: Μοσές μονοκρυσταλλικών κελιών πυριτίου

Β. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Τα κελιά πολυκρυσταλλικού πυρίτιου είναι φθηνότερα από αυτά του μονοκρυσταλλικού πυρίτιου αλλά και λιγότερο αποδοτικά. Όπως προκύπτει και από τον όρο, κατασκευάζονται από δίσκους (wafers) πυρίτιου που κόβονται από τετραγωνισμένους ράβδους πυρίτιου. Η μέθοδος κατασκευής ενός πολυκρυσταλλικού κελιού απαιτεί πολύ μικρότερη ακρίβεια και κόστος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά κελιά. Η απόδοση τους κυμαίνεται από 13% έως 16% και κατασκευάζονται συνήθως σε τετράγωνο σχήμα. Το χρώμα τους είναι συνήθως μπλε (με αντί-ανακλαστική επίστρωση) ή γκρι-ασημί (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση).



Σχήμα 4: Μορφές πολυκρυσταλλικών κελιών πυρίτιου

Γ. Τεχνολογίες λεπτού υμενίου (thin-film)

Αρκετή έρευνα έχει διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια για την τελειοποίηση μεθόδων κατασκευής ηλιακών κελιών με ημιαγωγούς πάχους μόλις μερικών μικρομέτρων, με στόχο την επίτευξη μίας εύλογης απόδοσης με τη χρήση μικρής ποσότητας πυριτίου. Τα κελιά αυτά έχουν μικρότερη απόδοση από τα κελιά κρυσταλλικού πυριτίου (της τάξης του 5-7%) αλλά με αρκετά χαμηλότερο κόστος, ώστε να τα καθιστά ανταγωνιστικά. Συνήθως χαρακτηρίζονται από το έντονα σκούρο (σχεδόν μαύρο) χρώμα τους. Κυριότεροι αντιπρόσωποι της κατηγορίας αυτής αποτελούν τα παρακάτω:

Γα. Κελιά άμορφου πυριτίου (amorphous-Si)

Αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή και έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ηλεκτρονικά προϊόντα ευρείας κατανάλωσης (π.χ. υπολογιστές τσέπης). Το άμορφο πυρίτιο, η μη-κρυσταλλική μορφή του πυριτίου, μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα αγώγιμο υπόστρωμα σε ένα στρώμα πάχους μερικών μικρομέτρων δημιουργώντας ένα κελί τεχνολογίας λεπτού υμενίου. Η διαδικασία τοποθέτησης επιτρέπει στο άμορφο πυρίτιο να έχει λιγότερο από 1% του πάχους ενός κρυσταλλικού κελιού. Επιπλέον, τα κελιά άμορφου πυριτίου δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πάνελ.



Γβ. Κελιά καδμίου-τελλουρίου (CdTe)

Η κρυσταλλική ένωση καδμίου-τελλουρίου (CdTe) είναι ένα αποτελεσματικό υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών κελιών. Για τη δημιουργία μίας ένωσης p-n σε ένα ηλιακό κελί, ένα στρώμα σουλφιδίου του καδμίου προστίθεται στο CdTe. Λόγω της αποτελεσματικότητας ένα κελί CdTe χρησιμοποιεί περίπου το 1% του ημιαγωγού υλικού σε σχέση με ένα κρυσταλλικό κελί. Μειονέκτημα τους αποτελεί το γεγονός της χρήσης του σπάνιου μετάλλου τελλουρίου. Επιπλέον, η χρήση του καδμίου επιβάλλει την αναγκαστική ανακύκλωση τους μετά το πέρας της ζωής τους.

Γγ. Κελιά χαλκού-Ινδίου / Γαλλίου – Δισεληνιούχου

Αποτελεί μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες, όπου κελιά λεπτού υμενίου κατασκευάζονται από έναν συνδυασμό χαλκού-ινδίου-δισεληνιούχου και χαλκού-γαλλίου-δισεληνιούχου (κελιά CIGS). Τα κελιά αυτά έχουν επιδείξει αποδόσεις της τάξης του 19,9%, που αποτελεί την υψηλότερη για κελιά λεπτού υμενίου.


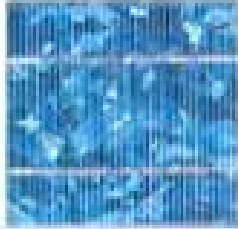

Δ. Άλλοι τύποι κελιών

Εκτός των παραπάνω συναντά κανείς και τους παρακάτω τύπους κελιών σε μικρό βαθμό ή σε εργαστηριακό επίπεδο:

Κελιά Γαλλίου-Αρσενικούχου (GaAs): Αποτελούν κελιά υψηλής απόδοσης (έως και 36%), ωστόσο ιδιαίτερα ακριβά.

Οργανικά/πολυμερή κελιά: Αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία. Τα οργανικά κελιά λειτουργούν με έναν λίγο διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες: αντί για ημιαγώγιμες p-n επαφές, τα οργανικά κελιά χρησιμοποιούν οργανικά υλικά που λειτουργούν ως δότες και δέκτες ηλεκτρονίων. Το μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης οργανικών υλικών είναι ότι επιτρέπουν την μεγάλης-κλίμακας, χαμηλής-θερμοκρασίας κατασκευή εύκαμπτων ηλιακών κελιών σε υποστρώματα πλαστικών. Η απόδοση των οργανικών κελιών είναι σήμερα της τάξης του 5-6%, ωστόσο η αύξηση της πρόκειται να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής ηλιακών κελιών.

Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών
(εξοπλισμός που κυκλοφορεί στην αγορά στις αρχές 2008)

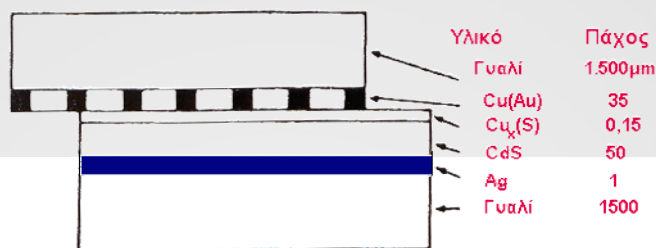
ΤΥΠΟΣ	Ύψινο υμενίου ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση	a-Si: 4,2-6,6% μ-Si: 8,1-9,5% CIS-CIGS: 6-11% CdTe: 6-11,1%	11-14,8%	11-19,3%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	9-25 m ²	7-9 m ²	5,5-9 m ²
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	1.300-1.450	1.300	1.300
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m ²) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	50-160	145-185	145-235
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kg CO ₂ ανά kWp)	1.300-1.450	1.300	1.300

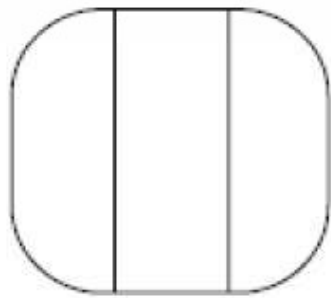
Σχήμα 23: Σημαντικότερα χαρακτηριστικά τεχνολογιών πάνελ, Πηγή ΣΕΦ

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ Φ/Β ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

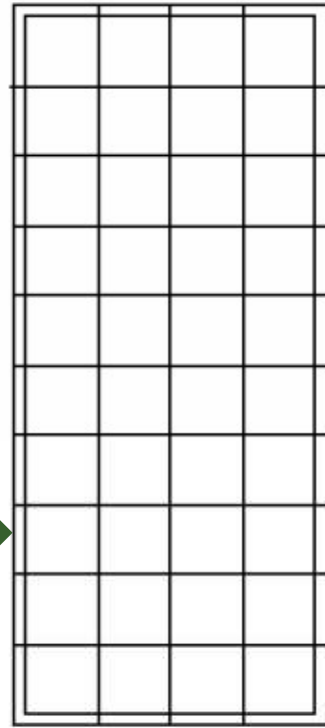
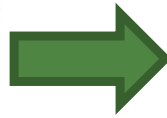
Φωτοβολταϊκά στοιχεία Θειούχου Καδμίου

- Το θειουχο κάδμιο (CdS) είναι ένας ημιαγωγός με άμεσο και σχετικά μεγάλο διάκενο ($E_g = 2,45 \text{ eV}$), που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές, όπως για την κατασκευή φωτοκυττάρων, ενισχυτών φωτός, φωσφοριτών ανιχνευτών ακτινοβολίας κ.λ.π
- Το Cds συμπεριφέρεται συνήθως σαν ημιαγωγός τύπου n. Δηλαδή οι φορείς πλειονότητας είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, χωρίς να απαιτείται η προσθήκη ξένων ατόμων-δοτών
- Η λειτουργία των Φ/Β στοιχείων από CdS οφείλεται στην ετεροένωση μεταξύ του στρώματος θειούχου χαλκού, που σχηματίζεται με την επίδραση του CdS στον Cu (χαλκός), από τον οποίο, είναι κατασκευασμένο το εμπρός ηλεκτρόδιο. Το Cu_xS είναι επίσης ημιαγωγός, με έμμεσο ενεργειακό διάκενο $1,2 \text{ eV}$ και έχει χαρακτήρα τύπου p
- Η πυκνότητα του παραγόμενου φωτορεύματος στα ηλιακά στοιχεία $\text{Cu}_x\text{S}/\text{CdS}$, είναι μικρή, η μισή περίπου σε σύγκριση με τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου
- Τα ηλιακά στοιχεία $\text{Cu}_x\text{S} / \text{CdS}$ έχουν αρκετά ικανοποιητική απόδοση, περίπου 10%
- Δεν εξασφαλίζουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής (πάνω από 20 χρόνια) που αναμένεται για τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου

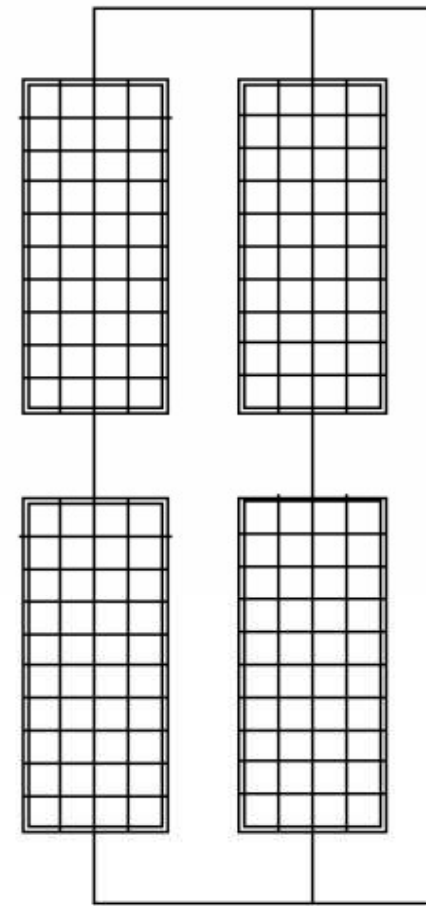




Φ/B στοιχείο



Φ/B πλαίσιο



Φ/B συλλέκτης

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Γενικά

- Η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο Φ/Β στοιχείο πυριτίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι 0,5V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις 0,4W περίπου
- Για αυτό, τα Φ/Β στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση Φ/Β γεννητριών τοποθετούνται, ανά 10 ως 50 περίπου, σε ένα πλαίσιο, με κοινή ηλεκτρική έξοδο
- Στο πλαίσιο, τα στοιχεία συνδέονται στη σειρά σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση μιας επιθυμητής τάσης
- Διαμορφώνεται έτσι το Φ/Β πλαίσιο, που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των Φ/Β γεννητριών
- Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή, τάση εξόδου από 4 V μέχρι 22 V , και ένταση ρεύματος από περίπου 0,5 A μέχρι 2,5A

Από τα Φ/Β Στοιχεία στα Φ/Β Πλαίσια

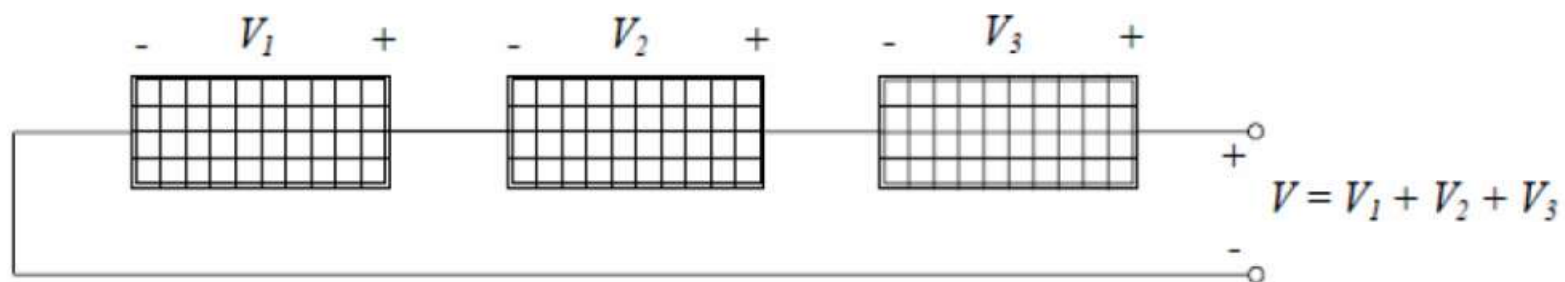
Όταν τα φ/β στοιχεία συνδέονται σε σειρά για να σχηματίσουν το φ/β πλαίσιο, όλα τα φ/β στοιχεία μεταφέρουν το ίδιο ρεύμα. Η συνολική τάση, V_{module} , του φ/β πλαισίου δίνεται από τη σχέση:

$$V_{\text{module}} = n \cdot (V_d - I \cdot R_s)$$

όπου n είναι ο αριθμός των φ/β στοιχείων που συνδέονται σε σειρά για να σχηματιστεί το φ/β πλαίσιο.

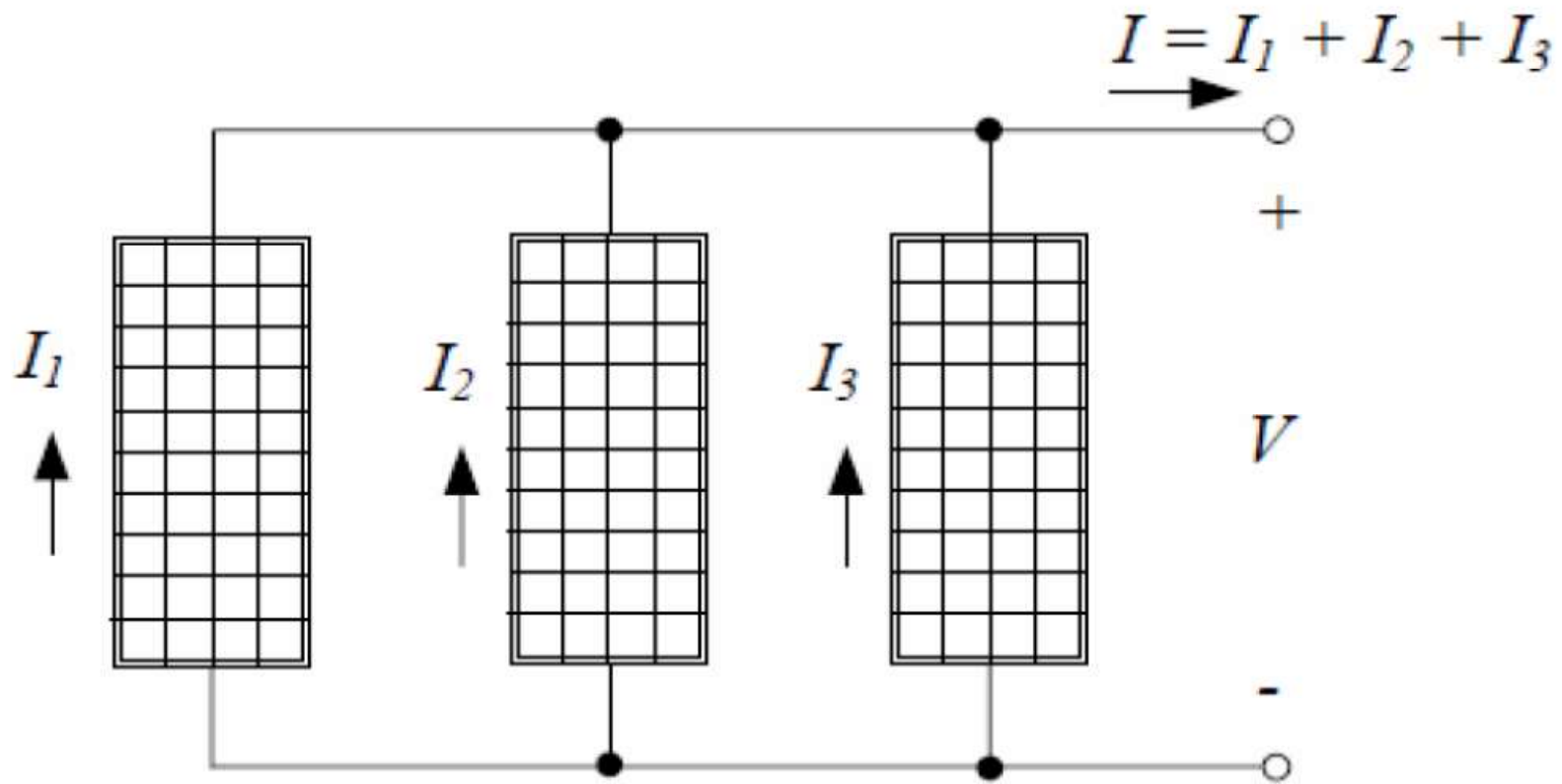
Φ/Β πλαίσια σε σειρά

Τα φ/β πλαίσια συνδέονται στη σειρά για αύξηση της τάσης, και παράλληλα για αύξηση του ρεύματος. Οι φ/β συλλέκτες αποτελούνται από συνδυασμό φ/β πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά και παράλληλα για αύξηση της ισχύος. Στο Σχήμα 2 φαίνονται τρία φ/β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Για κάθε ρεύμα, το οποίο ρέει μέσα από κάθε ένα από τα φ/β πλαίσια, η συνολική τάση είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των ατομικών φ/β πλαισίων.



Σχήμα 2

Φ/Β πλαίσια παράλληλα



Σχήμα 3

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

- Ο συντελεστής απόδοσης του Φ/Β πλαισίου (η_{π}) εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το Φ/Β πλαίσιο (P_{π}), προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του S

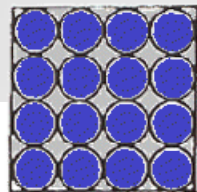
$$\eta_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{H \cdot S} \left[\frac{W}{(W/m^2) \cdot m^2} \right] \qquad \eta_{\pi} = \frac{E}{\Pi \cdot S} \left[\frac{kWh}{(kWh/m^2) \cdot m^2} \right]$$

όπου Π είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου

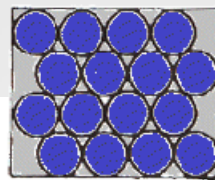
- Η τιμή του η_{π} εξαρτάται και από τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου (σ_{κ}), που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς την συνολική επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Θα ισχύει η σχέση :

$$\eta_{\pi} = \eta \cdot \sigma_{\kappa}$$

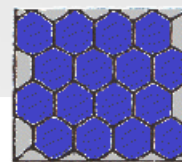
- Η τιμή του σ_{κ} εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο Φ/Β πλαίσιο. Συνήθως κυμαίνεται από περίπου 0,78, για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχισμένες σειρές φτάνει μέχρι σχεδόν 1,00 για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία



(α)



(β)



(γ)

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης

- Για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων παίρνουμε το γινόμενο: $\eta_{\pi} \cdot \sigma_{\theta}$
- Σε συμβατική θερμοκρασία ο $\sigma_{\theta}=1$, και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή
- Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας του από την επικάθιση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από την θάλασσα κ.α
- Ο αδιάστατος συντελεστής καθαρότητας (σ_{ρ}), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο Φ/Β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που όταν η επιφάνεια του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του σ_{ρ} είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του Φ/Β πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κτλ

$$E = \Pi \cdot S \cdot \eta_{\pi} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho}$$

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου

- Η ισχύς αιχμής (P_a), αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το Φ/Β πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ήλιου, δηλαδή 1 kW/m^2
- Από την σχέση που δίνει την απόδοση η_{π} είναι φανερό ότι :

$$P_a (\text{kWp}) = 1 (\text{kW} / \text{m}^2) \cdot S (\text{m}^2) \cdot \eta_{\pi}$$

- Στην περίπτωση, που γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής P_a για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Φ/Β πλαισίου, αντί για την παραπάνω σχέση χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη σχέση :

$$E (\text{kWh} / d) = \Pi (\text{kWh} / \text{m}^2 d) \cdot \frac{P_a (\text{kWp})}{1 (\text{kW} / \text{m}^2)} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho}$$

Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίου

1. Ισχύς αιχμής (P_a), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
2. Ανοιχτοκυκλώμενη τάση (V_{oc}) σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
3. Βραχυκλωμένη ένταση ρεύματος (I_{sc}), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
4. Τάση (V_m), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
5. Ένταση ρεύματος (I_m), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
6. Συντελεστής πλήρωσης (FF), που ορίζεται ως ο λόγος του γινομένου $V_m I_m$ προς το γινόμενο $V_{oc} I_{sc}$
7. Συντελεστής απόδοσης (η_p), σε συμβατική θερμοκρασία και συντελεστής διόρθωσης της απόδοσης (σ_θ)
8. Συντελεστής κάλυψης (σ_k)
9. Διηλεκτρική αντοχή δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκαλεί ηλεκτρική διάσπαση ανάμεσα στα ηλιακά στοιχεία και στο μεταλλικό περίβλημα του Φ/Β πλαισίου

Φωτοβολταϊκά πάνελ και συστοιχίες

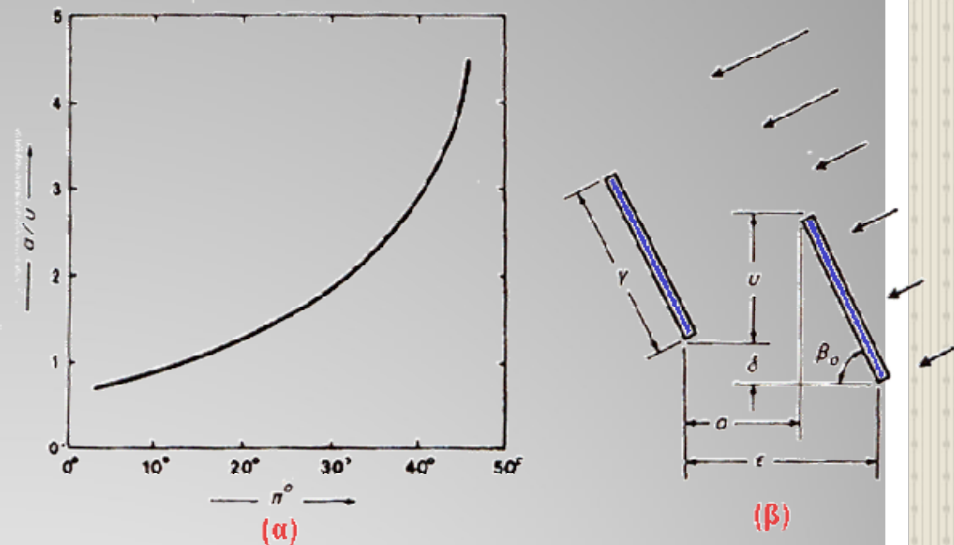
- Ένα πάνελ μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο), που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους
- Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός Φ/Β συστήματος, οι συνδέσεις των Φ/Β στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και στα πάνελ ή ανάμεσα στα γειτονικά πλαίσια και πάνελ, δεν είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες
- Στις μεγάλες Φ/Β εγκαταστάσεις π.χ. συνολικής ισχύος αιχμής πάνω από 20 kWp, πολλές Φ/Β συστοιχίες σχηματίζουν ένα υποσυγκρότημα συστοιχιών (arrays subfield) και το σύνολο των υποσυγκροτημάτων αποτελεί το συγκρότημα συστοιχιών (array field) ή το Φ/Β πάρκο του Φ/Β σταθμού
- Κάθε Φ/Β πλαίσιο πρέπει να έχει ανοικτό ορίζοντα. Σε μία τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος π° , η προϋπόθεση του ανοικτού ορίζοντα θεωρείται ότι εξασφαλίζεται όταν η γωνία του ύψους (β_ϵ) των γειτονικών συστοιχιών, δέντρων, κτιρίων, ή άλλων εμποδίων ικανοποιεί μέσα σε μια αζιμούθια γωνία από -60° μέχρι $+60^\circ$ προς το Νότο, τη σχέση :

$$\beta_\epsilon \leq 48^\circ - \pi^\circ$$

- Για παράδειγμα στη Αθήνα, που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 38° η γωνία του ύψους των διαφόρων εμποδίων δεν πρέπει να ξεπερνά τις 10°

- Το διπλανό διάγραμμα μας βοηθά στον προσδιορισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των ηλιακών συλλεκτών στις Φ/Β συστοιχίες, ώστε η μια σειρά να μη σκιάζει αισθητά την επόμενη.
- Συγκεκριμένα, το διάγραμμα δίνει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του λόγου της ελεύθερης απόστασης ανάμεσα στις δύο σειρές (α) προς την επικάλυψη του ύψους της κατασκευής στήριξης του συλλέκτη (u).
- Αν γ είναι το πλάτος το στηρίγματος (που συμπίπτει με το πλάτος του συλλέκτη, δηλαδή του Φ/Β πλαισίου ,ή του πανέλ), β_σ είναι η κλίση του, και δ είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα των δύο σειρών, τότε το u δίνεται προφανώς από την σχέση :

$$u = \gamma \cdot \sin \beta_a - \delta$$



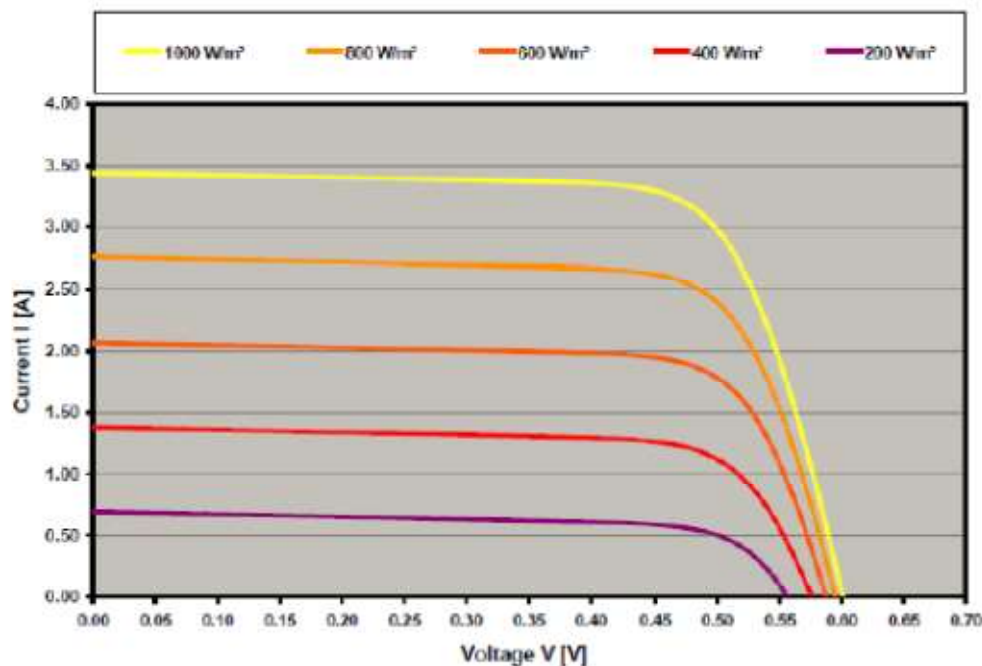
- Με την βοήθεια του διαγράμματος την αντίστοιχη του α, και από τη σχέση :

$$\varepsilon = a + \gamma \cdot \cos \beta_\varepsilon$$

- υπολογίζουμε το ε, δηλαδή την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση των σειρών

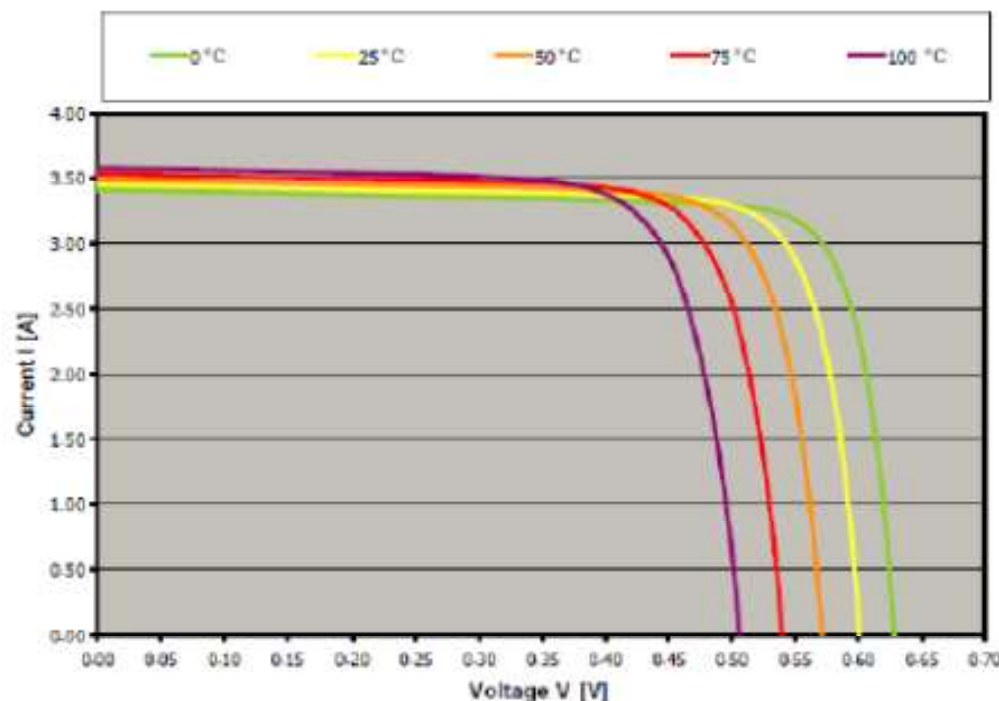
Επίδραση της Θερμοκρασίας και της Έντασης της Ηλιακής Ακτινοβολίας στη Χαρακτηριστική I-V

Οι κατασκευαστές συχνά δίνουν τις χαρακτηριστικές I-V του φ/β πλαισίου που δείχνουν πώς αλλάζουν οι καμπύλες όταν αλλάζει η ηλιακή ένταση και η θερμοκρασία. Το Σχήμα 5 δίνει παραδείγματα αυτών των καμπυλών για ένα φ/β πλαίσιο. Από το Σχήμα 5 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι καθώς μειώνεται η ηλιακή ένταση, το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται αναλογικά. Για παράδειγμα, η μείωση της ηλιακής έντασης στο μισό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{SC} στο μισό. Η μείωση της ηλιακής έντασης επίσης μειώνει την τάση ανοικτού κυκλώματος V_{OC} αλλά αυτή η μείωση ακολουθεί λογαριθμική σχέση που προκαλεί σχετι



Σχήμα 9: Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας στην καμπύλη I-V ενός ηλιακού κελιού

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5β καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου, η τάση ανοικτού κυκλώματος μειώνεται σημαντικά ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται μόνο λίγο. Τα φωτοβολταϊκά, ίσως απρόσμενα, συμπεριφέρονται καλύτερα τις κρύες, ξάστερες μέρες, παρά τις ζεστές. Για τα φ/β στοιχεία από κρυσταλλικό πυρίτιο, η V_{oc} μειώνεται περίπου 0,37% για κάθε βαθμό Κελσίου αύξηση της θερμοκρασίας και το I_{sc} αυξάνεται περίπου κατά 0,05%. Έτσι, όταν τα φ/β στοιχεία θερμαίνονται, το σημείο μέγιστης ισχύος μειώνεται κατά περίπου 0,5%/°C. Με δεδομένη αυτή τη σημαντική αλλαγή στην απόδοση εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του φ/β στοιχείου, είναι προφανές γιατί θα πρέπει να συνυπολογίζεται η θερμοκρασία σε κάθε εκτίμηση της απόδοσης του φ/β πλαισίου.



Σχήμα 10: Επίδραση της θερμοκρασίας στην I-V χαρακτηριστική ενός ηλιακού κελιού

Η θερμοκρασία των φ/β στοιχείων μεταβάλλεται όχι μόνο επειδή αλλάζει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αλλά και επειδή μεταβάλλεται η ηλιακή ένταση στα φ/β στοιχεία. Επειδή μόνο ένα μικρό μέρος της ηλιακής έντασης που προσπίπτει σε ένα φ/β πλαίσιο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής έντασης απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα. Για να βοηθηθούν οι σχεδιαστές φ/β συστημάτων να υπολογίζουν τις αλλαγές στην απόδοση του φ/β στοιχείου εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας, οι κατασκευαστές συχνά παρέχουν το δείκτη NOCT, που δείχνει την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β στοιχείου. Ο δείκτης NOCT είναι η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου σε ένα φ/β πλαίσιο όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 20°C, η ηλιακή ένταση είναι 0,8 kW/m² και η ταχύτητα του ανέμου είναι 1 m/s. Για να ληφθούν υπόψη διαφορετικές συνθήκες, χρησιμοποιείται η ακόλουθη

σχέση:

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^{\circ}C}{0,8} \right) \cdot S$$

όπου T_{cell} είναι η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου (°C), T_{amb} η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (°C) και S η ηλιακή ένταση (kW/m²)

Όταν δεν δίνεται ο δείκτης NOCT, μία άλλη μέθοδος εκτίμησης της θερμοκρασίας του φ/β στοιχείου βασίζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$T_{cell} = T_{amb} + \gamma \cdot \left(\frac{S}{1 \text{ kW/m}^2} \right)$$

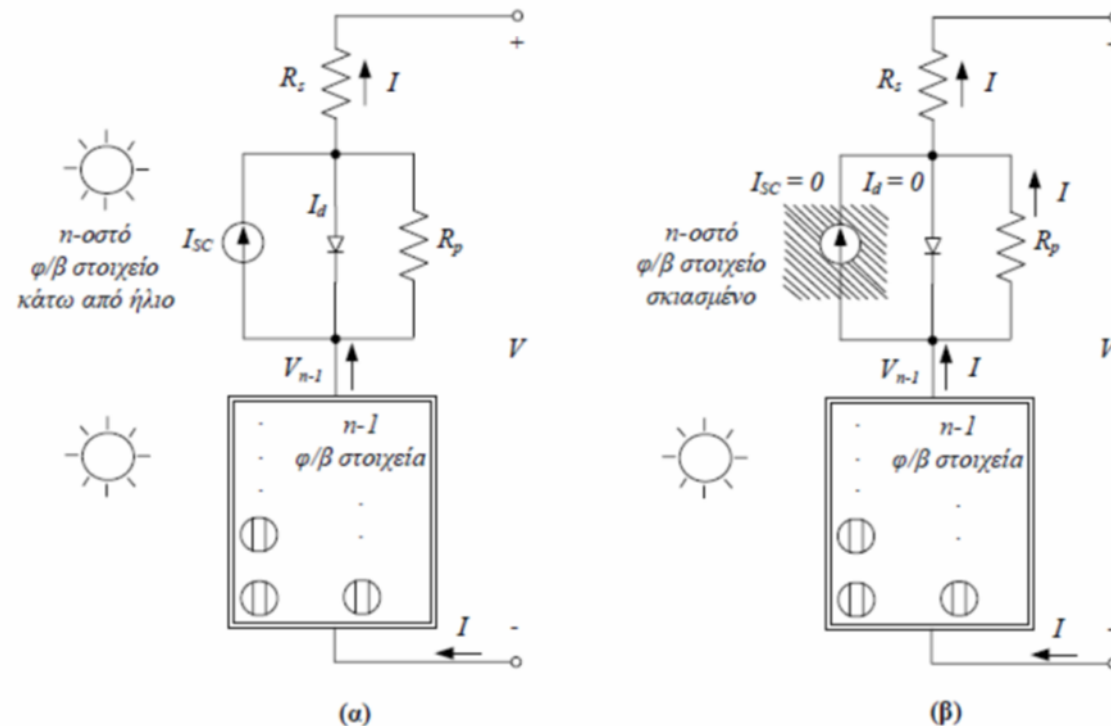
όπου γ είναι ένας συντελεστής αναλογίας που εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και από το πόσο καλά αερίζονται τα φ/β πλαίσια όταν εγκατασταθούν. Τυπικές τιμές του γ είναι μεταξύ 25°C και 35°C, δηλαδή σε ηλιακή ένταση 1 kW/m², τα φ/β στοιχεία τείνουν να είναι 25-35°C θερμότερα σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλοντος.

Επίδραση της Σκίασης στη Χαρακτηριστική I-V

Η έξοδος ενός φ/β πλαισίου μπορεί να μειωθεί δραματικά όταν ακόμα και ένα μικρό τμήμα του είναι υπό σκιά. Εκτός και αν καταβάλλονται ειδικές προσπάθειες για να αντισταθμιστεί το πρόβλημα της σκίασης, ακόμα και αν ένα μόνο φ/β στοιχείο είναι σκιασμένο σε μία μεγάλη σειρά φ/β στοιχείων, μπορεί εύκολα να μειωθεί η ισχύς εξόδου περισσότερο από το μισό. Για τη διατήρηση της απόδοσης των φ/β πλαισίων, προστίθενται εξωτερικές δίοδοι από τον κατασκευαστή των φ/β ή από το σχεδιαστή του συστήματος. Οι δίοδοι αυτές έχουν ως στόχο να μετριάσουν την επίδραση της σκίασης στις χαρακτηριστικές I-V. Τέτοιες δίοδοι συνήθως προστίθενται παράλληλα στα φ/β πλαίσια ή στις ομάδες φ/β στοιχείων εντός ενός φ/β πλαισίου.

Για την κατανόηση του φαινομένου της σκίασης θεωρούμε το Σχήμα 6 όπου το n -οστό ϕ/β στοιχείο του ϕ/β πλαισίου είναι διαχωρισμένο από τα υπόλοιπα $n-1$ ϕ/β στοιχεία. Το ϕ/β πλαίσιο έχει τάση V και ρεύμα I . Το n -οστό ϕ/β στοιχείο είναι σχεδιασμένο στην κορυφή του ϕ/β στοιχείου, παρόλο που θα μπορούσε να ήταν οποιοδήποτε ϕ/β στοιχείο. Τα υπόλοιπα $n-1$ ϕ/β στοιχεία εικονίζονται ως ένα ϕ/β πλαίσιο με τάση V_{n-1} και ρεύμα I . Στο Σχήμα 6(α) όλα τα ϕ/β στοιχεία είναι κάτω από ήλιο και καθώς συνδέονται στη σειρά, το ίδιο ρεύμα I ρέει μέσα από κάθε ένα από αυτά. Στο Σχήμα 6(β), όμως, το ϕ/β στοιχείο στην κορυφή είναι σκιασμένο και η πηγή ρεύματός του I_{SC} δεν διαρρέεται από ρεύμα. Η πτώση τάσης κατά μήκος της R_p , καθώς το ρεύμα I ρέει μέσα από αυτή, πολώνει ανάστροφα τη διάοδο, οπότε το ρεύμα της διόδου είναι επίσης μηδενικό. Αυτό σημαίνει ότι όλο το ρεύμα που ρέει μέσα από το ϕ/β πλαίσιο πρέπει να περάσει μέσα από τις R_p και R_s του σκιασμένου ϕ/β στοιχείου.

Αυτό σημαίνει ότι η τάση του n -οστού ϕ/β στοιχείου αφαιρείται, αντί να προστίθεται στην τάση του ϕ/β πλαισίου.



Έστω η περίπτωση που τα κάτω $n-1$ φ/β στοιχεία είναι υπό πλήρη ηλιοφάνεια και ότι με κάποιο τρόπο εξακολουθούν να μεταφέρουν το αρχικό τους ρεύμα I , οπότε θα εξακολουθούν να παράγουν την αρχική τους τάση V_{n-1} . Αυτό σημαίνει ότι η συνολική τάση εξόδου V_{SH} του φ/β πλαισίου με ένα φ/β στοιχείο σκιασμένο θα μειωθεί (σε σχέση με την αρχική τάση V) και θα είναι:

$$V_{SH} = V_{n-1} - I \cdot (R_P + R_S)$$

Με όλα τα φ/β στοιχεία κάτω από ήλιο να μεταφέρουν ρεύμα I , η τάση εξόδου του φ/β πλαισίου ήταν V , οπότε η τάση των $n-1$ φ/β στοιχείων θα είναι:

$$V_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n} \right) \cdot V \quad \text{και τελικά θα έχουμε} \quad V_{SH} = \left(\frac{n-1}{n} \right) \cdot V - I \cdot (R_P + R_S)$$

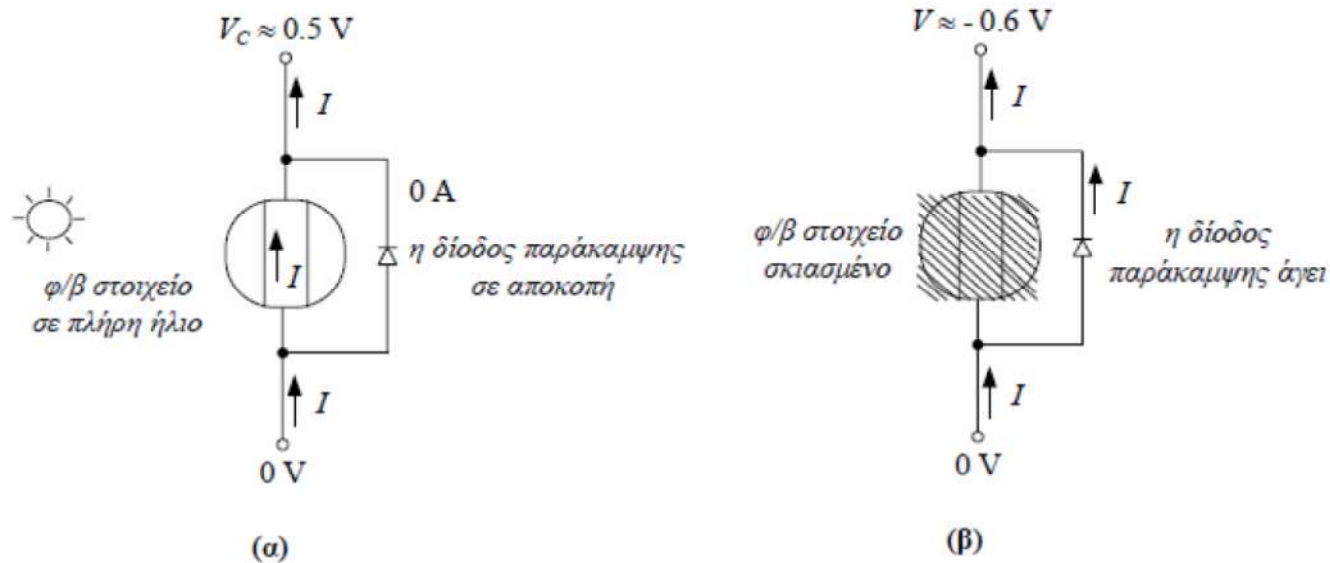
Για δοσμένο ρεύμα I , η πτώση στην τάση ΔV που προκαλείται εξαιτίας του n -οστού σκιασμένου φ/β στοιχείου υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\Delta V = V - V_{SR} \rightarrow \Delta V = V - \left(\frac{n-1}{n} \right) \cdot V + I \cdot (R_P + R_S) \quad \Rightarrow \quad \Delta V = \frac{V}{n} + I \cdot (R_P + R_S)$$

Επειδή η παράλληλη αντίσταση R_P είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση σειράς R_S , η σχέση απλουστεύεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\Delta V \simeq \frac{V}{n} + I \cdot R_P$$

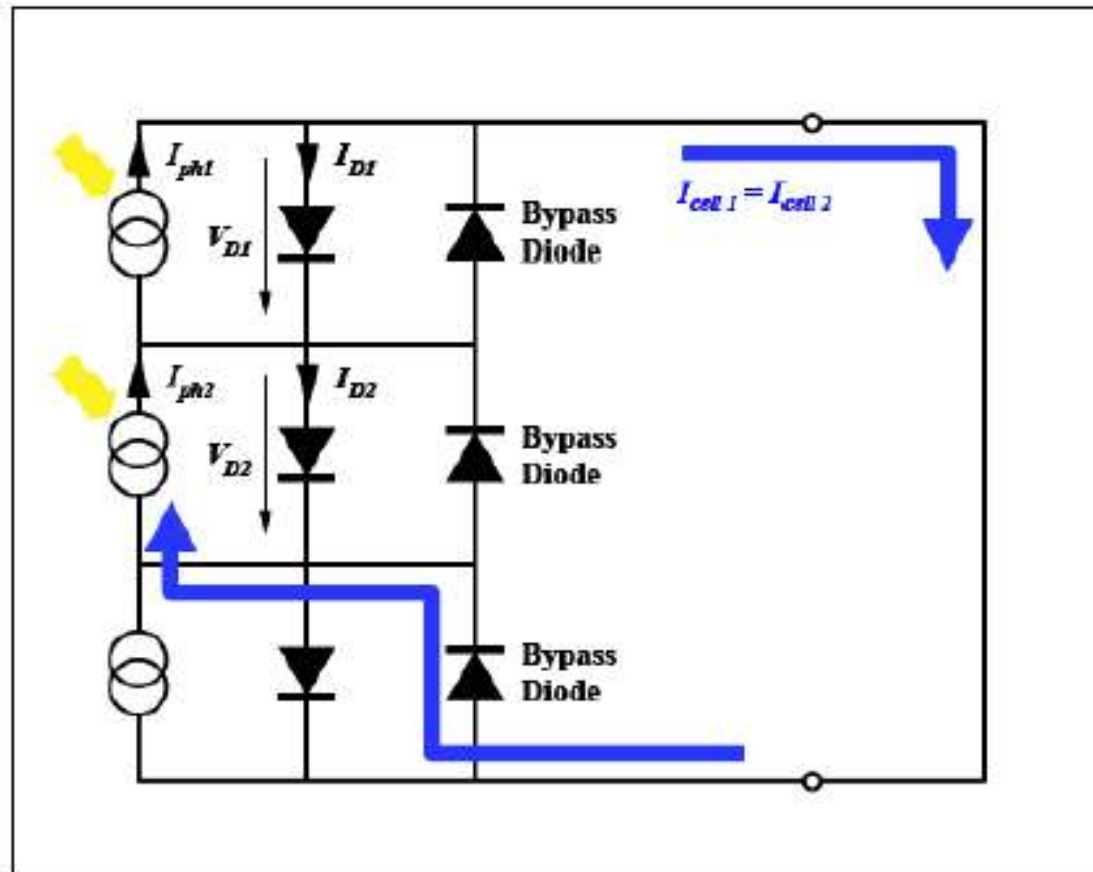
Δίοδος παράκαμψης



Σχήμα 8

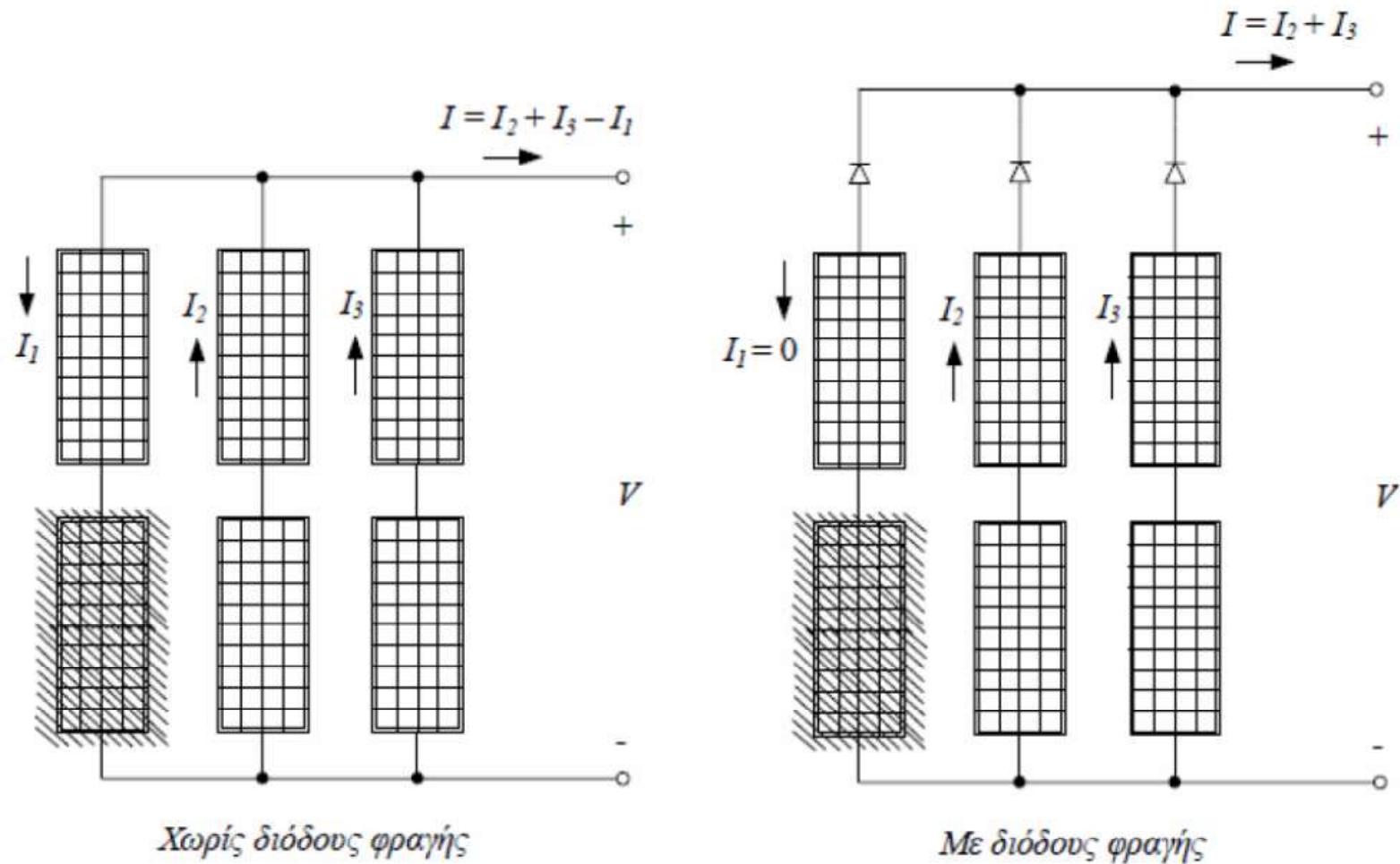
Αμβλυνση του προβλήματος της σκίασης με δίοδο παράκαμψης. **(α) σε πλήρη ήλιο, η δίοδος παράκαμψης είναι ανάστροφα πολωμένη και όλο το ρεύμα περνά μέσω από το φ/β στοιχείο. (β) σε σκίαση, η δίοδος παράκαμψης είναι ορθά πολωμένη οπότε άγει ρεύμα εξωτερικά του σκιασμένου φ/β στοιχείου επιτρέποντας έτσι να συμβεί μόνο η πτώση τάσης των 0,6 V στη δίοδο.**

Σε πραγματικά φ/β πλαίσια, είναι μη πρακτική η προσθήκη διόδων παράκαμψης κατά μήκος κάθε φ/β στοιχείου. Όμως οι κατασκευαστές συχνά παρέχουν τουλάχιστον μία δίοδο παράκαμψης γύρω από κάθε φ/β πλαίσιο για να βοηθήσουν στην προστασία των φ/β πλαισίων, και μερικές φορές παρέχουν πολλές τέτοιες διόδους γύρω από ομάδες φ/β στοιχείων μέσα σε ένα φ/β πλαίσιο. Οι διόδους αυτές δεν έχουν μεγάλη επίδραση στα προβλήματα σκίασης ενός απλού φ/β πλαισίου, όμως μπορεί να έχουν πολύ σημαντική επίδραση όταν ένα πλήθος φ/β πλαισίων συνδέονται σε σειρά.



Σχήμα 15: Δίοδος ρεύματος διαμέσου της διόδου παράκαμψης σε περίπτωση πλήρους σκίασης

Δίοδοι φραγής



Σχήμα 8

Οι διόδους φραγής εμποδίζουν την απορρόφηση ανάστροφου ρεύματος από μία σκιασμένη ομάδα φ/β πλαισίων.

Οι απώλειες στα φωτοβολταϊκά συστήματα

- Απώλειες λόγω αύξησης της θερμοκρασίας
- Απώλειες λόγω ρύπανσης
- Όταν το σύστημα δεν έχει αξιόπιστο ρυθμιστή ισχύος, κατά την λειτουργία του θα υπάρχει μια αξιόλογη απόκλιση από τις ιδανικές συνθήκες, με αποτέλεσμα την εμφάνιση αντίστοιχής απώλειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Απώλειες λόγω της φθοράς στα Φ/Β πλαίσια και στα άλλα μέρη του συστήματος, Με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζεται μια μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, που συνήθως υπολογίζεται στο 1% ως 2% για κάθε έτος
- Κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των Φ/Β συλλεκτών ενός συστήματος πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με τη περίπτωση και την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης π.χ. περίπου του 20% ως 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο