
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΚΥΤΤΑΡΟ

ΠΑΤΡΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2025

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

- 1 Σκοπός
- 2 Εισαγωγή
- 3 Θεωρία
- 4 Πειραματική διάταξη
- 5 Πειραματική διαδικασία
 - 5.1 Μέρος 1: Μέτρηση της αντίστασης
 - 5.2 Μέρος 3: Μέτρηση χαρακτηριστικής του φωτοβολταϊκού
- 6 Πλήρης ατομική έκθεση
- 7 Βιβλιογραφία

1 Σκοπός

Σε αυτήν την άσκηση μελετάται η λειτουργία του φωτοβολταϊκού κυττάρου ως πηγή ηλεκτρισμού. Συγκεκριμένα μελετάται η σχέση του ρεύματος με την τάση του κυττάρου (χαρακτηριστική καμπύλη) και από αυτήν προσδιορίζεται η ηλεκτρική ισχύς του. Προσδιορίζονται οι βέλτιστες συνθήκες για τη λειτουργία ενός πάνελ φωτοβολταϊκών σε ένα κύκλωμα με γνωστό φορτίο ώστε αυτό να βρίσκεται σε λειτουργία μέγιστη ισχύος MPPT (*maximum power point tracking*). Επίσης συγκρίνεται η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ημιαγωγός, επαφή p-n, δίοδος, φωτοβολταϊκά κύτταρα, ηλιακή ενέργεια, σειριακή και παράλληλη σύνδεση

2 Εισαγωγή

<https://www.quora.com/Who-is-first-inventor-of-solar-energy> :

Η ηλιακή ενέργεια έχει μια εκπληκτικά μακρά ιστορία. Ήδη από το 7000 π.Χ., οι άνθρωποι μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικά υλικά για να εστιάσουν τις ακτίνες του ήλιου σε ένα σημείο για να ανάψει μια φωτιά. Μέχρι την εποχή των αρχαίων Ρωμαίων, οι άνθρωποι είχαν μάθει να κατασκευάζουν «αίθουσες ηλιοθεραπείας» με μεγάλα παράθυρα που κατεύθυναν το φως του ήλιου σε μια δεδομένη περιοχή. Οι άνθρωποι εξακολουθούν να χτίζουν σπίτια με παρόμοιες ξαπλώστρες σήμερα.

Ο Γάλλος επιστήμονας Edmond Becquerel (1820 – 1891) πιστώνεται με την εφεύρεση του ηλιακού κυττάρου. Ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ενώ ήταν ακόμα έφηβος το 1839 επιστρώνοντας πλατινένια ηλεκτρόδια με ένα κράμα αργύρου και εκθέτοντάς τα στο φως και παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1870, αρκετοί διαφορετικοί επιστήμονες διαπίστωσαν ότι το στοιχείο σελήνιο θα μπορούσε επίσης να δημιουργήσει ηλεκτρική ενέργεια μετά την έκθεσή του στο φως του ήλιου. Ο Αμερικανός εφευρέτης Charles Fritts (1850 – 1903) χρησιμοποίησε δίσκους σεληνίου για να κατασκευάσει ηλιακά κύτταρα το 1883. Ένα χρόνο αργότερα, εγκατέστησε την πρώτη ηλιακή συστοιχία στον κόσμο στην οροφή ενός κτιρίου στη Νέα Υόρκη. Αυτή η ηλιακή συστοιχία, δυστυχώς, είχε μια ηλεκτρική απόδοση μετατροπής μόνο περίπου 1 τοις εκατό. Αυτό σημαίνει ότι μόνο το 1% του ηλιακού φωτός που χτύπησε τη συστοιχία έγινε στην πραγματικότητα ηλεκτρισμός. Η βελτίωση της αποδοτικότητας των ηλιακών συλλεκτών για να καταστούν εφικτές ενεργειακές τεχνολογίες χρειάστηκε δεκαετίες έρευνας και εργασίας. Το 2016, ερευνητές στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Ουαλίας ανέπτυξαν ηλιακούς συλλέκτες με ηλεκτρική απόδοση μετατροπής 34,5 τοις εκατό.

Μερικοί από τους πρώτους ηλιακούς συλλέκτες χρησιμοποιήθηκαν στο διάστημα. Το 1958, το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ εκτόξευσε το Vanguard I, το οποίο ήταν ο πρώτος δορυφόρος που χρησιμοποίησε ηλιακή ενέργεια. Είχε ένα μικρό ηλιακό πάνελ που παρείχε ηλεκτρισμό στους ασυρμάτους του. Έξι χρόνια αργότερα, η NASA εκτόξευσε τον πρώτο δορυφόρο Nimbus, ο οποίος λειτουργούσε εξ ολοκλήρου με ηλιακή ενέργεια από μια συστοιχία 470 W.

Η ηλιακή ενέργεια μαζί με την αιολική ενέργεια και την υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελούν τις ανανεώσιμες (ή «πράσινες») πηγές ενέργειας οι οποίες είναι αφενός αειφόρες (θα διαρκούν για πάντα) και αφετέρου φιλικές προς το περιβάλλον αφού δεν συνοδεύονται από ρίπους CO₂ ή ραδιενεργά απόβλητα με τα γνωστά προβλήματα που αυτά δημιουργούν στο περιβάλλον.



Σχήμα 1: Το πρότυπο φωτοβολταϊκό μας πάρκο στη ταράτσα του κτιρίου Χημικών Μηχανικών

Η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται από τον άνθρωπο μέσω δυο διαφορετικών τεχνικών (Σχήμα 1), των ηλιακών συλλεκτών (ή ηλιακών θερμοσιφώνων) οι οποίοι την μετατρέπουν σε θερμότητα και των φωτοβολταϊκών που τη μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται ως υλικά οι λεγόμενοι «ημιαγωγοί» οι οποίοι απαρτίζονται κυρίως από τα χημικά στοιχεία που εμφανίζονται στο πλαίσιο των 3 × 3 στοιχείων του Σχήματος 2, με το πιο σημαντικό το πυρίτιο. Γιατί όμως αυτά τα υλικά έχουν ιδιαίτερη τεχνολογική σπουδαιότητα;

3 Θεωρία

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, μέσα στα υλικά υπάρχουν ενεργειακές ζώνες που είναι η γενίκευση των ενεργειακών σταθμών στα άτομα. Όπως και στα άτομα όπου οι χαμηλές στάθμες είναι κατειλημμένες από ηλεκτρόνια ενώ οι υψηλές είναι κενές, έτσι και στα υλικά, οι χαμηλές ζώνες είναι γενικά κατειλημμένες ενώ οι υψηλές άδειες. Η υψηλότερη κατειλημμένη ζώνη ονομάζεται «**ζώνη σθένους**» και σε μέσα σε αυτή τα ηλεκτρόνια γενικά δεν μπορούν να μετακινηθούν εύκολα επειδή δεν υπάρχουν ελεύθερες γειτονικές στάθμες όπου αυτά να μπορούν να μεταπηδήσουν. Αντιθέτως, η χαμηλότερη κενή ζώνη ονομάζεται «**ζώνη αγωγιμότητας**» και εκεί υπάρχει πλήθος διαθέσιμων ενεργειακών σταθμών. Όσον αφορά την ενεργειακή απόσταση αυτών των δυο ζωνών (σθένους και αγωγιμότητας), γνωστή και ως «**ενεργειακό χάσμα**» E_g , υπάρχουν οι εξής περιπτώσεις υλικών:

ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Προηγούμενο Α.Β. — 31 — Νέο στοιχείο (Ραβίβ)
 Ατομικός αριθμός — 15 — Στοιχείο (P)
 Α.Ο. — 3, +3, +5 — Οξείδωση (P)
 1609 — Έτος ανακάλυψης

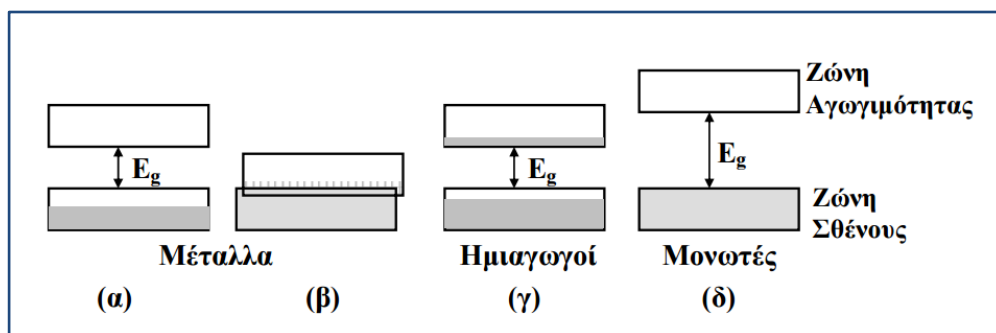
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΤΑΠΩΣΗΣ

ΑΕΡΙΑ : $H_2, N_2, O_2, F_2, Cl_2, He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn$ **ΥΓΡΑ** : Hg, Br_2

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ
 Μανώλης Κουκλέτης
 Βασίλης Μανός
 www.xhmkos.gr

* ΔΕΥΤΕΡΙΑΙΕΣ (ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΑΙΕΣ)
 ** ΑΚΤΙΝΙΔΕΣ

Σχήμα 2: Περιοδικός πίνακας στοιχείων. Στο πλαίσιο φαίνονται τα στοιχεία που συνθέτουν κυρίως τους ημιαγωγούς.



Σχήμα 3: Ζώνες σθένους και αγωγιμότητας για τις τρεις βασικές κατηγορίες υλικών: Μέταλλα, Ημιαγωγοί και Μονωτές.

Μονωτές, Σχήμα 3δ: Το E_g είναι σχετικά μεγάλο και έτσι απαιτούνται μεγάλες ηλεκτρικές τάσεις ώστε να αναγκάσουν τα ηλεκτρόνια να μεταπηδήσουν από την στάθμη σθένους στην στάθμη αγωγιμότητας. Έτσι για συνήθεις τάσεις των μερικών *Volt*, δεν παρατηρείται ρεύμα στους μονωτές επειδή τα ηλεκτρόνια παραμένουν παγιδευμένα στην ζώνη σθένους.

Αγωγοί (μέταλλα), Σχήμα 3α και β: Στην άκρως αντίθετη περίπτωση, η ζώνη σθένους είτε είναι μερικώς κατειλημμένη είτε τυχάνει να επικαλύπτεται με τη ζώνη αγωγιμότητας οπότε οι δυο ζώνες εφάπτονται. Ως αποτέλεσμα αυτής της ιδιαιτερότητας, τα ηλεκτρόνια βρίσκουν πολύ εύκολα γειτονικές στάθμες όταν διεγείρονται ακόμα και με πολύ μικρές τάσεις με αποτέλεσμα την εύκολη

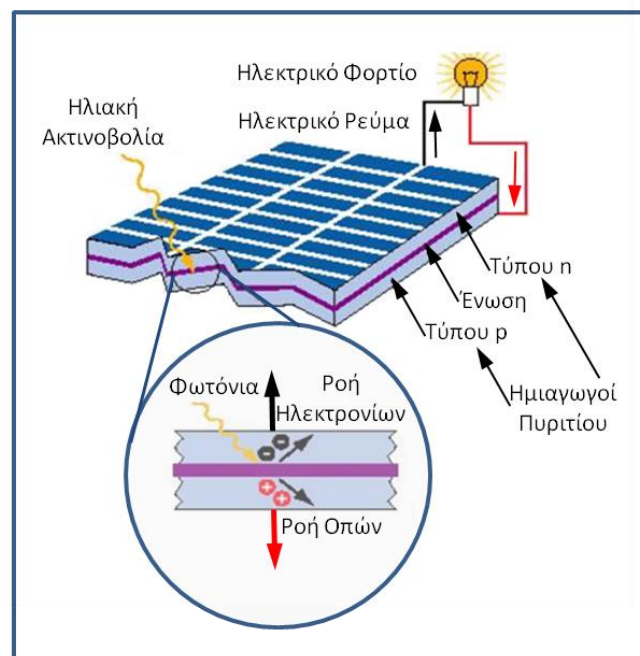
μετακίνηση τους δια μέσου του υλικού και έτσι την εμφάνιση του ηλεκτρικού ρεύματος. Ο νόμος του *Ohm* είναι αυτός που περιγράφει την σχέση ρεύματος – τάσης σε αυτή την περίπτωση.

Ημιαγωγοί, Σχήμα 3γ: Το E_g είναι σχετικά μικρό και έτσι με συμβατές ηλεκτρικές τάσεις αλλά και με θερμική διέγερση ή οπτική διέγερση ένα μέρος των ηλεκτρονίων μεταπηδούν από την στάθμη σθένους στην στάθμη αγωγιμότητας. Λόγω της θερμικής διέγερσης, πάντα υπάρχει ένα μικρό ποσοστό ηλεκτρονίων που έχει ήδη μεταπηδήσει, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν να μετακινηθούν ελεύθερα στην ζώνη αγωγιμότητας όπως και στην περίπτωση των αγωγών. Συνήθως ο αριθμός αυτών των ηλεκτρονίων είναι μικρός και έτσι οι ημιαγωγοί, όπως υπονοεί και το όνομά τους, έχουν πολύ μικρότερη αγωγιμότητα από αυτήν των αγωγών (μέταλλα) αλλά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των μονωτών. Τα κενά που αφήνουν πίσω τους τα ηλεκτρόνια στην στάθμη σθένους ονομάζονται «οπές» και συμβάλλουν και αυτές στην δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος όπως είδαμε στην Φυσική II (δείτε Σχήμα 7.4 στο βιβλίο «Φυσικής Ι» του κ. Κουζούδη) αφού η μετακίνηση μιας οπής προς τα δεξιά ισοδυναμεί με την μετακίνηση ενός ηλεκτρονίου προς τα αριστερά. Εφόσον η οπή δημιουργήθηκε λόγω της απουσίας ενός ηλεκτρονίου, τότε αυτή έχει φορτίο ίσο και αντίθετο με αυτό του ηλεκτρονίου δηλαδή θετικό.

Ιδιαίτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση όπου η διέγερση των ηλεκτρονίων είναι οπτική, δηλαδή προέρχεται από την πρόσπτωση φωτονίων (φως) τα οποία απορροφούνται από τα ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα να ανεβαίνουν σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες. Στα μεν μέταλλα η διέγερση των ηλεκτρονίων έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση δυο φαινομένων. Σε χαμηλές σχετικά ενέργειες φωτονίων, η απορρόφησή τους οδηγεί σε μεγαλύτερη κινητικότητα των ηλεκτρονίων η οποία τελικώς ανάγεται σε τοπική θερμότητα και η οποία χρησιμοποιείται τεχνολογικώς στην περίπτωση των ηλιακών συλλεκτών για τη θέρμανση του νερού (ηλιακοί συλλέκτες). Στην περίπτωση των φωτονίων με ενέργειες ίσες ή μεγαλύτερες από το έργο εξόδου του μετάλλου, η απορρόφησή τους οδηγεί στη πλήρη εξαγωγή των ηλεκτρονίων από το υλικό, ένα φαινόμενο γνωστό ως το «**φωτο-ηλεκτρικό**» φαινόμενο. Στους δε ημιαγωγούς, ένα προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, δηλαδή το φωτόνιο απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο στην ζώνη σθένους του Σχήματος 2.γ, διεγείρεται στην ζώνη αγωγιμότητας και έτσι προκύπτει πίσω στην ζώνη σθένους μια οπή. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως το «**φωτοβολταϊκό**» φαινόμενο. Σε αυτή την περίπτωση η ενέργεια E του φωτονίου πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα E_g του ημιαγωγού. Επειδή η ενέργεια ενός φωτονίου $E = hc/\lambda$ είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος λ , όπου h η σταθερά του *Planck* και c η ταχύτητα του φωτός, συμπεραίνουμε ότι δεν μπορούμε να προκαλέσουμε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο με όλες τις φωτεινές ακτινοβολίες αλλά μόνο με ορισμένα μήκη κύματος (χρώματα).

Η χρησιμότητα των φωτοβολταϊκών έγκειται στο γεγονός ότι τα επιπλέον ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών που δημιουργούνται, μπορούν να διοχετευτούν σε εξωτερικό κύκλωμα με σκοπό τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος δηλαδή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλο που υπάρχουν αρκετά ημιαγώγιμα υλικά με τη μορφή απλού χημικού στοιχείου όπως το πυρίτιο ή το γερμάνιο, ή και απλές χημικές ενώσεις με συνδυασμό κυρίως των στοιχείων που προαναφέρθηκαν στο Σχήμα 1, κατά 98%

στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιείται το πυρίτιο το οποίο στην κρυσταλλική του μορφή το κάθε άτομο σχηματίζει 4 ομοιοπολικούς δεσμούς με αντίστοιχα τέσσερα γειτονικά του άτομα. Ως ημιαγωγός, το πυρίτιο έχει σχετικά χαμηλή πυκνότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων (όπως και οι περισσότεροι ημιαγωγοί). Με μικρή όμως πρόσμιξη 0.001 – 0.002 % πεντασθενούς φωσφόρου, η πυκνότητα αυτή αυξάνει επειδή μόνο τα 4 από τα 5 ηλεκτρόνια σθένους του φωσφόρου μπορούν να σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα τέσσερα γειτονικά πυρίτια και έτσι το επιπλέον ηλεκτρόνιο περιφέρεται ελεύθερα στο πλέγμα. Ο ημιαγωγός σε αυτή τη περίπτωση ονομάζεται τύπος *n*. Παρομοίως, με μικρή πρόσμιξη τρισθενούς αλουμινίου, αυξάνεται αντίστοιχα η πυκνότητα των οπών επειδή στις περιοχές όπου υπάρχουν άτομα αλουμινίου, μόνο τα 3 από τα 4 γειτονικά τους άτομα πυριτίου μπορούν να σχηματίσουν ομοιοπολικό δεσμό μαζί τους. Με αυτό τον τρόπο, το αδέσμευτο πυρίτιο τείνει να έλκει γειτονικά ελεύθερα ηλεκτρόνια για να πραγματοποιήσει τον ανεκπλήρωτο ομοιοπολικό δεσμό, δρώντας έτσι ως μια οπή. Ο ημιαγωγός σε αυτή τη περίπτωση ονομάζεται τύπος *p*.



Σχήμα 4: Το φωτοβολταϊκό κύτταρο

Οι ηλεκτρονικές διόδους είναι διατάξεις δυο στρωμάτων, ενός τύπου *n* και ενός τύπου *p*, τοποθετημένα μαζί σαν ένα διστρωματικό υλικό (στην ουσία είναι το ίδιο λεπτό υλικό στο οποίο έχουν προστεθεί με θερμική διάχυση μικρές ποσότητες φωσφόρου από την μια μεριά και αλουμινίου από την άλλη). Για αυτό το λόγο λέγονται και διόδους *np*. Χωρίς να θέλουμε να μπούμε σε λεπτομέρειες επάνω στην θεωρία των ημιαγωγών (ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία, π.χ. στο μάθημα Υλικών), η «χαρακτηριστική $I - V$ » μιας τέτοιας διόδου, δηλαδή η σχέση μεταξύ του ρεύματος I που τη διαρρέει και της τάσης V στα άκρα της, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I = I_o \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

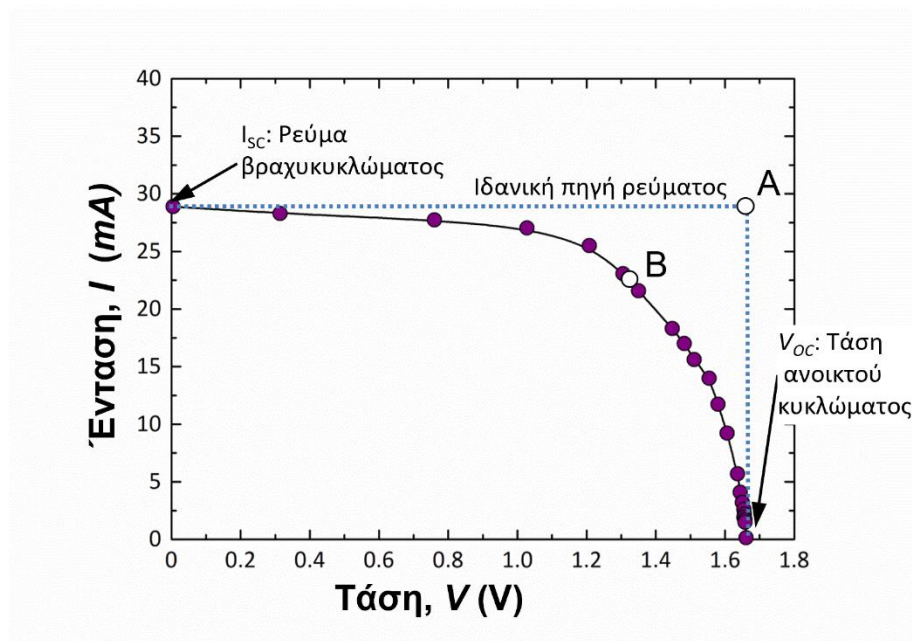
όπου $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου (κατά απόλυτη τιμή), $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ η σταθερά του Boltzmann σε μονάδες SI, T η θερμοκρασία σε Kelvin και I_o ένα χαρακτηριστικό ρεύμα που εξαρτάται από το υλικό. Συγκρίνετε την παραπάνω εξίσωση με την αντίστοιχη εξίσωση $I = V/R$ στους αγωγούς που είναι στην ουσία ο απλός νόμος του Ohm. Στην τελευταία, τα V και I σχετίζονται γραμμικά ενώ στην Εξ. 1, η V εμφανίζεται σε μια τελείως μη γραμμική συνάρτηση.

Επιπλέον, όταν η δίοδος βομβαρδισθεί και με φως, όπως στο Σχήμα 4, τότε όπως είδαμε το φως παράγει και επιπλέον ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών (οπότε και η δίοδος ονομάζεται φωτοδίοδος όταν είναι μικρή $\approx 1 - 2 \text{ mm}$ και φωτοβολταϊκό κύτταρο (Σχήμα 4) όταν είναι πολύ μεγαλύτερη $\approx 5 - 10 \text{ cm}$) και έτσι δημιουργείται και το λεγόμενο «φωτορεύμα» I_φ το οποίο όμως είναι αντίθετο σε φορά με το ρεύμα της διόδου οπότε και πρέπει να αφαιρεθεί από αυτό. Επειδή όμως στις φωτοδιόδους μας ενδιαφέρει περισσότερο το φωτορεύμα παρά το ρεύμα της διόδου, το γράφουμε ως θετικό και αφαιρούμε από αυτό το ρεύμα της διόδου, δηλαδή για το ρεύμα I μιας φωτοδίοδου ισχύει η εξής εξίσωση

$$I = I_\varphi - I_o \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

η οποία είναι και η αντίστοιχη «χαρακτηριστική $I - V$ ». Το φωτορεύμα I_φ δεν εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση V στα άκρα της φωτοδίοδου αλλά μόνο από την ένταση και το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Μια τυπική γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης για σταθερή φωτεινή ένταση και μήκος κύματος του φωτός φαίνεται στο Σχήμα 5. Από δω και στο εξής θα χρησιμοποιούμε τον όρο «**φωτοβολταϊκό κύτταρο**» γιατί τέτοια θα χρησιμοποιήσουμε στο εργαστήριο. Το πυρίτιο στα φωτοβολταϊκά απαντάται στις εξής τρεις μορφές, με αυξανόμενη σειρά κόστους (παραγωγής) και αντίστοιχη σειρά απόδοσης: το άμορφο, το πολυκρυσταλλικό και το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

Από το Σχήμα 5 βλέπουμε ότι το κύτταρο για χαμηλές τιμές της τάσης V προσεγγίζει την γραφική παράσταση μιας ιδανικής πηγής ρεύματος, που στην ουσία είναι μια οριζόντια ευθεία γραμμή αφού παρέχει σταθερό ρεύμα ανεξάρτητο από το V . Για την μέτρηση της χαρακτηριστικής του κυττάρου, χρησιμοποιείται το κύκλωμα του Σχήματος 6. Θεωρώντας ότι φως σταθερής έντασης προσπίπτει σε αυτό οπότε και το I_φ είναι σταθερό, τότε μεταβάλλοντας την τιμή R της μεταβλητής αντίστασης, αλλάζει το ρεύμα I του κυττάρου και άρα μπορούμε να πάρουμε διάφορα ζεύγη I, V της χαρακτηριστικής της καταγράφοντας ταυτόχρονα το αμπερόμετρο και το βολτόμετρο. Στο Σχήμα 5 ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν δυο χαρακτηριστικά μεγέθη του κυττάρου: (α) Το «**ρεύμα βραχυκυκλώματος**» I_{SC} , το οποίο αντιστοιχεί σε $R = 0$ (εξ ου και το όνομα) που είναι το ρεύμα στα αριστερά στο $V = 0$ και που στην ουσία είναι από την Εξ. 2 ίσο με I_φ . (β) Η «**τάση ανοικτού κυκλώματος**» V_{OC} το οποίο αντιστοιχεί σε $R \rightarrow \infty$ (εξ ου και το όνομα) που είναι η τάση στα δεξιά στο $I = 0$.

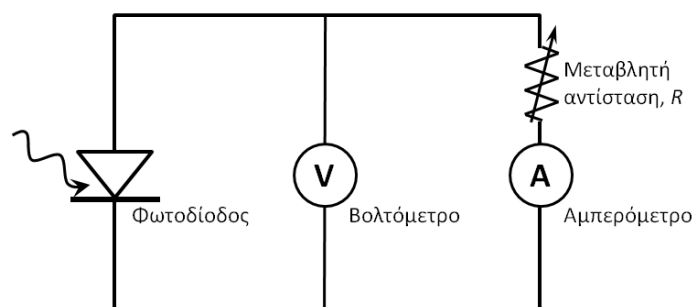


Σχήμα 5: Χαρακτηριστική $I - V$ του φωτοβολταϊκού-κυττάρου όπου φαίνονται δυο χαρακτηριστικά του μεγέθη, το «ρεύμα βραχυκυκλώματος» I_{sc} και η «τάση ανοικτού κυκλώματος» V_{oc}

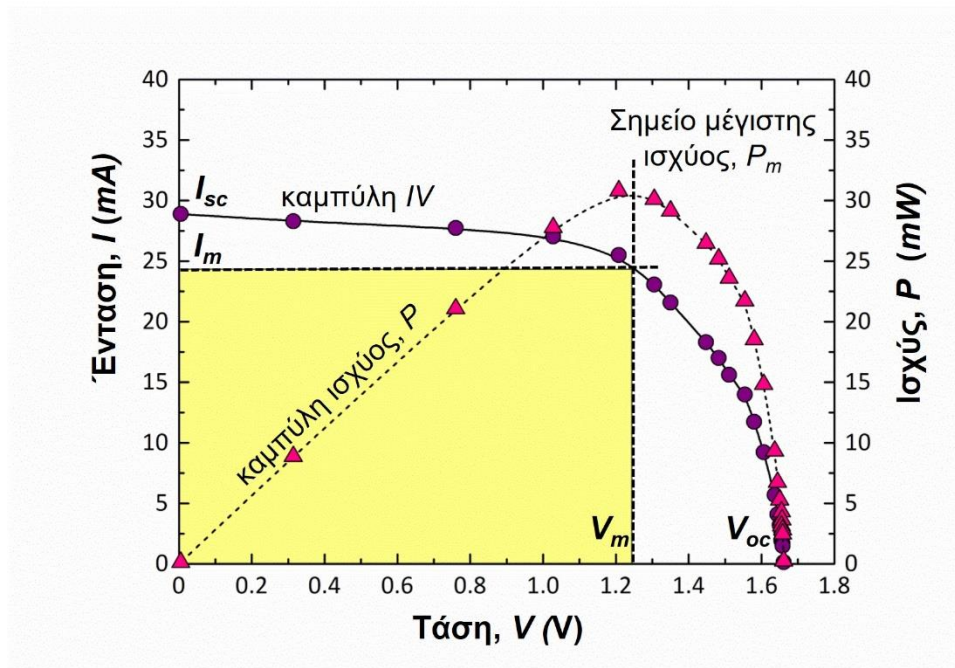
Στα φωτοβολταϊκά συστήματα μας ενδιαφέρει η ισχύς P (έργο ανά μονάδα χρόνου) που παράγεται από αυτά. Σε οποιοδήποτε ηλεκτρικό στοιχείο το οποίο βρίσκεται υπό τάση V και διαρρέεται από ρεύμα I , η ισχύς ισούται με

$$P = V \times I \quad (3)$$

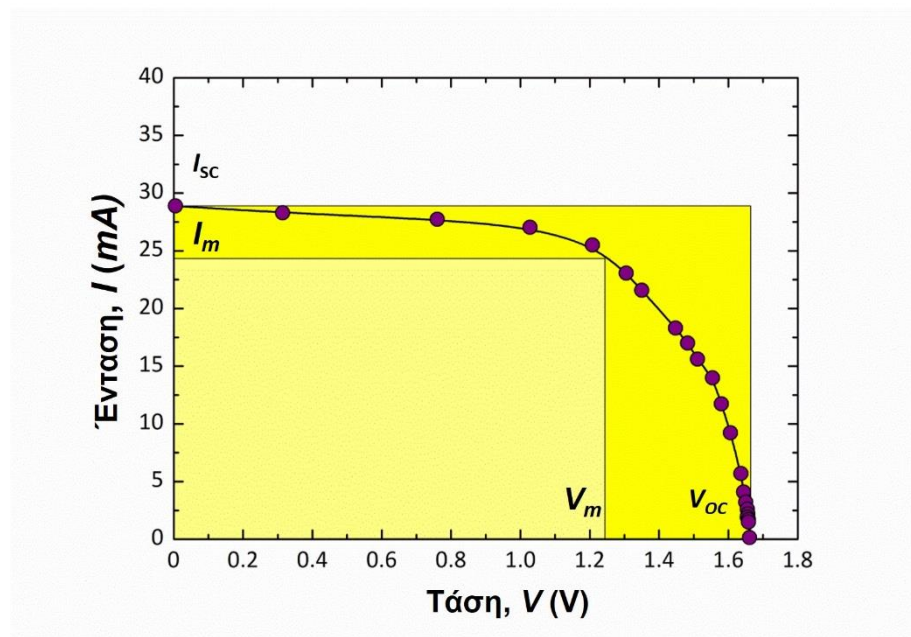
Μπορούμε να υπολογίσουμε αυτό το γινόμενο σε όλα τα ζεύγη I, V του Σχήματος 5. Βλέπουμε ότι στα δυο ακραία σημεία η ισχύς είναι ίση με μηδέν αφού $V = 0$ στο $I = I_{sc}$ και $I = 0$ στο $V = V_{oc}$. Στα ενδιάμεσα σημεία τόσο το V όσο και το I είναι θετικά και άρα η ισχύς P είναι παντού θετική. Η μέγιστη τιμή της είναι σε κάποιο σημείο B εκεί που αρχίζει η πτώση της καμπύλης όπου χονδρικά τόσο το I όσο και το V έχουν σχετικά υψηλές τιμές. Μια τυπική γραφική παράσταση της ισχύος για ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο πυριτίου φαίνεται στο Σχήμα 7 όπου αντιπαραβάλλεται μαζί με την χαρακτηριστική $I - V$.



Σχήμα 6: Ηλεκτρικό κύκλωμα συνεχούς ρεύματος



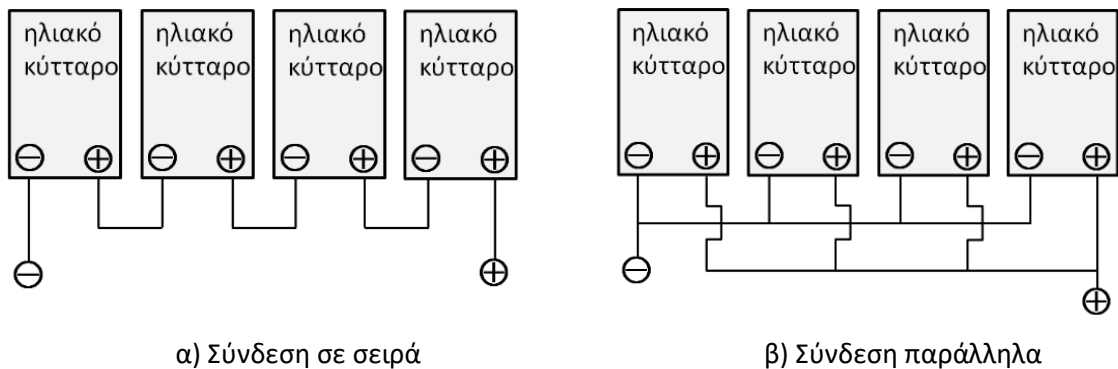
Σχήμα 7α: Τυπική γραφική παράσταση της ισχύος (άξονας στα δεξιά) που αντιστοιχεί στην χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ (άξονας στα αριστερά) για ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο πυριτίου.



Σχήμα 7β: Ο λόγος των εμβαδών των δυο ορθογώνιων είναι ίσος με το «λόγο πλήρωσης» FF (δείτε Εξίσωση (5) παρακάτω)

Οι τιμές V_{OC} , I_{SC} καθώς και οι συντεταγμένες V_m , I_m του σημείου μέγιστης ισχύος στο Σχήμα 7β είναι χαρακτηριστικές παράμετροι του κάθε φωτοβολταϊκού κυττάρου και δίνονται από τον κατασκευαστή. Για παράδειγμα το Σχήμα 7α εικονίζει την χαρακτηριστική μιας κυψέλης πολυκρυσταλλικού πυριτίου διαστάσεων $8,5 \times 8,5 \text{ cm}^2$ όπου ο κατασκευαστής δίνει $I_{SC} = 28 \text{ mA}$, $V_{OC} \approx 1,6 \text{ V}$, $I_m \approx 24 \text{ mA}$ και $V_m = 1,25 \text{ V}$. Ένα τέτοιο κύτταρο προσπαθούμε συνήθως να το λειτουργούμε στο σημείο της μέγιστης ισχύος επιλέγοντας κατάλληλη αντίσταση στο εξωτερικό κύκλωμα. Επομένως

το κύτταρο αυτό λειτουργεί ως μια πηγή τάσης $1,25\text{ V}$ και έντασης 24 mA μέσα στο κύκλωμα. Βέβαια σε πολλές εφαρμογές απαιτούνται υψηλότερες τάσεις, π.χ. σε μια φόρτιση μιας μπαταρίας κινητού με αναγραφόμενη τάση $3,7\text{ V}$ απαιτεί μια πηγή με μια ελαφριά μεγαλύτερη τάση από $3,7\text{ V}$. Σε αυτή τη περίπτωση, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα τοποθετούνται σε σειρά το ένα με το άλλο, όπως οι συμβατικές μπαταρίες σε μικροσυσκευές, ώστε η τάση τους να αθροίζεται όπως στο Σχήμα 8α. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα έπρεπε να τοποθετήσουμε 3 κύτταρα $\times 1,25\text{ V} = 3,75\text{ V}$ η οποία είναι μια επαρκής τάση για τη φόρτιση της μπαταρίας. Σε άλλες περιπτώσεις, απαιτούνται μεγάλα ρεύματα οπότε τα κύτταρα τοποθετούνται παράλληλα όπως στο Σχήμα 8β. Μια κατασκευή με πολλά κύτταρα συνδεδεμένα μεταξύ του επάνω σε πλαίσιο αλουμινίου και προστατευτικό γυαλί από επάνω, ονομάζεται φωτοβολταϊκό πάνελ.



Σχήμα 8: Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα σε σύνδεση σε σειρά και παράλληλα

Η πιο σημαντική παράμετρος του φωτοβολταϊκού κυττάρου είναι η **απόδοσή** του η , η ικανότητά του δηλαδή να μετατρέπει τη φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Ορίζεται από τον λόγο

$$\eta = \frac{P}{P_{\phi}} \quad (4)$$

όπου P είναι η παραγόμενη ισχύς του κυττάρου όπως ορίστηκε παραπάνω στο μέγιστο σημείο και P_{ϕ} είναι η προσπίπτουσα ισχύς της φωτεινής ακτινοβολίας. Όταν πρόκειται για το φως του ήλιου, οπότε και τα κύτταρα ονομάζονται ηλιακά κύτταρα, μπορούμε να χρησιμοποιούμε για τους υπολογισμούς της απόδοσης την μέση τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία κατά τις ηλιόλουστες ημέρες παίρνει την τιμή $1000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, δηλαδή 1000 W ισχύος ανά τετραγωνικό της ηλιόλουστης επιφάνειας.

Τέλος μια άλλη σημαντική παράμετρος του φωτοβολταϊκού είναι ο «**λόγος πλήρωσης**» FF ο οποίος είναι ένα μέτρο σύγκρισης του κυττάρου με μια ιδανική πηγή ρεύματος και ισούται με

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (5)$$

όπου I_m και V_m είναι το ρεύμα και η τάση αντίστοιχα στο σημείο μέγιστης ισχύος στην καμπύλη του Σχήματος 7α. Στην ουσία αυτός ο αριθμός είναι ο λόγος των εμβαδών των δυο ορθογωνίων του Σχήματος 7β και όσο πλησιέστερος είναι στη μονάδα, τόσο περισσότερο το κύτταρο συμπεριφέρεται ως μια ιδανική πηγή ρεύματος, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό.

4 Πειραματική διάταξη

Τα πειραματικά όργανα που θα χρησιμοποιήσετε είναι τα εξής:

- ✓ δοκιμαστική πλακέτα κυκλώματος
- ✓ τρεις αντιστάσεις
- ✓ δυο φωτοβολταϊκό πάνελ
- ✓ δυο ίδια ψηφιακά πολύμετρα
- ✓ κυτίο μεταβλητής αντίστασης. Time Electronis Ltd.
- ✓ μια λυχνία φωτός 100 W

5 Πειραματική διαδικασία

5.1 Μέτρηση της αντίστασης



Στον πάγκο σας πρέπει να υπάρχει μια «δοκιμαστική πλακέτα» και ένα σύνολο τριών αντιστάσεων R_1 , R_2 και R_3 .

Μέτρηση αντίστασης με το ψηφιακό πολυμέτρο MASTECH MS8240D:

Ο επιλογέας πρέπει να βρίσκεται στη θέση «Ω» και τα καλώδια συνδεδεμένα στις εισόδους «VΩ» και «COM», όπως δείχνουν τα βέλη. Οι άλλες άκρες των καλωδίων πρέπει να συνδεθούν στον κάθε αντιστάτη ξεχωριστά, δηλαδή εισάγετε την πρώτη αντίσταση στην δοκιμαστική πλακέτα και συνδέστε το ψηφιακό πολύμετρο με αυτήν. Επαναλάβετε τη μέτρηση και για τις τρεις αντιστάσεις ξεχωριστά αλλά και σε σειρά και παράλληλα και καταγράψτε τις τιμές με τις μονάδες στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Μέτρηση αντίστασης

R_1	R_2	R_3	Σε σειρά	παράλληλα

5.2 Μέτρηση χαρακτηριστικής του φωτοβολταϊκού

Επιλέξτε ένα από τα φωτοβολταϊκά πάνελ και προσδιορίστε το εμβαδό της φωτοβολταϊκής επιφάνειάς της.

Συνδέστε δυο φωτοβολταϊκά πάνελ εν παραλλήλω. Ακολουθώντας πραγματοποιήστε τη σύνδεση που φαίνεται στο Σχήμα 6. Για αντίσταση χρησιμοποιήστε το κυτίο μεταβλητής αντίστασης.

Στο υπόλοιπο του πειράματος, το ένα πολύμετρο θα χρησιμοποιηθεί μόνο ως αμπερόμετρο, και το δεύτερο μόνο ως βολτόμετρο κάνοντας τις εξής ρυθμίσεις:

Αμπερόμετρο:

Συνδέστε τα καλώδια στις εισόδους του «mA» και «COM» και γυρίστε τον επιλογέα του πολυμέτρου στην ένδειξη $\cong \text{mA}$. Βεβαιωθείτε ότι η οθόνη δείχνει την συνεχή τάση () πατώντας το κουμπί «FUNC». Ο αποδέκτης «COM» είναι ο αρνητικός (-) ενώ ο «mA» είναι ο θετικός (+).

Βολτόμετρο:

Συνδέστε τα καλώδια στις εισόδους του «VΩ» και «COM» και γυρίστε τον επιλογέα του πολυμέτρου στην ένδειξη $\cong V$. Βεβαιωθείτε ότι η οθόνη δείχνει την συνεχή τάση () πατώντας το κουμπί «FUNC». Ο αποδέκτης «COM» είναι ο αρνητικός (-) ενώ ο «VΩ» είναι ο θετικός (+).

ΠΡΟΣΟΧΗ:

Το αμπερόμετρο  συνδέεται πάντα σε σειρά στο κύκλωμα.

Το βολτόμετρο,  συνδέεται πάντα παράλληλα στα σημεία που θέλουμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού.

Όταν αλλάζουμε επιλογέα ή ρυθμίσεις στο πολύμετρο, φροντίζουμε ώστε τα άκρα του να είναι αποσυνδεδεμένα ώστε να μη κάψουμε το όργανο με κάποιο απότομο ρεύμα. Μόνο όταν μας δώσει την άδεια ο διδάσκοντας, μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις επάνω στο κύκλωμα.

Η χαρακτηριστική $I - V$ πρέπει να σχεδιαστεί σε χιλιοστομετρικό χαρτί στο εργαστήριο. Τα πρώτα σημεία που πρέπει να μετρήσετε και να τοποθετήσετε στη γραφική παράσταση είναι τα $(I_{SC}, 0)$ και $(0, V_{OC})$ με μηδενική αντίσταση και με άπειρη αντίσταση αντίστοιχα (τη μεγαλύτερη που μπορείτε να επιλέξετε στο κυτίο). Επειδή τα σημεία αυτά είναι τα ακραία (δείτε τα Σχήματα 5 ή 7), θα σας βοηθήσουν να επιλέξετε και κατάλληλες κλίμακες στο χαρτί ώστε να μεγιστοποιηθεί η γραφική σας παράσταση. Για να λάβουμε ενδιάμεσες τιμές στη γραφική παράσταση, πρέπει να μεταβάλλουμε την αντίσταση R , δηλαδή πρέπει να επιλέξουμε διαφορετικές τιμές στο κυτίο των αντιστάσεων. Μεγάλη σημασία έχει, να λάβουμε τις περισσότερες τιμές γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος στο Σχήμα 7α. Για να γίνει αυτό, ξεκινήστε από το σημείο $(I_{SC}, 0)$ και μεταβάλλετε το R μέχρι το ρεύμα σας να αρχίσει να πέφτει ελαφρά. Πάρτε μια μέτρηση και επαναλάβετε. Όταν το ρεύμα πέσει περίπου 30 % χαμηλότερα από το I_{SC} , τότε έχετε απομακρυνθεί αρκετά από το σημείο μέγιστης ισχύος και χρειάζεστε μόνο 5-6 ακόμα μετρήσεις μέχρι το σημείο $(0, V_{OC})$. Καταγράψτε τα ζεύγη τιμών στον Πίνακα 3.

Προαιρετικό: Παρατηρήστε ότι μπορείτε σε κάθε βήμα να υπολογίζετε χοντρικά την αντίσταση που χρειάζεστε, ακολουθώντας την εξής διαδικασία: (α) σε ένα πρόχειρο μιλιμετρέ χαρτί, κάνετε ένα

πρόχειρο διάγραμμα ρεύματος – τάσης, τοποθετώντας τα ακραία σημεία ($I_{SC}, 0$) και ($0, V_{OC}$) σε αυτό, (β) σχεδιάστε επάνω σε αυτό μια χοντρική καμπύλη με το χέρι, που να μοιάζει με αυτήν της καμπύλης όπως αυτή του Σχήματος 7β, και (γ) αποφασίστε σε τι τάση V (ή ρεύμα) θέλετε να βρεθείτε και από το αντίστοιχο ρεύμα I (ή τάση) της καμπύλης σας, υπολογίστε την αντίσταση ως $R = V/I$. Προσοχή, εάν η τάση είναι σε *Volt* και το ρεύμα σε *mA*, τότε η αντίσταση προκύπτει σε *kΩ*. Στον Πίνακα 3 καταγράφουμε την πραγματική αντίσταση που αναγράφεται επάνω στο κυτίο αλλά εάν θέλετε, μπορείτε να προσθέσετε μια επιπλέον γραμμή και να συμπεριλάβετε και τις δικές σας τιμές ώστε να δείτε πόσο κοντά ήσαστε σε αυτή, στο κάθε βήμα.

Σημείωση: Στο βολτόμετρο και το αμπερόμετρο, επιλέγουμε πάντοτε την καλύτερη δυνατή κλίμακα ώστε ούτε οι μετρήσεις μας να βγαίνουν εκτός του μεγίστου, αλλά ούτε και οι ενδείξεις να είναι κοντά στο μηδέν (οπότε και έχουν μικρή ακρίβεια). Για την κάθε κλίμακα που έχετε χρησιμοποιήσει, πρέπει να καταγράψετε και την αντίστοιχη ακρίβεια του οργάνου.

Πίνακας 3: Η καμπύλη $I - V$

$R(\Omega)$					
$I(mA)$					
$V(V)$					

Αφού τελειώσατε με τις μετρήσεις και θέσετε τη λυχνία εκτός λειτουργίας, μετρήστε τις διαστάσεις ενός από τα κύτταρα, χρησιμοποιώντας ένα χάρακα. Προσοχή: Να μη χαραχθεί η επιφάνεια του κυττάρου με κάποιο αιχμηρό αντικείμενο.

6 Συνοπτική ατομική έκθεση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ/ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ —ΠΑΡΑΤΗΜΑ (φύλλο μετρήσεων)

Κάθε φοιτητής/φοιτήτρια παραδίδει μια έκθεση, η οποία περιλαμβάνει

- το αρχείο EXCEL και
- το υπόλοιπο γραπτό (με τις γραφικές παραστάσεις!) σε μορφή pdf.

Η τελική μορφή της έκθεσής θα πρέπει να ακολουθεί πιστά τις οδηγίες συγγραφής που δίνονται στα «Έγγραφα» στις [ΓΕΝΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΡΓ 2023](#).

Κάθε έκθεση ελέγχεται για λογοκλοπή με το πρόγραμμα [Turnitin](#). Σε περίπτωση [λογοκλοπής](#) άνω του 30%, η έκθεση θα αξιολογηθεί με 0/10.

- ✓ Το όνομα του αρχείου περιέχει μόνο το αντίστοιχο τμήμα και τον αριθμό μητρώου του φοιτητή, για παράδειγμα τμήμα A1 και AM = 1020875 -> A1-1020875.pdf.

- ✓ Η εργασία θα παραδίνεται αυστηρά μέχρι μια εβδομάδα μετά την εκτέλεση της άσκησης ηλεκτρονικά μέσω του eclass «Εργασίες» στο πλαίσιο της σχετικής άσκησης.
- ✓ Κατά προτίμηση, οι εργασίες πρέπει να ανεβαίνουν σε μορφή PDF. Τα σχόλια του βαθμολογητή μπορούν να φανούν μόνο σε υπολογιστή με εφαρμογή που ανοίγει τέτοιου είδους αρχεία, όπως το Adobe Reader και όχι σε φυλλομετρητές του διαδικτύου ή σε κινητά. Εκεί τα σχόλια δεν εμφανίζονται ορθά.

Ζητούνται τα ακόλουθα στο κεφάλαιο «αποτελέσματα»:

Μέρος 1 Μέτρηση της αντίστασης

- (1) Έστω ότι συνδέετε μια τάση $V = 15\text{ V}$ σε ένα συσσωμάτωμα τριών αντιστάσεων. Τι ισχύει για τα ρεύματα και τις τάσεις των αντιστάσεων όταν αυτές είναι σε σειρά και όταν είναι παράλληλα;
- (2) Έστω ότι συνδέετε ένα ρεύμα $I = 380\text{ mA}$ σε ένα συσσωμάτωμα τριών αντιστάσεων. Τι ισχύει για τα ρεύματα και τις τάσεις των αντιστάσεων όταν αυτές είναι σε σειρά και όταν είναι παράλληλα;

Μέρος 2 Μέτρηση χαρακτηριστικής του φωτοβολταϊκού

- (3) Εξηγείστε το «φωτο-ηλεκτρικό» και το «φωτο-βολταϊκό» φαινόμενο με απλά λόγια.
- (4) Επάνω στην γραφική παράσταση $I - V$ που καταγράψατε στο εργαστήριο, φέρτε μια συνεχή καμπύλη που να περνάει όσο το δυνατόν εγγύτερα από τα σημεία σας. Σημειώστε τις σημαντικές παραμέτρους επάνω στη γραφική σας παράσταση (π.χ. το ρεύμα βραχυκυκλώματος, I_{SC} , την τάση ανοικτού κυκλώματος, V_{OC}).
- (5) Κατασκευάστε τη γραφική παράσταση $P - V$ της ισχύος (σε νέο διάγραμμα) συναρτήσει της τάσης για το κύτταρο που καταγράψατε τη χαρακτηριστική της. Βρείτε το σημείο της μέγιστης ισχύος και σημειώστε το και στις δυο γραφικές παραστάσεις (ισχύος και χαρακτηριστική).
- (6) Δώστε την γνωστή εξίσωση για την ισχύ P σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Εφαρμόστε την εξίσωση της μετάδοσης σφάλματος για την ισχύ ώστε να υπολογίσετε για μία από τις μετρήσεις σας το σφάλμα της P συναρτήσει των σφαλμάτων των μεταβλητών της.
- (7) Από τις παραπάνω δυο γραφικές παραστάσεις και με την βοήθεια του Σχήματος 7β, υπολογίστε τον «λόγο πλήρωσης» FF σύμφωνα με την Εξ. (5).
- (8) Εάν υποθέταμε ότι οι τιμές που καταγράψατε με το φως της λυχνίας, είναι παρόμοιες με αυτές που θα καταγράφατε με τη χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας, να υπολογίστε την απόδοση η του φωτοβολταϊκού σας χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (Προσοχή, το η είναι αδιάστατος αριθμός)

- (9) Σχολιάστε εάν το η που βρήκατε στο προηγούμενο βήμα είναι αναμενόμενο. Σημειώστε ότι η καλύτερες θεωρητικές τιμές για την απόδοση κυμαίνονται μεταξύ 25 και 28%. Προτείνετε τρόπους βελτίωσης αυτής της απόδοσης.
- (10) Εάν ήταν να χρησιμοποιήσετε το κύτταρο σας ως πηγή συνδέοντάς την σε ένα φόρτο και είχατε την δυνατότητα να ρυθμίσετε την αντίσταση του φόρτου, τι αντίσταση θα επιλέγατε;
- (11) Αναφέρατε τα απόλυτα σφάλματα και τυχόν συστηματικά σφάλματα (σε αριθμούς και μονάδες) που εμφανίζονται στις μετρήσεις σας.
- (12) Το βολτόμετρο συνδέεται πάντα σε παράλληλη σύνδεση στο κύκλωμα. Γιατί;
- (13) Το αμπερόμετρο συνδέεται πάντα σε σειρά στο κύκλωμα. Γιατί;

7 Βιβλιογραφία

- [1] R. A. Serway, “Physics for Scientists and Engineers, Volume 2”, Saunders College Publishing, 1990.
- [2] H. D. Young, “Πανεπιστημιακή Φυσική” Τόμος Α, Κεφ. 32, εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1994.
- [3] Σημειώσεις Δ. Κουζούδης στο eclass του Πανεπιστημίου Πατρών
- [4] [ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΑ 2023](#)