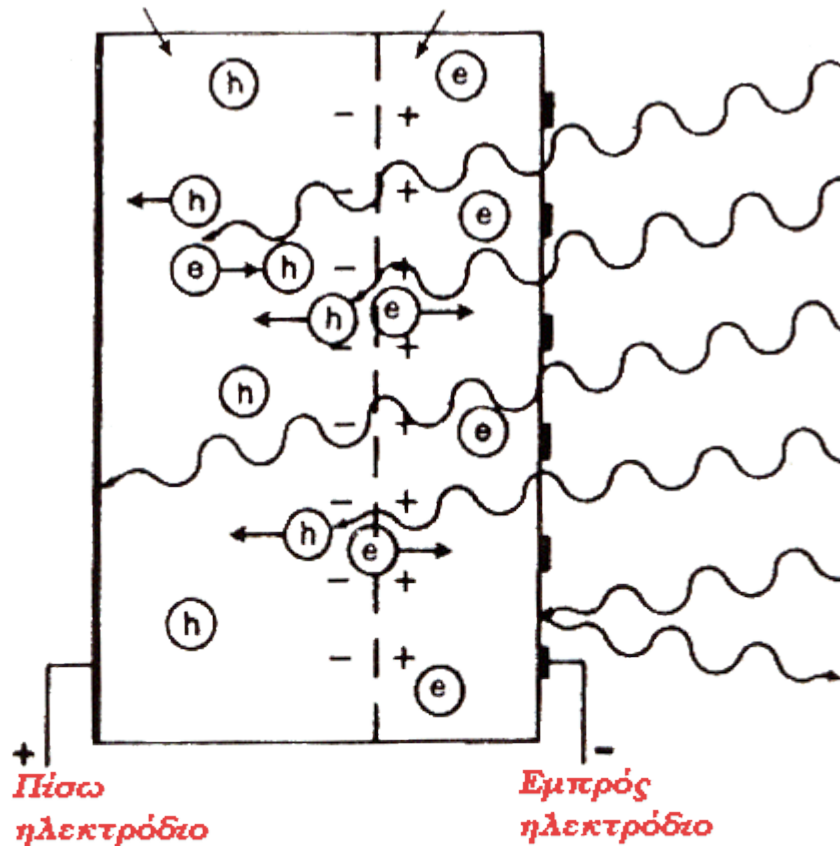


ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

1. Γενικά

Είναι γνωστό ότι τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της 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. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας.

Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου (σχήμα 1).



ΣΧ. 1 Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του Φ/β φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο . Τα φωτόνια της ακτινοβολίας , που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη , τύπου n στο παράδειγμα του σχήματος , παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) . Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του εσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια , e^-) ή προς τα πίσω (οι οπές , h^+), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται . Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου , ενώ ένα άλλο μέρος της διέρχεται από το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί , μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο.

Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου Ω και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου ρ , με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων ρ και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά

ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων. π.χ. από διόδους Σότκυ που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

2. Η ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι, η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγικό υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο με το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει, όπως είδαμε, στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται, σαν κινητική ενέργεια, στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό, και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα. Όπως θα αναλυθεί όμως παρακάτω, η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιδρά αρνητικά στην απόδοσή τους.

Η ενέργεια ενός φωτονίου E συνδέεται με τη συχνότητα της ακτινοβολίας ν και με το μήκος κύματος λ με τις σχέσεις :

$$E=h\nu=hc/\lambda$$

όπου h είναι η σταθερά δράσης του plank ($h=6,3 \times 10^{-34}$ JS) και c είναι η ταχύτητα του φωτός ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Επομένως, αν το ενεργειακό διάκενο είναι σε μονάδες ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και το μήκος κύματος σε μικρόμετρα (μm), τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε ένα ημιαγωγό, ενεργειακού διακένου E_g , θα είναι :

$$\lambda_g=1,238/E_g$$

θεωρώντας τώρα ότι στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού διεισδύει μια, μονοχρωματική δέσμη ακτινοβολίας από όμοια φωτόνια ενέργειας $h\nu$, που έχει ροή (η ένταση) ίση με H μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφανείας. Η ροή των φωτονίων (Φ), δηλαδή το πλήθος των φωτονίων ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου, θα είναι :

$$\Phi = H/h\nu = H\lambda/hc$$

Βλέπουμε όπως άλλωστε είναι αυτονόητο ότι, για σταθερή ένταση H η ροή Φ είναι αντίστροφα ανάλογα με την ενέργεια των φωτονίων ή, που είναι το ίδιο, αυξάνει γραμμικά με το λ .

Ας συμβολίσουμε, στη συνέχεια με Φ_0 την αρχική τιμή της ροής των φωτονίων στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού, με x την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στον ημιαγωγό, αρχίζοντας από την επιφάνειά του, και με $\Phi(x)$ την τιμή της ροής των φωτονίων (δηλαδή το πλήθος των φωτονίων που δεν έχουν ακόμα απορροφηθεί) στο βάθος αυτό. Η ευκολία με την οποία πραγματοποιείτε η απορρόφηση των φωτονίων, που είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα για τη χρησιμοποίηση του ημιαγωγού ως υλικού κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα δίνεται από το ρυθμό της μεταβολής της Φ με την αύξηση της απόστασης που διανύει η ακτινοβολία. Ο ρυθμός αυτός έχει αρνητική τιμή, αφού η Φ μειώνεται με την αύξηση του x , και είναι προφανώς ανάλογος με τη συγκεκριμένη τιμή της Φ στο βάθος x , δηλαδή με τη $\Phi(x)$. Θα ισχύει επομένως η σχέση :

$$d\Phi/dx = -\alpha\Phi(x)$$

και η σταθερά της αναλογίας α , που δίνεται σε αντίστροφες μονάδες μήκους, ονομάζεται συντελεστής απορρόφησης της υπόψη ακτινοβολίας.

Δοθέντος ότι για $x=0$ η $\Phi(x)$ παίρνει την τιμή Φ_0 , η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης είναι :

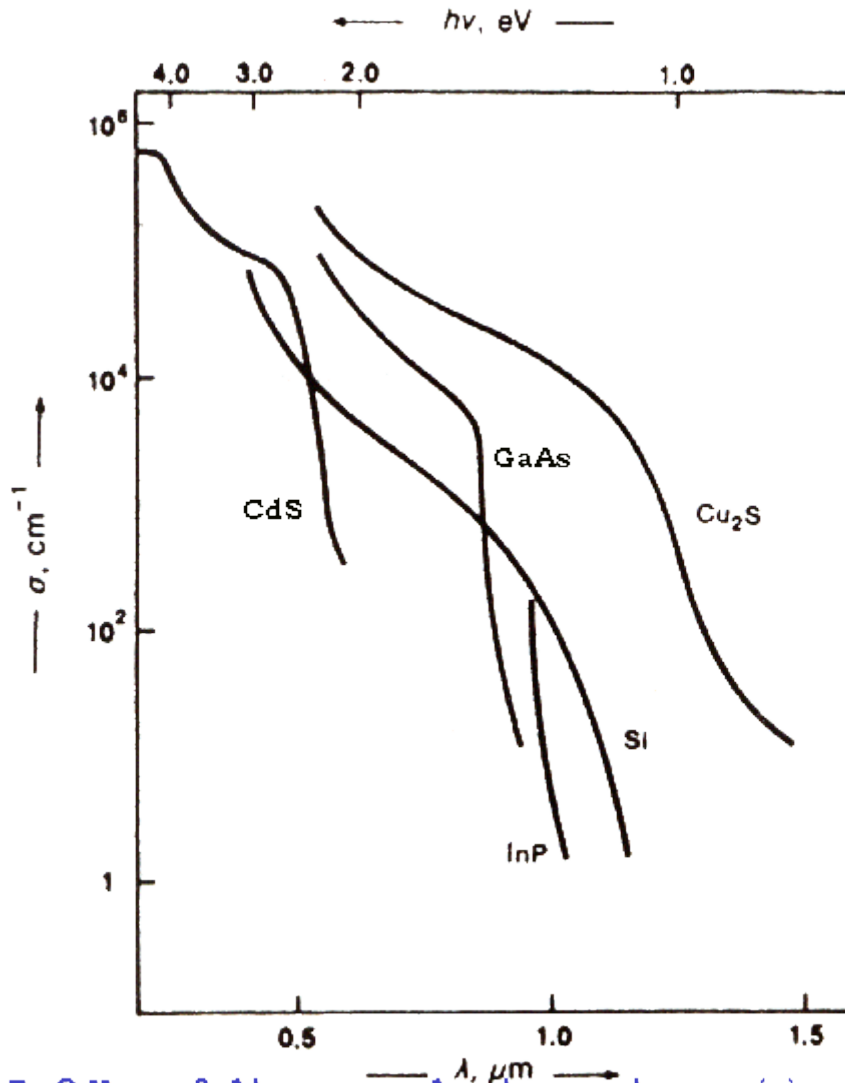
$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha x)$$

που ονομάζεται νόμος του BEER (Μπερ).

Στη συνέχεια βρίσκουμε εύκολα ότι :

$$-d\Phi/dx = \alpha\Phi_0 \exp(-\alpha x)$$

δηλαδή ότι ο ρυθμός της απορρόφησης των φωτονίων, επομένως και της δημιουργίας των φορέων από την ακτινοβολία που δέχεται ο ημιαγωγός, είναι μεγαλύτερος κοντά στην επιφάνειά του και εξασθενίζει με την απόσταση από αυτή.



Σχ.2 Η μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης (α) σε συνάρτηση με το μήκος κύματος (λ) ή την ενέργεια των φωτονίων ($h\nu$) της ακτινοβολίας, για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φωτοβολταϊκών διατάξεων.

Όπως δείχνεται και στο σχήμα 2 η τιμή του συντελεστή απορρόφησης μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, μηδενίζεται όταν το λ υπερβαίνει το λ_g του ημιαγωγού, αφού για αυτά τα μήκη κύματος δεν πραγματοποιείται καμιά απορρόφηση φωτονίων. Αντίθετα, παίρνει μεγάλες τιμές προς την πλευρά των μικρών μηκών κύματος που σημαίνει ότι η απορρόφηση πρακτικά όλων των αντίστοιχων φωτονίων γίνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού.

3. Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_ϕ , που η τιμή του θα

είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. π.χ. ας υποθέσουμε ότι έχουν εξασφαλιστεί οι δύο βασικές προϋποθέσεις για ένα καλό φωτοβολταϊκό στοιχείο, δηλαδή η ένωση p-n να βρίσκεται σε κατάλληλη απόσταση από την όψη του στοιχείου και η μέση διάρκεια ζωής των φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο, να είναι αρκετά μεγάλο. Τότε, για την πυκνότητα του φωτορεύματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση :

$$I_{\Phi} = e g (L_n + L_p)$$

όπου e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, g είναι ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας (πλήθος ζευγών ηλεκτρονίων-οπών ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου του ημιαγωγού), και L_n , L_p είναι τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα.

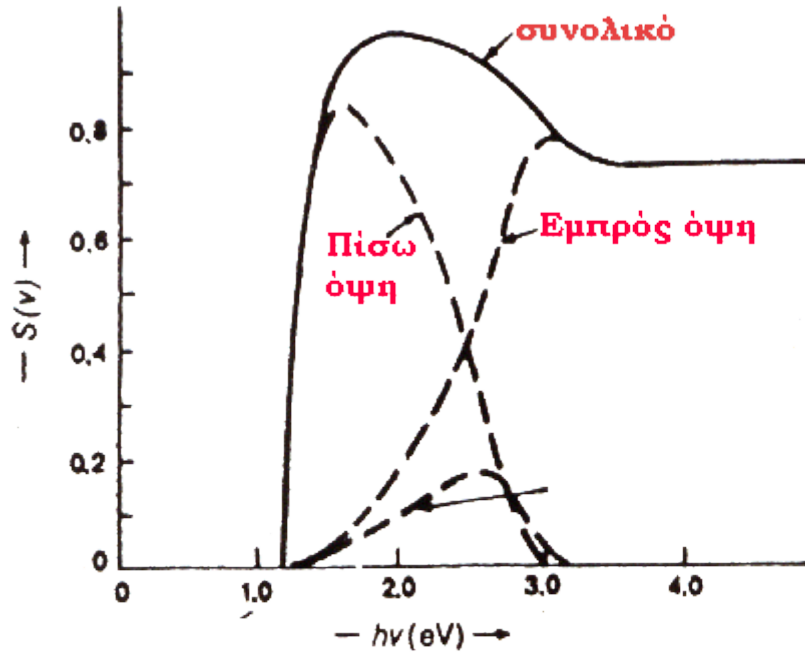
Ένα χρήσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό του φωτορεύματος είναι η φασματική απόκριση S (ή απόδοση συλλογής ή κβαντική απόδοση), που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, σε σχέση με τη φωτονική ροή Φ , δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Για ακτινοβολία μήκους κύματος λ , η φασματική απόκριση $S(\lambda)$ θα είναι :

$$S(\lambda) = I_{\Phi}(\lambda) / e \Phi(\lambda)$$

όπου $\Phi(\lambda)$ είναι το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $\lambda + d\lambda$, και επομένως το συνολικό φωτόρευμα του στοιχείου, όταν δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία, θα είναι :

$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda$$

Η τιμή της φασματικής απόκρισης, και συνεπώς του φωτορεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης και το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κλπ. Στο σχήμα 3 δείχνεται η μεταβολή της φασματικής απόκρισης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου του εμπορίου σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται.



Σχ.3 Η μεταβολή της φασματικής απόκρισης $S(\nu)$ σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας, στις τρεις περιοχές ενός φωτοβολταϊκού ηλιακού στοιχείου πυριτίου: εμπρός όψη τύπου n, ζώνη εξάντλησης και πίσω όψη τύπου p.

Όταν το ποσοστό της επιφάνεια του στοιχείου δεν είναι αμελητέο γράφεται :

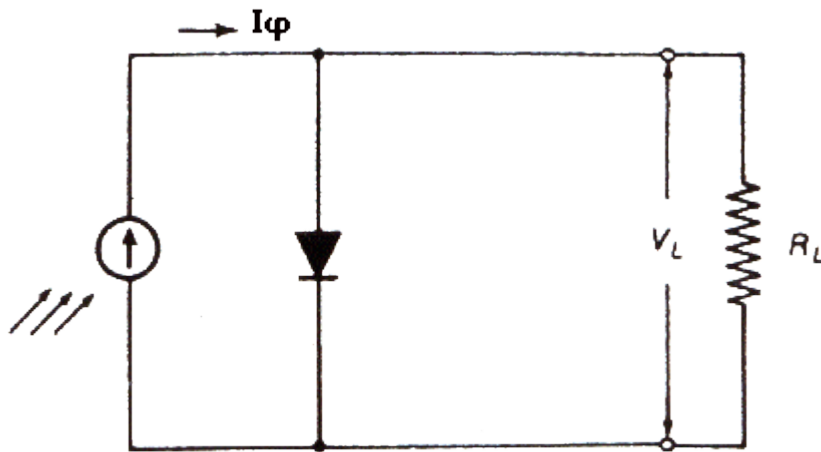
$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda)[1 - R(\lambda)]\Phi(\lambda)d\lambda$$

όπου $R(\lambda)$ είναι ο δείκτης ανάκλασης για την ακτινοβολία μήκους κύματος λ .

4. ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Για να προχωρήσουμε σε μια πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να το θεωρήσουμε ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο, και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα του σχήματος 4.



Σχ.4 Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα.

Δηλαδή, σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα ισχύει η σχέση :

$$I_{\phi} = I_0 [\exp(eV/\gamma kT) - 1]$$

από την οποία βρίσκουμε ότι, η τιμή ανοιχτοκυκλωμένης τάσης του στοιχείου V_{oc} (από την αγγλική έκφραση open –circuit Voltage) θα είναι :

$$V_{oc} = (\gamma kT/e) \ln[(I_{\phi}/I_0) - 1]$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του I_{ϕ} είναι πολύ μεγαλύτερη από το I_0 και επομένως η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στη :

$$V_{oc} = [(\gamma kT/e) \ln I_{\phi}/I_0]$$

που δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρευμα, δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Από τις σχέσεις για το I_0 που αναφέρθηκαν μπορούμε να βρούμε την εξάρτηση της V_{oc} από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού, όπως το ενεργειακό διάκενο E_g , η ενδογενής συγκέντρωση των φορέων n_i , οι συγκεντρώσεις των προσμίξεων N_A και N_D κλπ.

Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου το ρεύμα I_{sc} (short-circuit current) θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρευμα :

$$I_{sc} = I_{\phi}$$

Όταν όμως το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L (από την αγγλική έκφραση Load resistance), το

ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται με την λύση της εξίσωσης :

$$I = I_{\Phi} - I_0 [\exp(eI_L R_L / \gamma K T) - 1]$$

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης (δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος) για την οποία η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα γίνεται μέγιστη. Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_m , που δίνεται από την λύση της εξίσωσης :

$$(I_{\Phi}/I_0) + 1 = [1 + (eV_m / \gamma k T)] \exp(eV_m / \gamma / k T)$$

5. Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

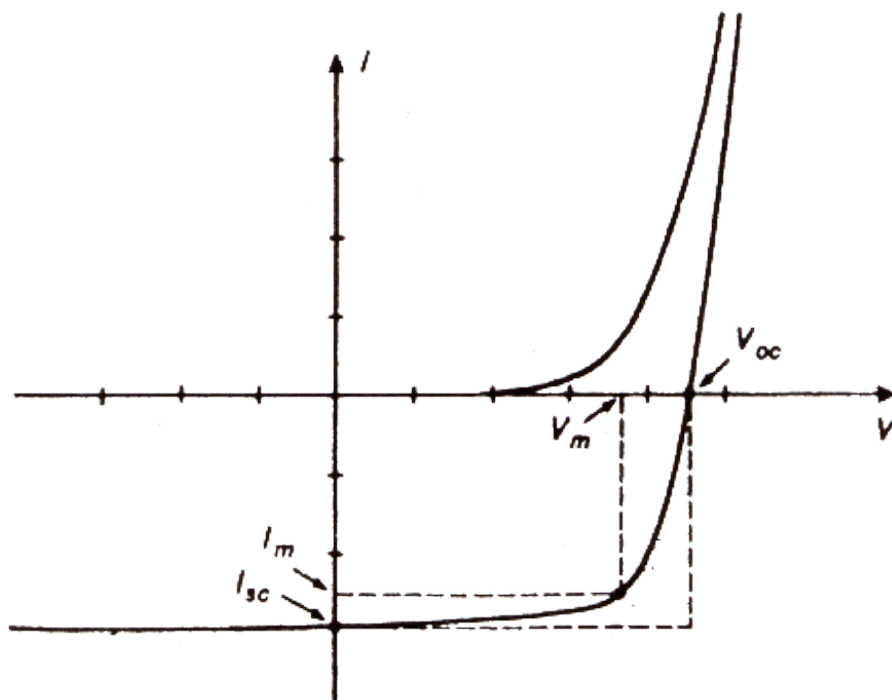
Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $p_m = I_m V_m$ προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της ανοικτωκυκλωμένης τάσης $I_{sc} V_{oc}$ ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (από την αγγλική έκφραση fill factor). Δηλαδή :

$$FF = I_m V_m / I_{sc} V_{oc}$$

Στο διάγραμμα του σχήματος 5, 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} .

Οι τρεις παραπάνω παράμετροι, δηλαδή ο FF, I_{sc} , και η V_{oc} είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους. Επιστρέφοντας στον συντελεστή απόδοσης στοιχείων (η) μπορούμε τώρα να τον ορίσουμε με τη σχέση :

$$\eta = P_m / HA = I_m V_m / HA = FF I_{sc} V_{oc} / HA$$



Σχ.5 Η χαρακτηριστική καμπύλη έντασης (I) - τάσης (V) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως . Διακρίνονται τα δύο ορθογώνια που ο λόγος των εμβαδών τους καθορίζει την τιμή του συντελεστή πλήρωσης . Στο διάγραμμα , δεν δείχνεται το ανάστροφο ρεύμα κόρου , λόγω της ασήμαντα μικρής τιμής του , σε σύγκριση με το φωτορεύμα του στοιχείου.

όπου H είναι η ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του Φ/β στοιχείου, εμβαδού A . Όπως βλέπουμε, για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων , επιδιώκεται οι τιμές των FF , I_{sc} και V_{oc} να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

Προφανώς θα ισχύει και η σχέση :

$$\eta = \frac{\Phi(E_g)V_m}{\Phi E_m}$$

όπου $\Phi(E_g)$ είναι η ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, Φ είναι η συνολική φωτονική ροή στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο, και E_m είναι η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

Στην ηλιακή ακτινοβολία, περίπου 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 πρόχειρα ότι η θεωρητική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου .

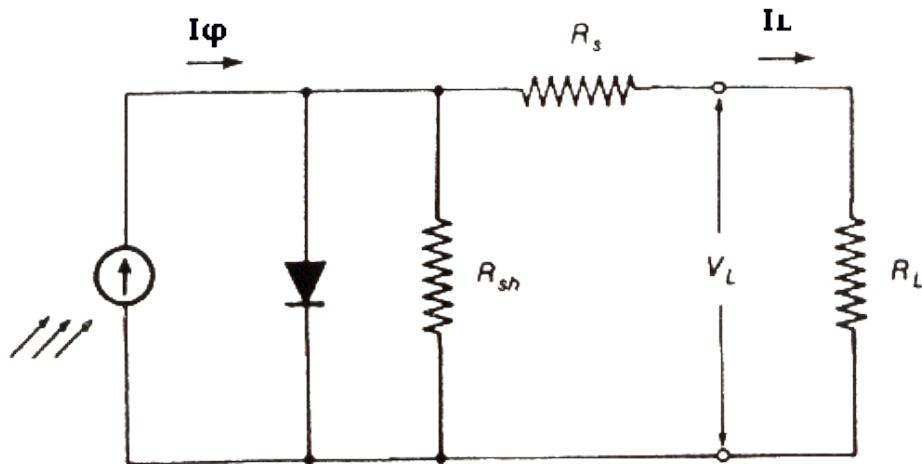
$$\eta = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} = 22\%$$

ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Δηλαδή, μια δέσμη ακτινοβολίας θα προκαλέσει σε ένα στοιχείο την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με μια άλλη ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

6. ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ - ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4 περιγράφει ιδανικές συνθήκες, που δεν υπάρχουν στα πραγματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Μια σωστότερη προσέγγιση αποτελεί το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 6 διότι περιέχει και τις αναπόφευκτες αντιστάσεις R_s (από την αγγλική έκφραση series resistance) που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό (κυρίως στο εμπρός επιφανειακό στρώμα του) και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Ακόμα, επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω επίσης αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} (από την αγγλική έκφραση shunt resistance). Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου η R_s είναι μικρότερη από 5Ω και η R_{sh} είναι μεγαλύτερη από 500Ω .

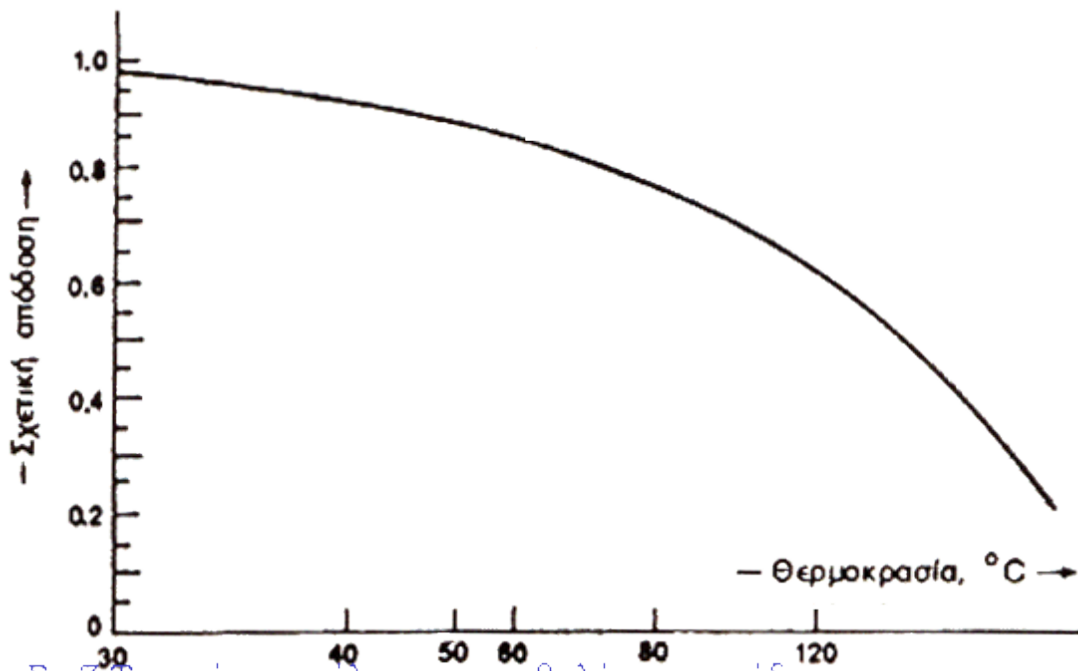


Σχ.6 Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, περιλαμβάνει τις αντιστάσεις R_s , καθώς και τις παράλληλες αντιστάσεις R_{sh}

Πάντως επηρεάζουν αισθητά την τάση V_L και του ρεύματος I_L που διαρρέει το φορτίο του κυκλώματος R_L , με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της απόδοσης του στοιχείου. στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση :

$$I_L[1+(R_s/R_{sh})]=I_\phi-I_o\{\exp[e(V_L-I_LR_s)/\gamma kT]-1\}-V_L/R_{sh}$$

Εκτός από τις αντιστάσεις R_s και R_{sh} , ένας άλλος παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η θερμοκρασία τους. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωση των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρό ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και του FF. Παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Σχήμα 7).



Σχ.7 Τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους. Η κλίμακα του άξονα των τεταγμένων δίνει το ποσοστό της απόδοσης του στοιχείου σε σχέση με την απόδοση του στη συμβατική θερμοκρασία 20 C. Η κλίμακα της θερμοκρασίας στον άξονα των τεταγμένων είναι λογαριθμική

Αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με μια συμβατική θερμοκρασία (π.χ. 20°C) είναι (η), η τιμή του σε μια διαφορετική θερμοκρασία (θ) θα είναι :

$$\eta_{\theta} = \eta_{\theta_{\text{σθ}}}$$

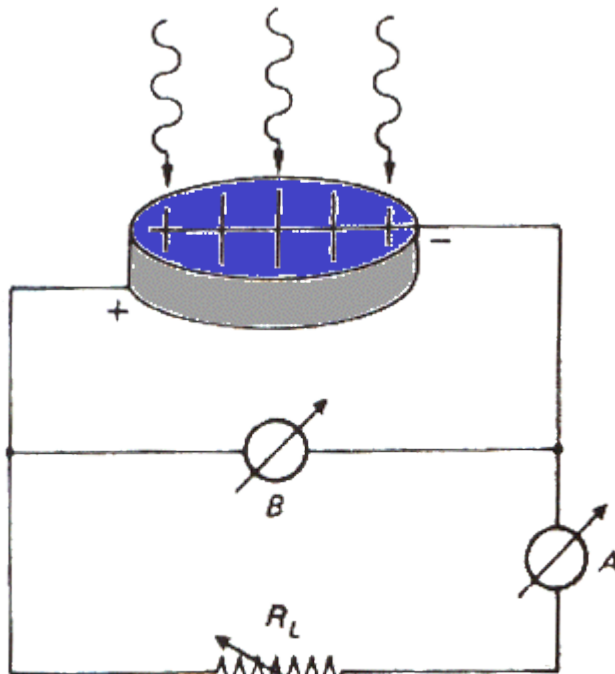
όπου $\theta_{\text{σθ}}$ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασίας διόρθωσης της απόδοσης. Στη συμβατική θερμοκρασία, ο $\theta_{\text{σθ}}$ είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου.

7. Η ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές (συσσωρευτές, ξηρά στοιχεία, ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, μεγάλα δίκτυα διανομής), οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά (και μη γραμμικά) σε συνάρτηση με την ένταση

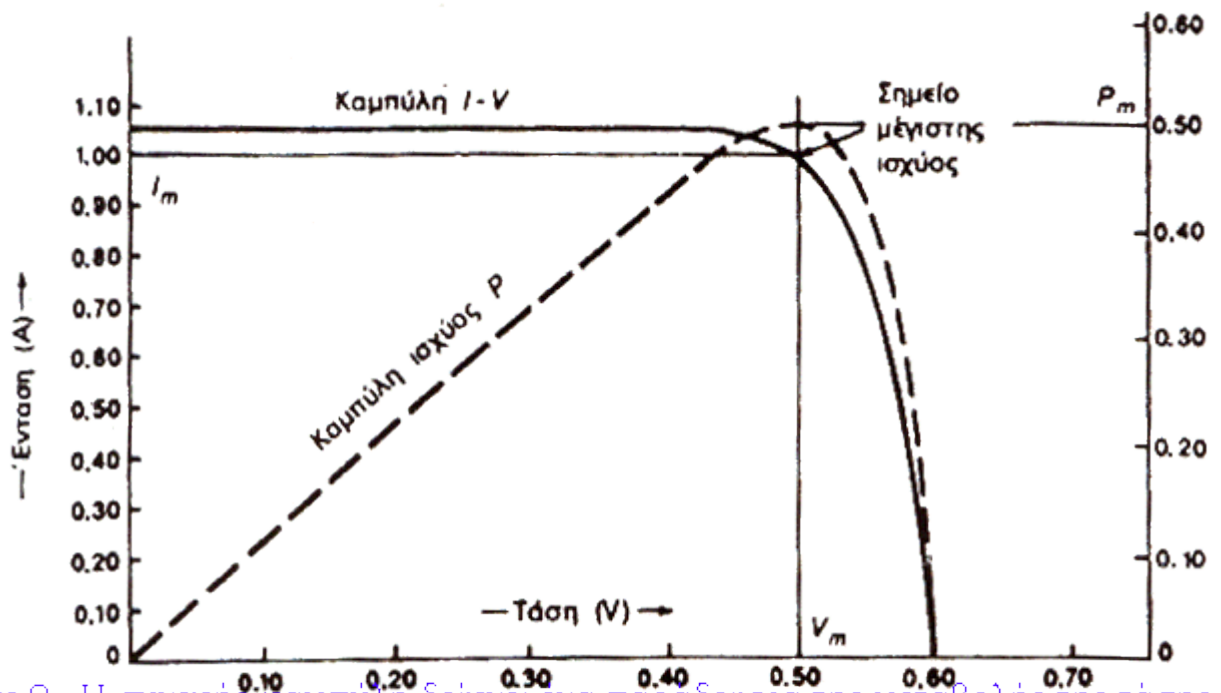
του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή.

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ας εξετάσουμε την συμπεριφορά του όταν οι πόλοι του συνδεθούν με ένα κύκλωμα που περιέχει μεταβλητή αντίσταση (σχήμα 8). Είδαμε παραπάνω ότι όταν η τιμή της αντίστασης είναι μηδέν, δηλαδή στην βραχυκυκλωμένη κατάσταση, η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή I_{sc} , ενώ η τάση θα μηδενιστεί. Αντίθετα, όταν η τιμή της αντίστασης τείνει στο άπειρο, δηλαδή στην ανοικτοκυκλωμένη κατάσταση, μηδενίζεται η ένταση του ρεύματος αλλά η τάση παίρνει την μέγιστη τιμή V_{oc} . Επομένως, στη βραχυκυκλωμένη και ανοικτοκυκλωμένη κατάσταση, η ηλεκτρική ισχύς που παράγει το στοιχείο ($P=IV$) είναι μηδέν, αφού αντίστοιχα είναι μηδενική η τάση, στην πρώτη περίπτωση, και η ένταση του ρεύματος στη δεύτερη.



Σχ.8. Πειραματική διάταξη με ένα βολτόμετρο (B), ένα αμπερόμετρο (A) και μια μεταβλητή αντίσταση (R_L) για τη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος, ανάμεσα στις παραπάνω ακραίες καταστάσεις, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές, όπως δείχνεται στο σχήμα 9. 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 . Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το ζεύγος αυτό καθορίζει, σε σχέση με το ζεύγος τιμών V_{oc} και I_{sc} , το συντελεστή απόδοσης του στοιχείου (η).



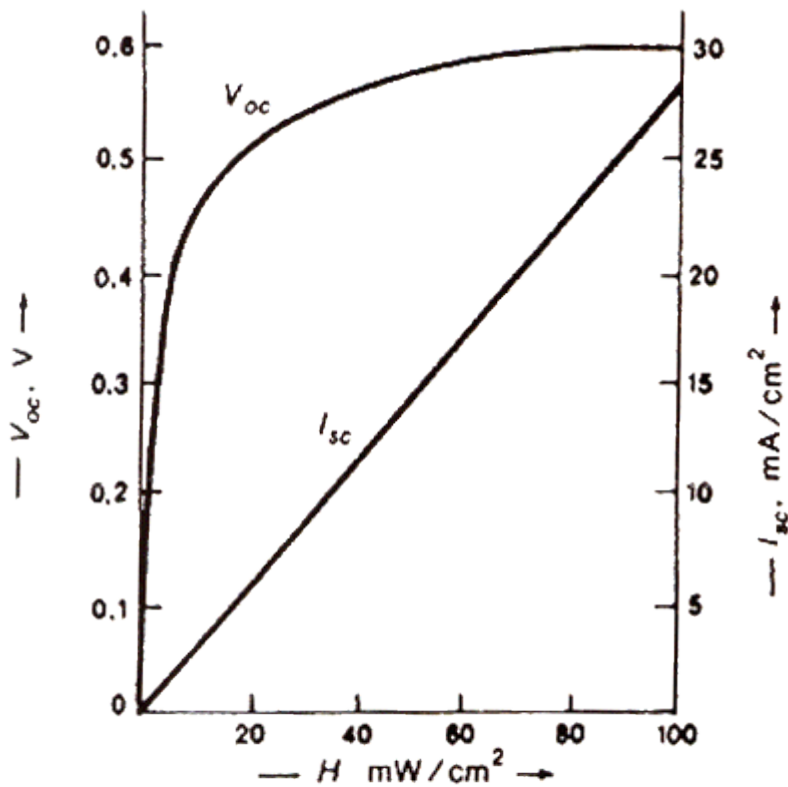
Σχ.9 . Η συνεχής καμπύλη δείχνει ένα παράδειγμα της μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγει ένα Φ/Β στοιχείο πυριτίου, σε συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενη αντίσταση του κυκλώματος από μηδέν (όπου $V=0$) μέχρι άπειρη (όπου $I=0$). Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το Φ/β στοιχείο (η κλίμακα της ισχύος είναι στο δεξιό άξονα του διαγράμματος). V_m και I_m είναι η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ P_m .

Επομένως, από πρακτική άποψη, είναι πολύ σημαντικό η αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο να έχει κατάλληλη τιμή ώστε στις συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας να παράγεται από το στοιχείο η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς.

8. ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

(ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ)

Τα παραπάνω αφορούν σε συνθήκες σταθερής ισχύος της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και σταθερής θερμοκρασίας του. Βλέπουμε όμως το σχήμα 10, ότι η μεταβολή της πυκνότητας της ισχύος της ακτινοβολίας συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή της ανοιχτοκυκλώμενης τάσης και της βραχυκυκλώμενης έντασης του ρεύματος από το μηδέν (για το σκοτάδι) μέχρι τις μέγιστες τιμές τους, για τη μέγιστη ένταση της ακτινοβολίας. Επίσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται αισθητή μείωση ανοιχτοκυκλωμένης τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι θα δημιουργείται πρόβλημα για τη διατήρηση της βελτιστοποίησης της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από ένα ηλιακό φωτοβολταϊκό στοιχείο κατά τη διάρκεια της ημέρας και των εποχών του έτους.

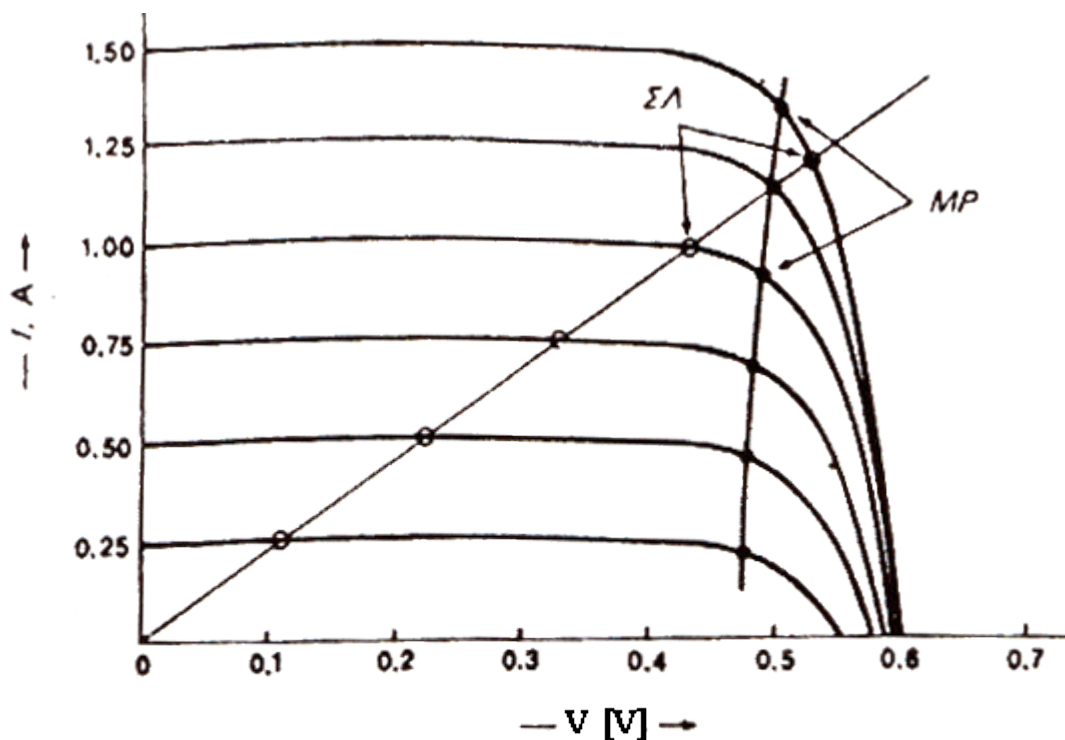


Σχ.10. Η μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης (V_{oc}) και της βραχυκυκλωμένης έντασης του ρεύματος (I_{sc}) ενός Φ/β στοιχείου πυριτίου σε συνάρτηση με την ισχύ της ακτινοβολίας (H) που δέχεται ανά μονάδα της επιφάνειας του.

ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο του παραδείγματος είναι $R_L = V_m / I_m = 0,5 / 1,1 = 0,455 \Omega$. Η αντίσταση όμως αυτή βλέπουμε ότι είναι εντελώς ακατάλληλη για όλες τις άλλες συνθήκες ακτινοβολίας, αφού η ευθεία με κλίση $0,455 \Omega$ τέμνει τις αντίστοιχες καμπύλες $I-V$ σε σημείο διαφορετικό από το σημείο της μέγιστης ισχύος.

Στο σχήμα 11. βλέπουμε ότι για διαφορετικές πυκνότητες της ακτινοβολίας, σχηματίζεται μια οικογένεια μετατοπισμένων καμπυλών έντασης - τάσης. Είναι φανερό ότι π.χ. για την ακτινοβολία που δίνει $I_{sc} = 1,25 \text{ A}$ έχουμε περίπου $I_m = 1,1 \text{ A}$ και $V_m = 0,5 \text{ V}$ και επομένως η κατάλληλη αντίσταση του κυκλώματος για να παράγεται η μέγιστη ηλεκτρική

Πάντως, σε κάθε περίπτωση, λόγω της πολύ μικρής τιμής του ανάστροφου ρεύματος κόρου I_0 , η ένταση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πρακτικά είναι πρακτικά ανάλογη προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται, δηλαδή προς το γινόμενο της έντασης (της πυκνότητας της ισχύος) της ακτινοβολίας επί το εμβαδόν της επιφάνειάς του. Επίσης, από τις διάφορες καμπύλες I-V βλέπουμε ότι, με τη μεταβολή της αντίστασης του κυκλώματος, η ένταση του ρεύματος παραμένει περίπου σταθερή για το μεγαλύτερο τμήμα του διαγράμματος, ενώ μεταβάλλεται ουσιαστικά η τάση. Δηλαδή, το φωτοβολταϊκό στοιχείο συμπεριφέρεται, σε μεγάλο βαθμό, σαν πηγή περίπου σταθερού ρεύματος, με την προϋπόθεση ότι παραμένει σταθερή η πυκνότητα της ακτινοβολίας.



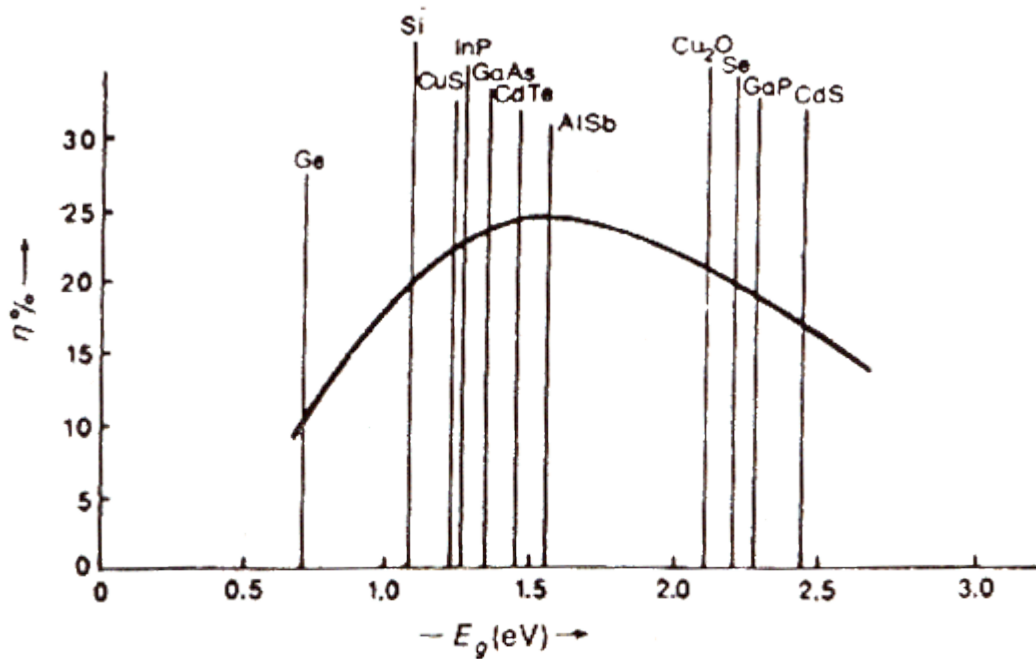
Σχ.11. Η μετατόπιση των σημείων λειτουργίας ($\Sigma\Lambda$) ενός Φ/β στοιχείου πυριτίου και η απομάκρυνση του από τα αντίστοιχα σημεία της μέγιστης ισχύος (MP) της καμπύλης έντασης (I) -τάσης (V) για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά για σταθερή τιμή της αντίστασης του κυκλώματος.

Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και η ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από 3 μεταβλητούς παράγοντες . α) την ένταση της ακτινοβολίας, β) τη θερμοκρασία του στοιχείου, γ) και την αντίσταση του κυκλώματος. Προφανώς, στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων επιδιώκεται οι παράγοντες αυτοί να παίρνουν ευνοϊκές τιμές, ώστε να παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς, όσο επιτρέπει ο συντελεστής απόδοσης των στοιχείων.

9. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΓΙΑ ΗΛΙΑΚΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένας ημιαγωγός μπορεί να απορροφήσει μόνο τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο. Και μάλιστα, από τα φωτόνια αυτά αξιοποιείται φωτοβολταϊκά το μέρος μόνο της ενέργειας τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια μετατρέπεται σε συνήθως ανεπιθύμητη θερμότητα.

Επομένως, η τιμή του ενεργειακού διακένου των ημιαγωγών είναι ένα από τα κυριότερα κριτήρια που καθορίζουν την καταλληλότητα τους, για να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στο σχήμα 12 βλέπουμε λοιπόν ότι οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας (περίπου 25%) μπορούν να πραγματοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5eV.



Σχ.12. Η θεωρητική απόδοση (η) των ηλιακών Φ/β στοιχείων σε συνάρτηση με το ενεργειακό διάκενο (E_g) του ημιαγωγού από τον οποίο είναι κατασκευασμένα. Άλλοι θεωρητικοί υπολογισμοί δίνουν ελαφρά διαφορετικές τιμές για την απόδοση των ίδιων στοιχείων.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό κριτήριο είναι το είδος του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού, δηλαδή αν είναι άμεσο ή έμμεσο. Τα φωτόνια απορροφούνται ευκολότερα στους ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού διακένου και έτσι το φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν χρειάζεται να έχει μεγάλο πάχος με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει μεγάλη εξοικονόμηση υλικού.

π.χ. στο αρσενικούχο γάλιο (GaAs), που είναι ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου, για να απορροφηθεί το 80% των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο (1,43 eV), αρκεί στρώμα πάχους 1 μ m. Αυτό άλλωστε δείχθηκε και στο σχήμα 23, όπου είναι φανερό ότι ο συντελεστής απορρόφησης στο GaAs, για τα φωτόνια που μας ενδιαφέρουν, είναι περίπου 10 ή περισσότερες φορές μεγαλύτερες από του Si.

Άλλα σημαντικά κριτήρια για την αξιολόγηση των ημιαγωγών, αλλά και των υπολοίπων υλικών κατασκευής των ηλιακών στοιχείων, είναι το κόστος της παραγωγής τους, η σταθερότητά τους στην επίδραση των εξωτερικών συνθηκών και κυρίως της υγρασίας και της θερμότητας, η τοξικότητα των διαφόρων συστατικών το ειδικό βάρος κ.λ.π.

Από τα πολλά ημιαγωγικά υλικά που έχουν ως τώρα μελετηθεί για ηλιακή φωτοβολταϊκή μετατροπή, μεγάλη εφαρμογή έχει βρει μόνο το πυρίτιο, αν και άλλοι ημιαγωγοί έχουν δώσει καλύτερες αποδόσεις (πίνακας 5). Πολύ σημαντικές προοπτικές για σύντομη ανάπτυξη έχουν επίσης το θειούχο

κάδμιο (CdS) λόγω χαμηλού κόστους, και το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) λόγω μεγάλης απόδοσης.

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%

Πάντως η ερευνητική αναζήτηση συνεχίζεται έντονη με στόχο την ανακάλυψη και άλλων υλικών , ίσως οργανικής σύστασης, που ενδεχομένως να συνδυάζουν χαμηλό κόστος, εύκολη εφαρμογή και αξιόλογη απόδοση.

Το Φωτοβολταϊκό κύτταρο

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι φτιαγμένα από ειδικά υλικά, όπως το πυρίτιο (το πιο συνηθισμένο προς το παρόν) που λέγονται ημιαγωγοί. Όταν το φως πέσει στο κύτταρο, ένα μέρος του απορροφάται από τον ημιαγωγό. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια του φωτός μεταφέρεται στον ημιαγωγό. Η ενέργεια αυτή ελευθερώνει ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν επίσης ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά πεδία που υποχρεώνουν τα ελευθερωμένα ηλεκτρόνια να κινούνται προς μία κατεύθυνση. Η κίνηση των ηλεκτρονίων είναι το ηλεκτρικό ρεύμα και με την τοποθέτηση μεταλλικών επαφών πάνω και κάτω από το κύτταρο το βγάζουμε για εξωτερική χρήση. Αυτό το ρεύμα μαζί με την τάση του φωτοβολταϊκού κυττάρου (που είναι αποτέλεσμα των ηλεκτρικών πεδίων του κυττάρου) καθορίζει την ισχύ του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγει το κύτταρο.

Αυτή είναι η βασική διαδικασία, αλλά ας δούμε ένα παράδειγμα ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου. Το κύτταρο του κρυσταλλικού πυριτίου.

Το πυρίτιο έχει κάποιες ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες στην κρυσταλλική του μορφή. Ένα άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανομημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι πρώτες δύο, αυτές που είναι πιο κοντά στο κέντρο, είναι συμπληρωμένες (2 και 8). Η εξωτερική όμως έχει μόνο 4 ενώ θα έπρεπε να έχει 8. Γι αυτό μοιράζεται ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα. Είναι σαν κάθε άτομο να κρατάει το χέρι του γείτονά του, μόνο που το κάθε άτομο έχει 4 χέρια. Έτσι τα άτομα συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν την κρυσταλλική μορφή του πυριτίου που είναι πολύ σημαντική για τα φωτοβολταϊκά.

Αυτό είναι το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο. Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού αφού κανένα ηλεκτρόνιο του δεν είναι ελεύθερο να μετακινηθεί όπως τα ηλεκτρόνια στους καλούς αγωγούς σαν το χαλκό. Αντίθετα τα ηλεκτρόνια του είναι κλειδωμένα στην κρυσταλλική δομή του. Το Πυρίτιο σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο τροποποιείται ελαφρά έτσι ώστε να μπορέσει να δουλέψει σαν φωτοβολταϊκό κύτταρο. Το φωτοβολταϊκό κύτταρο έχει και άλλα άτομα αναμειγμένα με άτομα πυριτίου που εισάγονται σκόπιμα. Σκεφθείτε το κρυσταλλικό πυρίτιο με άτομα φωσφόρου εδώ και εκεί, πιθανόν ένα σε κάθε εκατομμύριο άτομα πυριτίου. Ο Φώσφορος έχει 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα και όχι 4 όπως το πυρίτιο. Πάλι συνδέεται με τα γειτονικά του άτομα πυριτίου αλλά ο φώσφορος έχει ένα ηλεκτρόνιο που δεν συνδέεται με κάποιο άλλο. Δεν σχηματίζει δεσμό, αλλά υπάρχει ένα θετικό πρωτόνιο στον πυρήνα του φωσφόρου που το συγκρατεί. Όταν διοχετεύουμε ενέργεια στο καθαρό πυρίτιο, για παράδειγμα με τη μορφή θερμότητας, μερικά ηλεκτρόνια σπάζουν τους δεσμούς τους και φεύγουν από τα άτομά τους. Τότε δημιουργείται μια κενή θέση στο άτομο. Αυτά τα ηλεκτρόνια περιφέρονται τυχαία μέσα στο κρυσταλλικό πυρίτιο ψάχνοντας να μπουν σε μια άλλη θέση. Έτσι μεταφέρουν την ενέργεια (ηλεκτρικό ρεύμα). Είναι όμως τόσο λίγα που δεν είναι πολύ χρήσιμα. Το πυρίτιο όμως με άτομα φωσφόρου είναι κάτι διαφορετικό. Χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για να ελευθερωθεί το επιπλέον ηλεκτρόνιο του φωσφόρου αφού αυτό δεν σχηματίζει δεσμό με άλλο - τα γειτονικά ηλεκτρόνια δεν το συγκρατούν. Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται και γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η διαδικασία μίξης ατόμων κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί πυρίτιο που ονομάζεται πυρίτιο τύπου N (Negative, Αρνητικό) εξαιτίας της υπεροχής του αριθμού των ηλεκτρονίων και είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος.

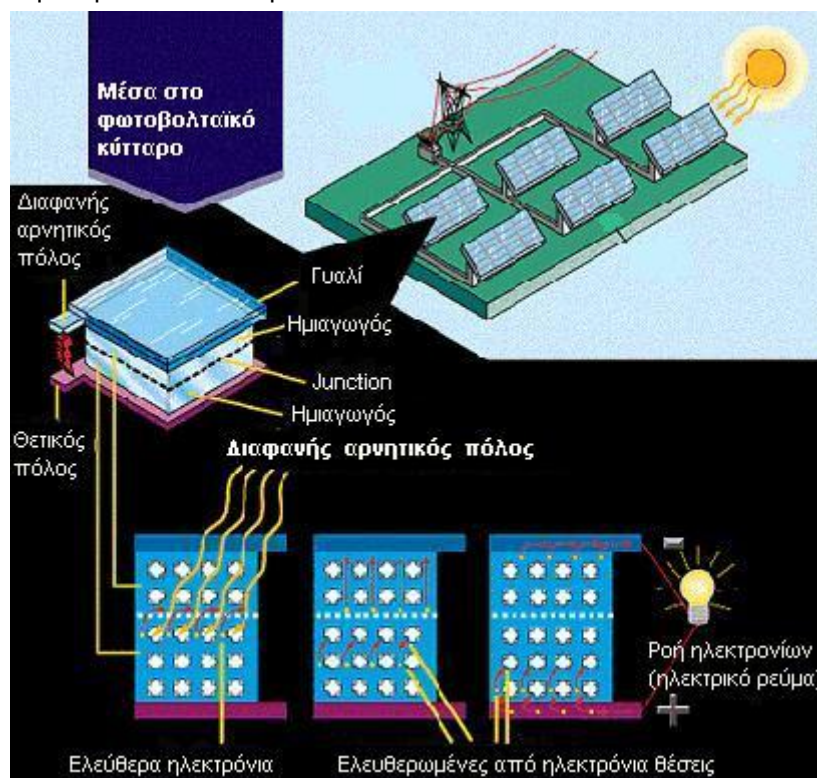
Στην πραγματικότητα μόνο ένα μέρος του φωτοβολταϊκού κυττάρου είναι πυρίτιο τύπου N. Το άλλο μέρος είναι ανάμειξη κρυσταλλικού πυριτίου με Βόριο το οποίο έχει μόνο 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα αντί για 4, και μετατρέπεται σε πυρίτιο τύπου P. Αντί να έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια το πυρίτιο τύπου P (Positive, θετικό) έχει ελεύθερες θέσεις. Οι θέσεις αυτές είναι ουσιαστικά απουσία ηλεκτρονίων, και έτσι μεταφέρουν αντίθετο φορτίο (θετικό) και περιφέρονται όπως και τα ηλεκτρόνια.

Το ενδιαφέρον μέρος αρχίζει όταν τοποθετούμε μαζί πυρίτιο τύπου N και P. Το φωτοβολταϊκό κύτταρο έχει τουλάχιστον ένα ηλεκτρικό πεδίο. Χωρίς ηλεκτρικό πεδίο το κύτταρο δεν θα δούλευε. Αυτό το πεδίο σχηματίζεται όταν πυρίτιο τύπου N και P έρχονται σε επαφή. Ξαφνικά τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου N που ψάχνουν για ελεύθερες θέσεις βλέπουν τις κενές

θέσεις στο πυρίτιο τύπου P και τρέχουν να τις καλύψουν.

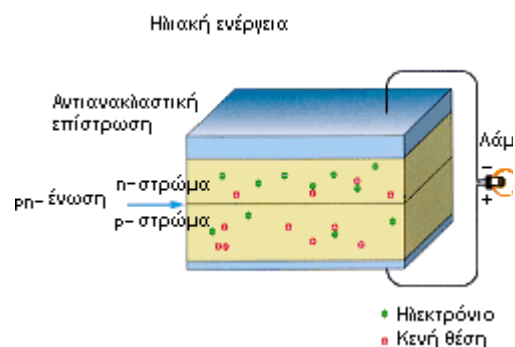
Στην αρχή το πυρίτιο ήταν ηλεκτρικά ουδέτερο. Τα επιπλέον ηλεκτρόνια ισορροπούσαν με τα επιπλέον πρωτόνια του φωσφόρου. Οι κενές θέσεις ισορροπούσαν με την έλλειψη πρωτονίων του βορίου. Όταν οι κενές θέσεις και τα ηλεκτρόνια αναμειγνύονται στην ένωση πυριτίου P και N η ισορροπία ανατρέπεται. Όμως όλα τα ηλεκτρόνια συμπληρώνουν τις κενές θέσεις; Όχι. Αν συνέβαινε αυτό τα φωτοβολταϊκά κύτταρα δεν θα ήταν πολύ χρήσιμα. Στην ένωση αναμειγνύονται και σχηματίζουν φράγμα κάνοντας όλο και πιο δύσκολο στα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου N να περάσουν στο πυρίτιο P. Τελικά επιτυγχάνεται η ισορροπία και έχουμε ηλεκτρικό πεδίο που χωρίζει τις δύο πλευρές.

Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας (ακόμη και σπρώχνοντας) τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο P στο N αλλά όχι αντίστροφα. Όπως σε ένα λόφο - τα ηλεκτρόνια μπορούν να κατεβούν το λόφο (στην πλευρά N) αλλά δεν μπορούν να ανέβουν (στην πλευρά P). Έτσι έχουμε ηλεκτρικό πεδίο που λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο στο οποίο τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν σε μια μόνο κατεύθυνση. Ας δούμε τι συμβαίνει όταν το φως πέφτει σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο.



Όταν το φως, με μορφή φωτονίων, πέφτει σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο η ενέργειά του ελευθερώνει ηλεκτρόνια και θέσεις. Κάθε φωτόνιο με αρκετή ενέργεια φυσιολογικά θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο και θα δημιουργήσει μια κενή θέση. Αν αυτό συμβεί κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο ή αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια ελεύθερη θέση βρεθούν κοντά το πεδίο θα στείλει το ηλεκτρόνιο στο πυρίτιο N και την κενή θέση στο πυρίτιο P. Αυτό προκαλεί μεγαλύτερη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα και αν χρησιμοποιήσουμε μια εξωτερική οδό τα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να πάνε στην αρχική τους θέση που το ηλεκτρικό πεδίο απομάκρυνε. Η ροή αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί την τάση του ρεύματος. Με ρεύμα και τάση έχουμε ηλεκτρικό ρεύμα που είναι παράγωγο αυτών των δύο.

Το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι



το 25% της ενέργειας που δέχεται αλλά το πιο συνηθισμένο ποσοστό είναι λιγότερο από 15%. Γιατί όμως τόσο λίγο; Το ορατό φως είναι μόνο ένα μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική. Αποτελείται από διαφορετικά μήκη κυμάτων, άρα και από διαφορετικά επίπεδα ενέργειας.

Εφόσον το φως που πέφτει στο κύτταρο μεταφέρει διαφορετικά επίπεδα ενέργειας κάποια από αυτά δεν θα έχουν αρκετή ενέργεια για να μπορέσουν να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια. Απλά θα περάσουν μέσα από το κύτταρο σαν να ήταν αυτό διαφανές. Μόνο ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, το οποίο εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κύτταρο, απαιτείται για να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Μερικά φωτόνια έχουν περισσότερη ενέργεια από ότι χρειάζεται για την απόσπαση ενός ηλεκτρονίου. Η επιπλέον ενέργεια χάνεται εκτός και αν η ενέργεια του φωτονίου είναι διπλάσια από την απαιτούμενη και ελευθερώσει δύο ηλεκτρόνια.

Γιατί όμως να μή χρησιμοποιήσουμε ένα υλικό που να απαιτεί λιγότερη ενέργεια για την απελευθέρωση των ηλεκτρονίων; Δυστυχώς αυτό θα εξασθενούσε το ηλεκτρικό πεδίο και ό,τι θα κερδίζαμε σε ενέργεια θα το χάναμε σε τάση.