

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ - ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤ/ΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ  
157 80 ΑΘΗΝΑ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF  
ATHENS- SCHOOL OF APPLIED  
MATHEMATICAL AND PHYSICAL  
SCIENCES -DEPARTMENT OF PHYSICS  
ZOGRAFOU CAMPUS  
157 80 ATHENS - GREECE

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

# ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Ι. ΚΑΛΠΥΡΗΣ

Α. ΦΛΩΡΑΚΗΣ



## ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπός της άσκησης είναι η εξοικίωση των φοιτητών με τις φωτοβολταϊκές διατάξεις μέσω κάποιων βασικών μετρήσεων χαρακτηρισμού της ισχύος του στοιχείου. Για τον φωτισμό του ηλιακού συλλέκτη χρησιμοποιείται ειδικός λαμπτήρας Xe, το φάσμα εκπομπής του οποίου προσομοιάζει αυτό του ηλιακού φωτός. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η αναπαράσταση της λειτουργίας ενός συνηθισμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον και χωρίς να εξαρτάται η διεξαγωγή της άσκησης από τα επίπεδα ηλιοφάνειας. Παράλληλα, οι φοιτητές θα είναι σε θέση να αντιληφθούν την εξάρτηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου από διάφορες παραμέτρους οι οποίοι διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο και στις πραγματικές φωτοβολταϊκές διατάξεις

## ΘΕΩΡΙΑ

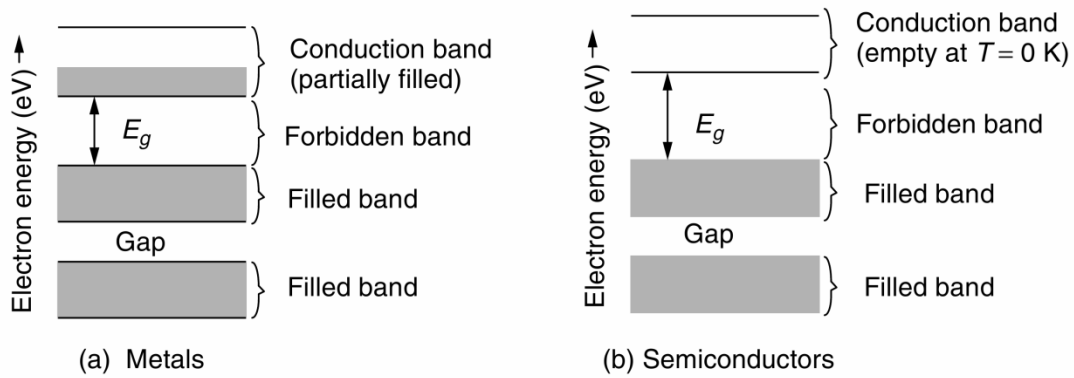
### Εισαγωγή

Η ιστορία των φωτοβολταϊκών ξεκινά το 1839 όταν ο 19-χρονος Γάλλος φυσικός Edmund Becquerel, κατάφερε να εμφανίσει τάση φωτίζοντας ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο μέσα σε ασθενές ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Σαράντα χρόνια αργότερα οι Adams και Day ήταν οι πρώτοι που μελέτησαν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στα στερεά. Κατασκεύασαν φωτοβολταϊκά στοιχεία από Σελήνιο με απόδοση 1% ως 2%.

Τις δεκαετίες του '40 και του '50, μετά την ανάπτυξη της τεχνολογίας παραγωγής τέλειων κρυστάλλων πυριτίου από τον Czochralski, άρχισαν να κατασκευάζονται τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται ευρέως μέχρι και σήμερα αν και πλέον έχουν αναπτυχθεί και νέες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών (π.χ πολυ-κρυσταλλικό πυρίτιο, άμορφο πυρίτιο).

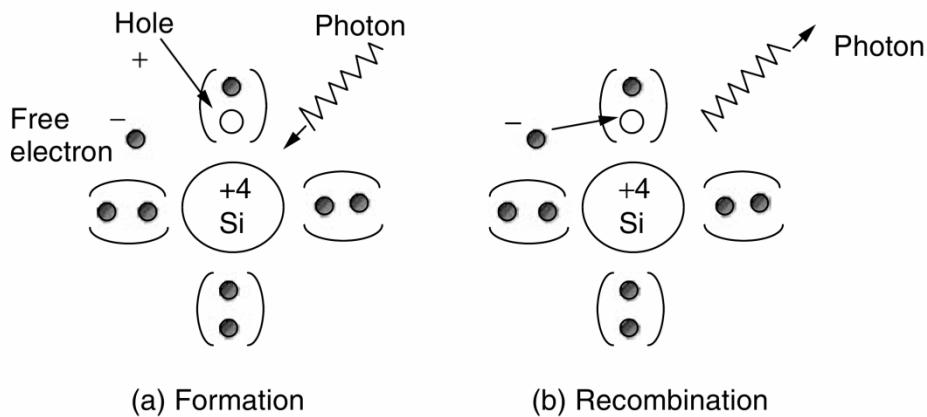
### Ημιαγωγοί

Ημιαγωγοί ονομάζονται τα υλικά, που κάτω από ορισμένες συνθήκες (π.χ. πρόσπτωση φωτός, σχετικά αυξημένη θερμοκρασία κλπ.) άγουν. Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία τα μέταλλα οι ημιαγωγοί και οι μονωτές μπορούν να περιγραφούν με τη χρήση ενεργειακών διαγραμμάτων (Εικόνα 1). Οι ενέργειες των ηλεκτρονίων βρίσκονται μέσα σε συγκεκριμένες επιτρεπόμενες ενεργειακές ζώνες. Η ανώτερη ζώνη ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε αυτή είναι αυτά τα οποία συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα, και η τελευταία συμπληρωμένη ονομάζεται ζώνη σθένους. Τα διάκενα μεταξύ των επιτρεπόμενων ζωνών ονομάζονται απαγορευμένες ζώνες, εκ των οποίων η σημαντικότερη είναι αυτή ανάμεσα στη ζώνη σθένους και τη ζώνη αγωγιμότητας. Το ύψος της ζώνης αυτής είναι αυτό που καθορίζει την ενέργεια που πρέπει να προσλάβει ένα ηλεκτρόνιο ώστε να μεταπηδήσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Την ονομάζουμε ενεργειακό χάσμα και συμβολίζεται με  $E_g$ .



Εικόνα 1: Ενεργειακό διάγραμμα α) για τα μέταλλα και β) για τους ημιαγωγούς.

Το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου είναι 1,12 eV, και είναι η ενέργεια που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στην εξωτερική στοιβάδα για να απελευθερωθεί από τον πυρήνα του, δηλαδή να μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας. Ένας τρόπος για να συμβεί αυτό είναι μέσω ακτινοβολήσης. Όταν ένα ή περισσότερα φωτόνια με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη του 1,12 eV απορροφηθούν από ένα ημιαγωγό τότε ηλεκτρόνια αποκτούν την απαραίτητη ενέργεια ώστε να περάσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόνια που περνούν στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνουν ένα φορέα θετικού φορτίου τον οποίο ονομάζουμε οπή. Αν δεν υπάρξει κάποιος τρόπος να μεταφερθούν τα ηλεκτρόνια μακριά από τις οπές αυτά θα επανασυνδεθούν και η ενέργεια του ηλεκτρονίου θα αποδοθεί ως φωτεινή ακτινοβολία.



Εικόνα 2: α) Δημιουργία ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου β) Επανασύνδεση ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου

Τα φωτόνια μπορούν να χαρακτηριστούν από το μήκος κύματος ή την συχνότητα τους καθώς και από την ενέργεια. Αυτά τα μεγέθη συνδέονται με τις σχέσεις:

$$c = \lambda \nu$$

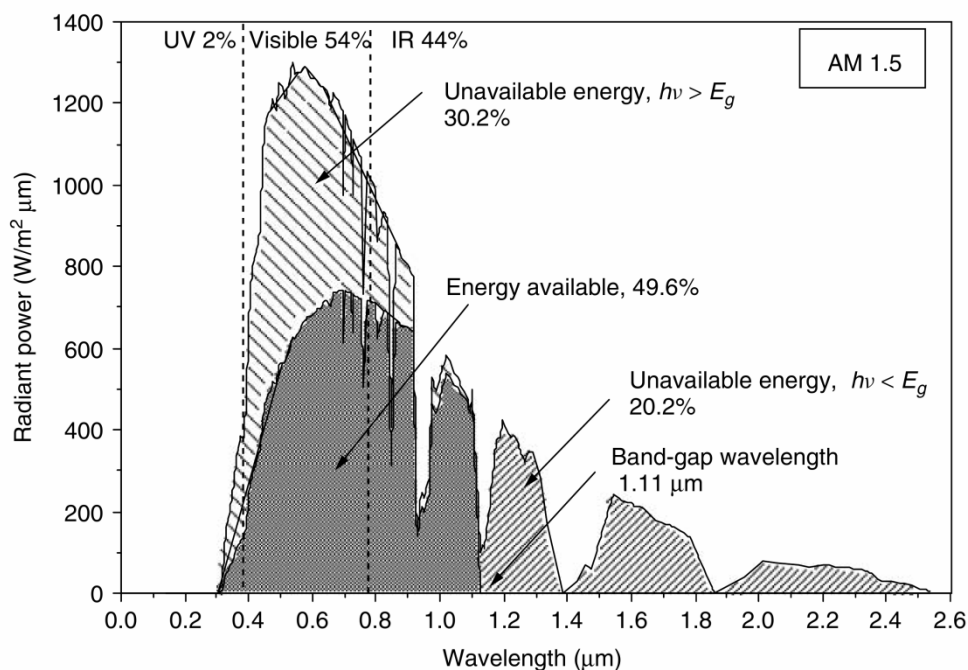
όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός ( $3 \times 10^8$  m/s),  $\nu$  η συχνότητα (hertz),  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος,

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

όπου  $E$  η ενέργεια ενός φωτονίου (J) και  $h$  η σταθερά του Planck ( $6.626 \cdot 10^{-34}$  J/s). Άρα στην περίπτωση του πυριτίου που έχει ενεργειακό χάσμα 1,12 eV τα φωτόνια με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 1,11 μm δεν έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να δημιουργήσουν ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου και έτσι η ενέργεια τους χάνεται απλά θερμαίνοντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Για τα φωτόνια με μήκος κύματος μικρότερο των 1,11 μm τα φωτόνια έχουν περισσότερη ενέργεια απ' όση απαιτείται. Και σε αυτή την περίπτωση εφόσον κάθε φωτόνιο μπορεί να δημιουργήσει μόνο ένα ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου η πλεονάζουσα ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική.

## Ηλιακό φάσμα.

Η επιφάνεια του ήλιου εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία με φασματικά χαρακτηριστικά τα οποία μοιάζουν με αυτά μέλαν σώματος στους 5800 K. Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης όμως, είναι αρκετά διαφορετική από την αρχικά εκπεμπόμενη, γιατί καθώς διέρχεται από την ατμόσφαιρα, μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τα διάφορα στρώματα της. Επομένως, η ένταση και φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη εξαρτάται από τη διαδρομή που διένυσε μέσα στην ατμόσφαιρα μέχρι να φτάσει στη επιφάνεια. Το πηλίκο της διαδρομής που ακολούθησαν οι ακτίνες του ηλίου μέσα από την ατμόσφαιρα μέχρι να φτάσουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια με το μήκος που αντιστοιχεί στη διαδρομή που θα ακολουθούσαν αν ο ήλιος ήταν ακριβώς πάνω από το σημείο αυτό ονομάζεται Air mass ratio. Άρα air mass ratio 1 (συμβολίζεται με AM1) σημαίνει πως ο ήλιος είναι ακριβώς από πάνω, AM0 σημαίνει ότι δεν έχουμε ατμόσφαιρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις για τη μελέτη των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιείται το AM1,5 που αντιστοιχεί στον ήλιο να βρίσκεται 42° πάνω από τον ορίζοντα.

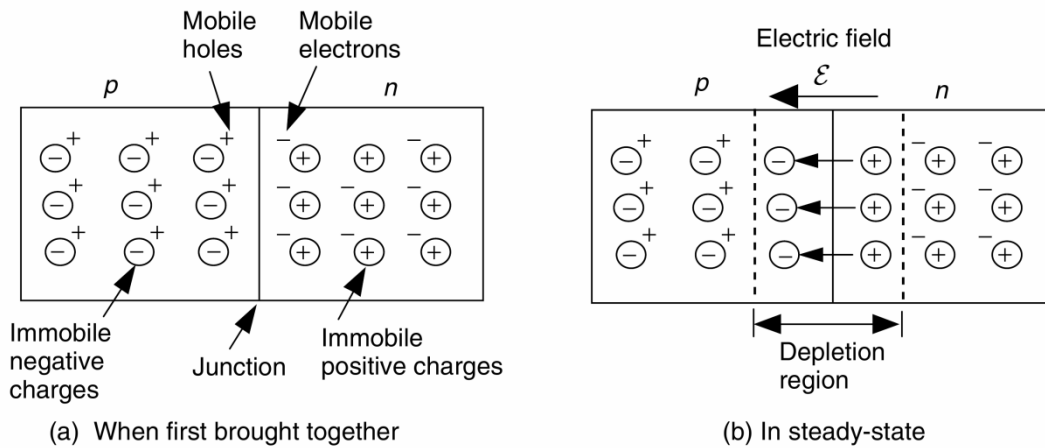


Εικόνα 3: Ηλιακό φάσμα στο AM1,5 (γωνία πρόπτωσης ηλιακών ακτίνων 42° σε σχέση με τον ορίζοντα)

## Επαφή p-n.

Όπως έχει είδη αναφερθεί ένα από τα προβλήματα που εμφανίζεται στους ημιαγωγούς είναι πως το ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου που δημιουργείται να επανασυνδεθεί και να χαθούν και οι δυο φορείς. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνεται με τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον ημιαγωγό το οποίο θα ωθεί τα ηλεκτρόνια προς τη μία κατεύθυνση και τις οπές προς την αντίθετη.

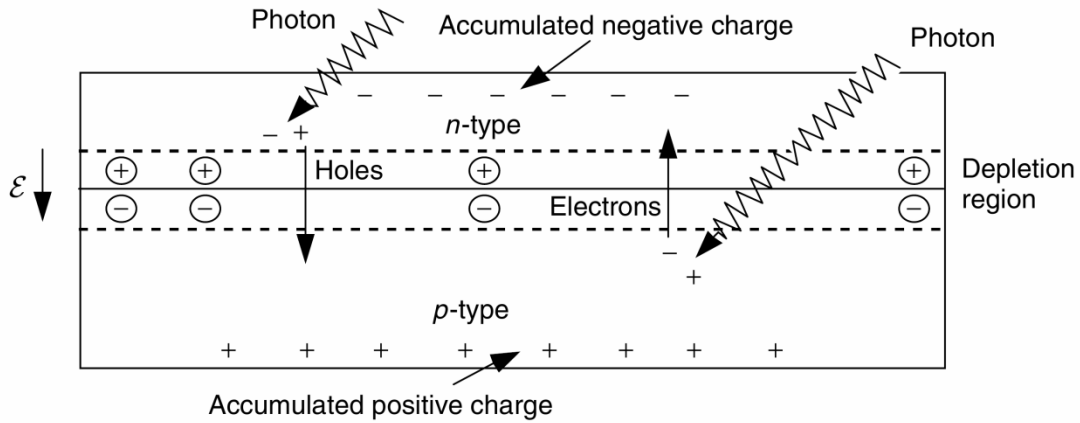
Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει μέσα στον κρύσταλλο να δημιουργηθούν δυο διαφορετικές περιοχές. Το καθαρό πυρίτιο νοθεύεται με τριπολικά και πενταπολικά άτομα για να μετατραπεί σε τύπου "p" ή τύπου "n" ημιαγωγός. Η συγκέντρωση αυτών των προσμίξεων και στις δυο περιπτώσεις είναι πολύ μικρή αλλά αρκεί ώστε να αλλάξει τα χαρακτηριστικά του πυριτίου. Αν φέρουμε σε επαφή ένα p και ένα n ημιαγωγό δημιουργούμε μια διεπαφή. Οι φορείς από τις δυο διαφορετικές περιοχές διαχέονται από τη μια στην άλλη και στην περιοχή της επαφής δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο σταματά τη διάχυση. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης, το πλάτος της είναι περίπου 1  $\mu\text{m}$ . Αυτό το πεδίο είναι που διαχωρίζει τα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων στέλνοντας οπές στην p-περιοχή και ηλεκτρόνια στην n-περιοχή.



Εικόνα 4: Επαφή p-n (a) μόλις έχουν έρθει σε επαφή (b) σε κατάσταση ισορροπίας

## Φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Ας δούμε τώρα τι συμβαίνει σε μία επαφή p-n όταν αυτή εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία. Καθώς τα φωτόνια απορροφούνται δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Αν οι φορείς αυτοί πλησιάσουν την περιοχή της επαφής το ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει στη περιοχή απογύμνωσης θα ωθήσει τις οπές προς την p-περιοχή και τα ηλεκτρόνια προς την n-περιοχή. Κατ' αυτό τον τρόπο, ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στην περιοχή-n και οπές στην περιοχή-p και δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ρεύματος.



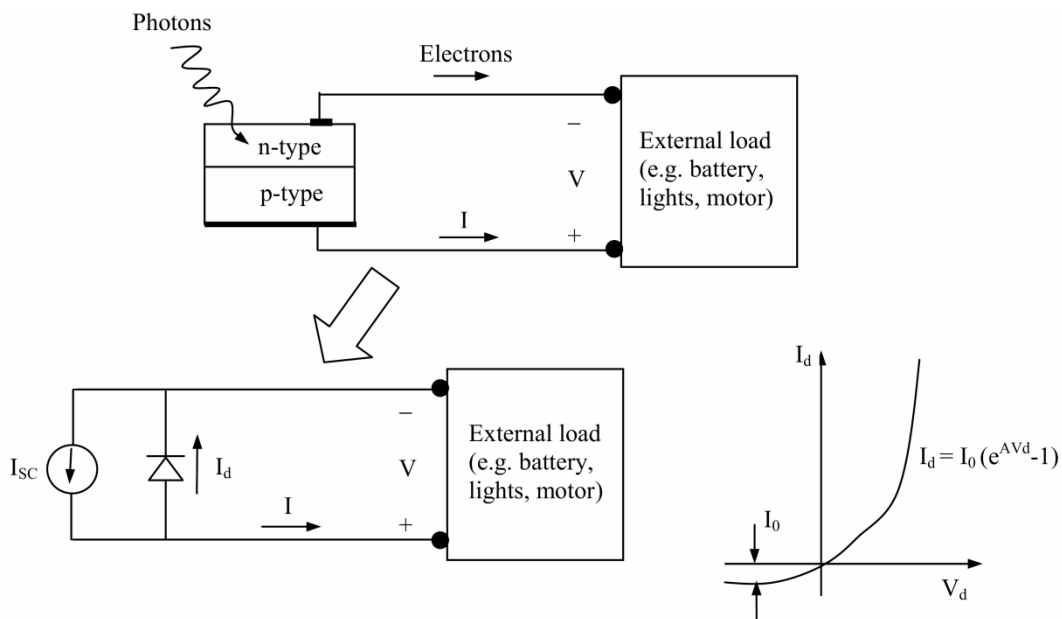
Εικόνα 5: Επαφή p-n

Αν στην επαφή p-n προσθέσουμε πάνω και κάτω ηλεκτρόδια και συνδέσουμε και ένα φορτίο τότε ηλεκτρόνια θα κινηθούν από τη περιοχή -n μέσω του φορτίου που έχει συνδεθεί προς την περιοχή -p όπου επανασυνδέονται με τις οπές.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται από μια δίοδο συνδεμένη παράλληλα με ιδανική πηγή ρεύματος (Εικόνα 6). Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος της διόδου (Εικόνα 6) περιγράφεται από την εξίσωση Shockley

$$I_d = I_0 (e^{qV_d/kT} - 1)$$

Όπου  $V_d$  η τάση στα άκρα της διόδου σε ορθή πόλωση,  $I_0$  το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης  $k$  η σταθερά του Boltzmann,  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $T$  η θερμοκρασία της διόδου.



Εικόνα 6: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού

Για τη μελέτη και του χαρακτηρισμό ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αλλά και για το ισοδύναμο κύκλωμά του, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν δυο συνθήκες. Αυτές είναι α) το ρεύμα που περνά αν βραχυκυκλώσουμε τα δυο ηλεκτρόδια του στοιχείου (ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{SC}$ ) και β) η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων όταν δεν είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους (τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$ ). Στο ισοδύναμο κύκλωμα με βραχυκυκλωμένους ακροδέκτες δεν περνά καθόλου ρεύμα από τη δίοδο οπότε καθώς  $V_D=0$  άρα όλο το ρεύμα περνά από το βραχυκύκλωμα κάτι που σημαίνει πως το  $I_{SC}$  ισούται με το ρεύμα που δίνει η πηγή ρεύματος.

$$I = I_{SC} - I_d$$

Αντικαθιστούμε στην παραπάνω σχέση την εξίσωση Shockley

$$I = I_{SC} - I_0 \left( e^{qV_D/kT} - 1 \right)$$

Βλέπουμε πως ο δεύτερος όρος της νέας εξίσωσης είναι η εξίσωση διόδου με ένα μείον μπροστά.

Στην περίπτωση του ανοιχτού κυκλώματος  $I = 0$  οπότε λύνουμε την προηγούμενη εξίσωση ως προς τη τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$ .

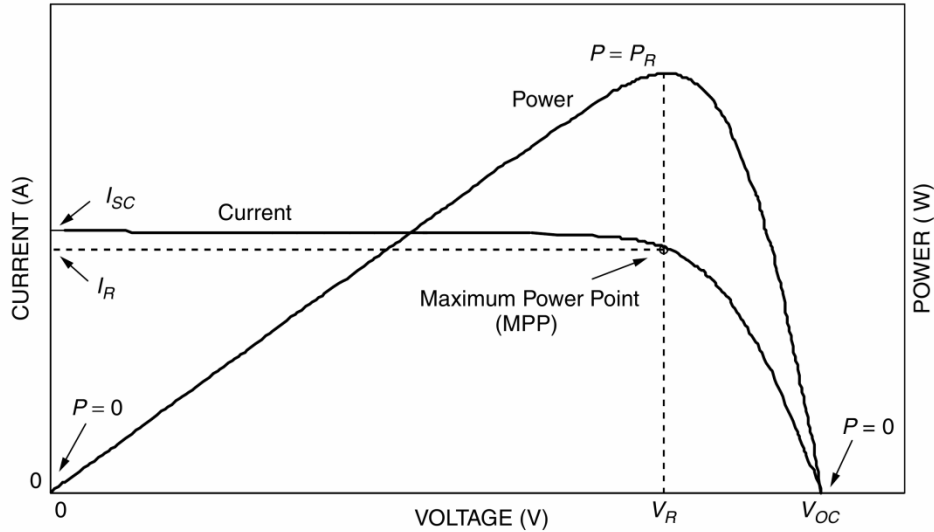
$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right)$$

Και για τις δυο αυτές περιπτώσεις γίνεται αντιληπτό πως το  $I_{SC}$  είναι ανάλογο της φωτεινής ακτινοβολίας που φτάνει στο φωτοβολταϊκό οπότε μπορούμε εύκολα να σχεδιάσουμε καμπύλες  $I - V$  για διαφορετικές εντάσεις της ακτινοβολίας. Επίσης σε πολλές περιπτώσεις, εργαστηριακές προδιαγραφές για την απόδοση των φωτοβολταϊκών δίνονται ανά  $cm^2$  της επιφάνειας της επαφής. Στην περίπτωση αυτή τα ρεύματα στις προηγούμενες εξισώσεις γράφονται ως πυκνότητες ρεύματος.

Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε την ισχύ του φωτοβολταϊκού δεν αρκούν οι δυο παραπάνω περιπτώσεις καθώς, εφόσον δεν υπάρχει φορτίο συνδεδεμένο με το φωτοβολταϊκό είτε η τάση είτε το ρεύμα είναι μηδέν οπότε και η ισχύς είναι μηδέν. Συνδέοντας ένα φορτίο στο φωτοβολταϊκό τότε πλέον έχουμε τιμή και για την τάση και για το ρεύμα οπότε ισχύς αποδίδεται στο φορτίο. Για να βρούμε επομένως την ισχύ πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας και την χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού αλλά κι την  $I - V$  του φορτίου.

Από την  $I - V$  της εικόνας 7, μπορούμε να δούμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού μεταξύ των οποίων είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$  και το ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{SC}$ . Επίσης βλέπουμε και το γινόμενο τάσης και ρεύματος, την ισχύ δηλαδή που παράγεται από το φωτοβολταϊκό. Στα δυο άκρα της  $I-V$  η ισχύς εξόδου είναι μηδέν, ενώ η μέγιστη τιμή της είναι πολύ κοντά στο «γόνατο» της  $I-V$  όπου το γινόμενο ρεύμα-τάση γίνεται μέγιστο. Το σημείο αυτό ονομάζεται Maximum power point (MPP) ενώ η τάση και το ρεύμα σε αυτό το σημείο  $V_m$  και  $I_m$  ή  $V_R$  και  $I_R$  σε ειδικές περιπτώσεις και αντιστοιχούν σε ιδανικές συνθήκες μέτρησης.

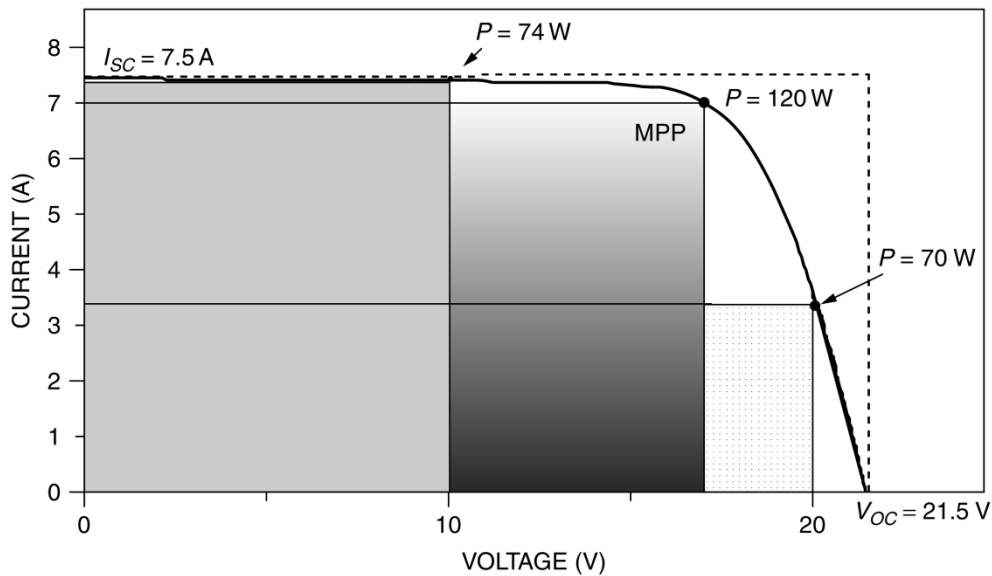




Εικόνα 7: Καμπύλες I-V και P-V

Ένας άλλος τρόπος να προσδιορίσουμε το MPP είναι βρίσκοντας το μεγαλύτερο παραλληλόγραμμο που χωράει κάτω από την I - V. Στην Εικόνα 8 βλέπουμε πως οι 2 πλευρές του παραλληλόγραμμου αντιστοιχούν στη τάση και το ρεύμα οπότε το εμβαδό είναι η ισχύς. Μια ακόμα ποσότητα η οποία χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού είναι το fill factor (FF). Ως fill factor ονομάζουμε το λόγο της ισχύς στο MPP προς το γινόμενο  $V_{oc}$  και  $I_{sc}$ .

$$Fill\ Factor = \frac{Iσχύς\ στο\ MPP}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_R I_R}{V_{oc} I_{sc}}$$



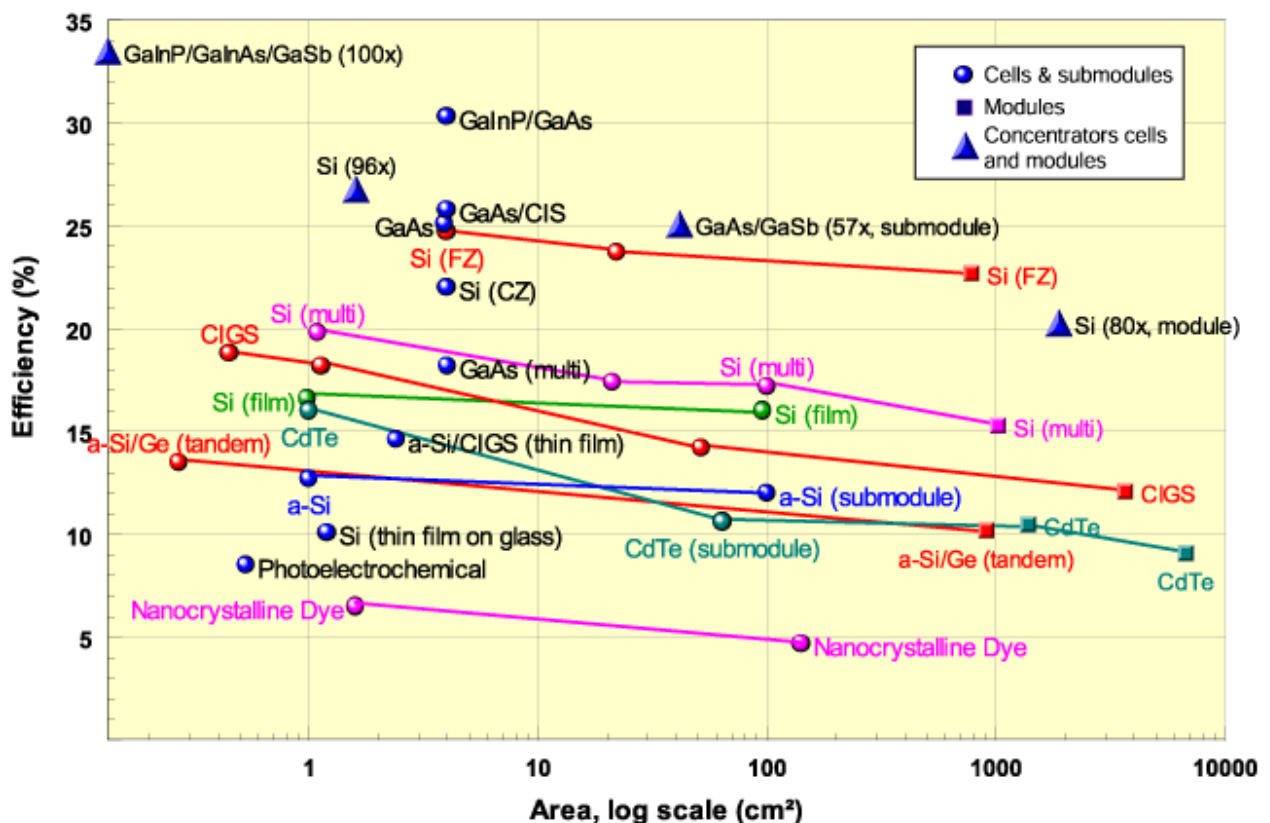
Εικόνα 8 Διάγραμμα προσδιορισμού του MPP

Η απόδοση είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη παράμετρος για τη σύγκριση μεταξύ διαφόρων φωτοβολταϊκών. Η απόδοση καθορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που αποδίδει ένα φωτοβολταϊκό προς την ισχύ που λαμβάνει από τον ήλιο.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}}$$

Ένα πρόβλημα που προκύπτει είναι πως η απόδοση με αυτή τη μορφή δεν εξαρτάται μόνο από το εκάστοτε φωτοβολταϊκό στοιχείο με το οποίο κάνουμε τις μετρήσεις αλλά επηρεάζεται από το φάσμα και την ένταση της ακτινοβολίας καθώς και από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού.

Από τα προηγούμενα γίνεται αντιληπτό πως υπάρχει ανάγκη για τον καθορισμό κάποιων στάνταρ συνθηκών χαρακτηρισμού των φωτοβολταϊκών καθώς η I - V τους μετατοπίζεται με τις αλλαγές της ακτινοβολίας ή της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες όλοι οι κατασκευαστές τεστάρουν τα φωτοβολταϊκά περιλαμβάνουν ηλιακή ακτινοβολία  $1\text{ kW / m}^2$  (1 ήλιος) με φασματική διασπορά που να αντιστοιχεί σε air mass ratio 1,5 (AM1,5) και σταθερή θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου στους  $25^\circ\text{C}$ .



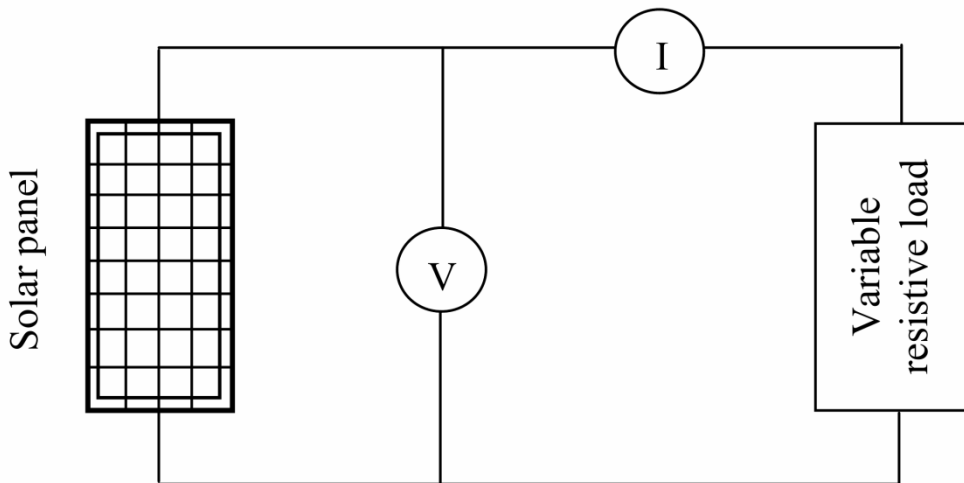
Εικόνα 9 Διάγραμμα απόδοσης διαφόρων τύπων-τεχνολογιών φωτοβολταϊκών στοιχείων.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### Πειραματική διάταξη

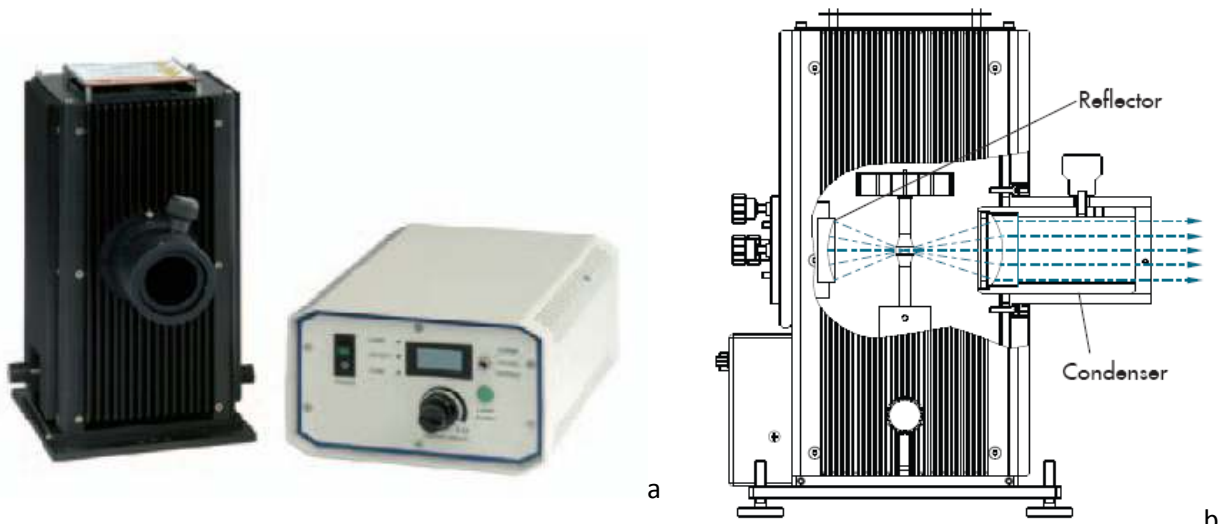
Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Φωτοβολταϊκό στοιχείο  $13 \times 7 \text{cm}^2$  και ονομαστικής ισχύος 1,14 Watt.
- Solar simulator
- Ένα πολύμετρο που θα χρησιμοποιηθεί ως βολτόμετρο
- Ένα SourceMeter Keithley 2400 που θα χρησιμοποιηθεί ως αμπερόμετρο
- Μια μεταβλητή αντίσταση από  $1\Omega$  έως  $5\text{k}\Omega$  (ποτενσιόμετρο)
- Καλώδια για τις συνδέσεις



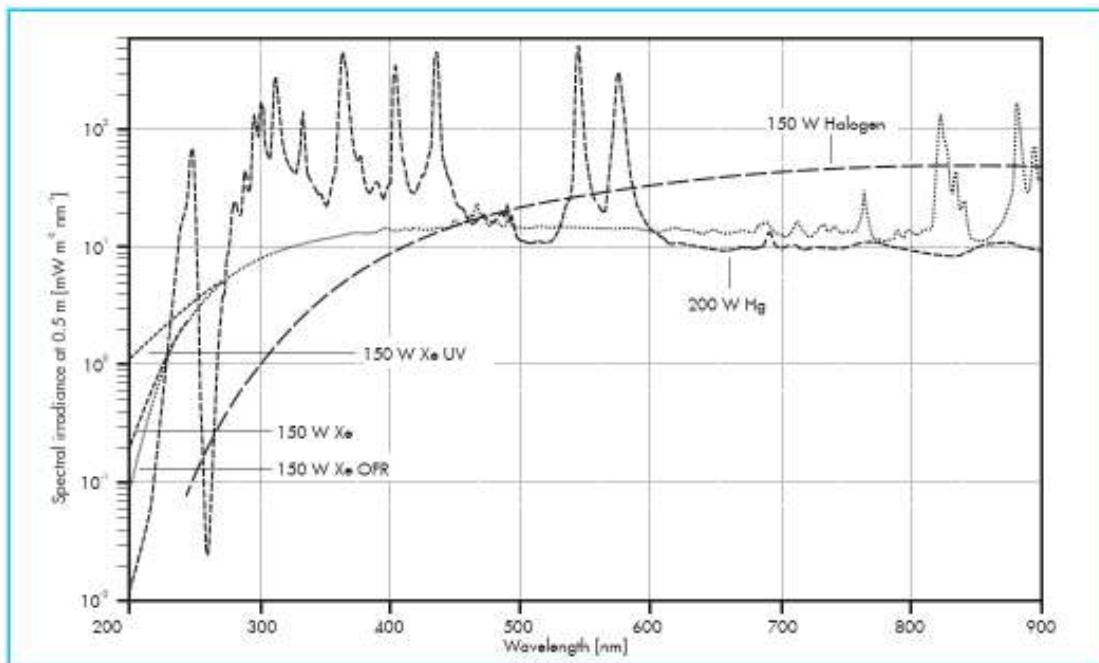
Εικόνα 10 Συνδεσμολογία για την εκτέλεση μετρήσεων. Το μεταβλητό φορτίο (αντίσταση), παρέχεται μέσω ενός ποτενσιόμετρου.

Η διάταξη του Solar Simulator, συνίσταται σε μια λάμπα (συνήθως Xe, Hg ή Αλογόνου), η οποία εκπέμπει σε ένα εύρος συχνοτήτων το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό που προσπίπτει στην γήινη επιφάνεια, υπό συνθήκες συνθήκες φωτεινότητας και ηλιοφάνειας. Με την χρήση κατάλληλων φίλτρων είναι δυνατή η τροποποίηση του φάσματος, έτσι ώστε να προσομοιώνει συγκεκριμένες συνθήκες φωτεινότητας ή προσανατολισμού των ακτίνων του ηλίου σε σχέση με τον ορίζοντα. Στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιείται ένας λαμπτήρας Xe, ισχύος 150 W. Στην εικόνα 11.α παρουσιάζεται ο λαμπτήρας, καθώς και το τροφοδοτικό, ενώ στην εικόνα 11.β, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του λαμπτήρα μέσω ενός διαγράμματος τομής.



11. a) Διάταξη Solar Simulator, αποτελούμενη από λαμπτήρα και τροφοδοτικό, b) Τομή της διάταξης του λαμπτήρα η οποία αποδίδει και την κατευθυντικότητα της ακτινοβολίας [5]

Στην εικόνα 12, παρουσιάζεται το φάσμα εκπομπής για διάφορα είδη λαμπτήρων. Υπενθυμίζεται ότι στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται λαμπτήρας Xe 150 W:



12. Φάσμα εκπομπής Solar Simulator για διάφορους τύπους πηγών. Στην συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιείται πηγή Xe 150 W [6]

Το SourceMeter της Keithley είναι ένα μετρητικό όργανο σχεδιασμένο για εφαρμογές όπου υπάρχει απαίτηση πολύ στενής σύζευξης μεταξύ τροφοδοσίας και μέτρησης (π.χ στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό διατάξεων χαμηλών διαστάσεων). Η συσκευή αυτή προσφέρει παράλληλα μεγάλης ακρίβειας τροφοδοσία τάσης και ρεύματος καθώς και αντίστοιχης ακρίβειας μετρητικές δυνατότητες, δηλαδή το SourceMeter είναι ταυτόχρονα μια πολύ σταθερή DC πηγή ισχύος και ένα πολύ ακριβές

πολύμετρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αντί τεσσάρων διαφορετικών συσκευών, οι οποίες είναι και δύσκολο να συντονιστούν ώστε να παίρνουμε μετρήσεις με ακρίβεια, να μπορούμε να κάνουμε πλήρη ηλεκτρικό χαρακτηρισμό με μια μόνο συσκευή



Εικόνα 10 Keithley 2400 SourceMeter

Στην συγκεκριμένη περίπτωση το SourceMeter θα λειτουργήσει απλά σαν αμπερόμετρο. Για να το ρυθμίσουμε πατάμε στον πίνακα Source το κουμπί V και στον πίνακα Meas το κουμπί I. Στην συνέχεια πατάμε το EDIT και με τα βελάκια μετακινούμε τον κέρσορα και ρυθμίζουμε την τάση που θα δίνει η πηγή στα 0V και το ρεύμα που θα μετράει το αμπερόμετρο λίγο πιο πάνω από την εργοστασιακή τιμή του φωτοβολταϊκού στοιχείου (πιθανότατα θα πρέπει να αλλάξουμε κλίμακα με τα κουμπιά RANGE). Τέλος αφού έχουμε βεβαιωθεί πως η συνδεσμολογία έχει γίνει σωστά πατάμε το κουμπί On/Off για να αρχίσουμε τις μετρήσεις.

## Πειραματική εργασία

1. Να γίνει μέτρηση I-V του φωτοβολταϊκού υπό σταθερές συνθήκες. (Ένταση ακτινοβολίας, απόσταση λάμπας φωτοβολταϊκου κλπ). Η μέτρηση να πραγματοποιηθεί χωρίς προσθήκη φίλτρου, και υπό κάθετη γωνία πρόσπτωσης ως προς το επίπεδο του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
  - Μέτρηση της έντασης του ρεύματος με το φωτοβολταϊκό βραχυκυκλωμένο.
  - Μέτρηση της τάσης με το φωτοβολταϊκό σε ανοιχτό κύκλωμα
  - Συνδέστε τη μεταβλητή αντίσταση και καταγράψτε στον πίνακα I, τις τιμές V και I μεταβάλλοντας την αντίσταση. Ειδικά στις μικρές τιμές αντίστασης, μεταβάλλετε το ποτενσιόμετρο με μικρό βήμα. Καθώς αυξάνονται οι τιμές αντίστασης, πρέπει να αυξάνετε και το βήμα στο ποτενσιόμετρο. Ενδεικτικά, για τα πρώτα 250Ω το βήμα θα πρέπει να είναι πάρα πολύ μικρό (της τάξης των 10-20Ω) ενώ από τα 1 KΩ και πάνω, το βήμα μπορεί να είναι 500 Ω ενώ. Ενδεικτικά, πρέπει να ληφθούν γύρω στις 20-25 μετρήσεις σε αυτό το βήμα. Ιδιαίτερα, όταν ανιχνευτεί το σημείο καμπής, με άλλα λόγια το σημείο στο οποίο η ισχύς φαίνεται να μεγιστοποιείται, πρέπει να ληφθούν όσο το δυνατόν περισσότερα ζεύγη τιμών I – V, στην περιοχή αυτή, ώστε να προσδιορισθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η MPP.

Πίνακας I

R (Ohm)	I (mA)	V (Volts)	P (Watts)

2. Επανάληψη του πρώτου βήματος με τη χρήση δυο φίλτρων AM0 και AM1,5, και καταγραφή των δεδομένων σε αντίστοιχους πίνακες II και III.
3. Επανάληψη του πρώτου βήματος αλλάζοντας τη γωνία πρόσπτωσης τον φωτός στο φωτοβολταϊκό και καταγραφή δεδομένων στον αντίστοιχο πίνακα IV.
4. Επανάληψη του πρώτου βήματος χρησιμοποιώντας μάσκα η οποία περιορίζει την περιοχή του φωτοβολταϊκού που φωτίζεται.

**Προσοχή!** Η συγκεκριμένη πηγή φωτός εκπέμπει σε φάσμα, το οποίο περιέχει και υπεριώδη ακτινοβολία. Η έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία, μπορεί να είναι επιβλαβής για τα μάτια και το δέρμα. Αποφεύγετε απευθείας έκθεση στην ακτινοβολία είτε αυτή είναι απευθείας από την πηγή, ή προϊόν ανάκλασης. Αν και το φως του λαμπτήρα είναι εστιασμένο, χρειάζεται προσοχή κατά την διεξαγωγή της άσκησης για να αποφευχθούν ανακλάσεις, οι οποίες θα είναι επιβλαβείς για τους εσάς και τους συναδέλφους σας.

### Επεξεργασία μετρήσεων

1. Με βάση τα δεδομένα του πίνακα I, να κατασκευαστούν οι γραφικές παραστάσεις ρεύματος με την τάση και ισχύος με την τάση,  $P = P(V)$ . Από την γραφική αυτή να προσδιορισθεί η MPP, για τις δεδομένες συνθήκες.
2. Όμοια από τους πίνακες II έως και IV, να κατασκευάσετε αντίστοιχες γραφικές και εξάγετε τα αντίστοιχα MPP για κάθε περίπτωση.
3. Σχεδιάστε σε κοινή γραφική παράσταση τις καμπύλες I-V και  $P = P(V)$  για κάθε περίπτωση και προβείτε σε σχολιασμό, σχετικά με την εξάρτηση της ισχύος από τις εκάστοτε συνθήκες πρόσπτωσης του φωτός. Σχολιάστε την επίδραση των φίλτρων AM, καθώς και της διαφοροποίησης στην γωνία πρόσπτωσης.
4. Από τις μετρήσεις που έγιναν με το φίλτρο AM 1.5 και θεωρώντας πως έχουμε ισχύ ακτινοβολίας  $1\text{kW}/\text{m}^2$  (1 ήλιος) να βρείτε την απόδοση του φωτοβολταϊκού.
5. Αλλάζει η απόδοση του φωτοβολταϊκού όταν αλλάζουμε το ποσοστό της επιφάνειας του το οποίο ακτινοβολείται;
6. Προτείνετε τρόπους για την βελτίωση της απόδοσης της διάταξης.

## Βιβλιογραφία

- [1] “Renewable and Efficient Electric Power Systems”, Gilbert M. Masters, Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2004)
- [2] Semiconductor Devices Physics and Technology, S.M Sze - 2<sup>nd</sup> ed, Wiley and Sons, Inc. (2002)
- [3] <http://www.pveducation.org>
- [4] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Wiley and Sons, Ltd. (2003)
- [5] [http://www.lot-oriel.com/files/downloads/lightsources/eu/LQ\\_50\\_150\\_w\\_arc\\_light\\_source\\_eu.pdf](http://www.lot-oriel.com/files/downloads/lightsources/eu/LQ_50_150_w_arc_light_source_eu.pdf)
- [6] [http://www.lot-oriel.com/files/downloads/lightsources/eu/LQ\\_Lamp\\_spectra\\_and\\_irradiance\\_eu.pdf](http://www.lot-oriel.com/files/downloads/lightsources/eu/LQ_Lamp_spectra_and_irradiance_eu.pdf)