

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΟΥ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΑΠΟ ΧΑΛΚΟ (Cu) ΚΑΙ
ΥΠΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ (Cu₂O) ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ.

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΕΛΕΝΗ ΜΑΝΩΛΑΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΙΑΝΝΗΣ ΒΟΥΡΔΟΥΜΠΙΑΣ

ΧΑΝΙΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2005

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	σελίδα
Περιεχόμενα.....	1
Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	5
Ιστορικά.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Η ηλιακή ενέργεια.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Φύση του φωτός.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Ηλιακή ακτινοβολία και η ένταση της.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Ηλεκτρική αγωγιμότητα των στερεών	
4.1 Εισαγωγή.....	17
4.2 Ζώνες ενέργειας (Energy Bands).....	18
4.3 Αγωγιμότητα και θεωρία των ζωνών ενέργειας.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Ημιαγώγιμα υλικά	
5.1 Εισαγωγή.....	22
5.2 Ενδογενείς ημιαγωγοί – Ενδογενής αγωγιμότητα.....	22
5.3 Ημιαγωγοί με προσμίξεις.....	23
5.4 Φορείς πλειονότητας και φορείς μειονότητας.....	24
5.5 Ειδική αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς	
- Ειδική αγωγιμότητα ενδογενών ημιαγωγών.....	25
5.6 Ευκινησία φορέων, χρόνος ζωής, μήκος διαχύσεως.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Διέγερση και ιονισμός του ατόμου – Ηλεκτρονική θεωρία των	
μετάλλων	
6.1 Διέγερση και ιονισμός του ατόμου.....	28
6.2 Ηλεκτρονική θεωρία των μετάλλων.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Εκπομπή ηλεκτρονίων	
7.1 Γενικά.....	31
7.2 Έργο εξόδου.....	31
7.3 Φωτοηλεκτρική εκπομπή.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Η ένωση P – N	
8.1 Επαφή P – N.....	34
8.2 Επαφή P – N με εξωτερική τάση.....	35

8.3 Το ανάστροφο ρεύμα κόρου.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή	
9.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	37
9.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	37
9.3 Η απορρόφηση της ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	38
9.4 Φωτονική ροή.....	40
9.5 Φωτοαγωγιμότητα.....	40
9.6 Φωτόρευμα.....	41
9.7 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων – Πρώτη προσέγγιση.....	42
9.8 Ο συντελεστής πλήρωσης.....	43
9.9 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων – Δεύτερη προσέγγιση.....	44
9.10 Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	45
9.11 Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης ($I - V$).....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
10.1 Σκοπός (Aim) του πειράματος.....	48
10.2 Διαδικασία κατασκευής του ηλιακού στοιχείου.....	48
10.3 Περιγραφή του πειράματος.....	50
10.3.1 Πειραματικές συσκευές.....	50
10.3.2 Πειραματική διαδικασία.....	50
10.4 Μεθοδολογία ανάλυσης (Methodology).....	52
10.5 Αποτελέσματα πειραμάτων (Results).....	53
10.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	58
10.7 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	69
10.8 Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων.....	72
10.9 Συμπεράσματα (Conclusions).....	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78
Παράρτημα Α: Φωτογραφική τεκμηρίωση.....	79
Παράρτημα Β: Επίλυση 2 ασκήσεων.....	86

Πρόλογος

Στην εργασία αυτή που έχει τίτλο κατασκευή και λειτουργία μικρού φωτοβολταϊκού στοιχείου από χαλκό (Cu) και υποξείδιο του χαλκού (Cu₂O) και διερεύνηση της συμπεριφοράς του, περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του και αναλύονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που έγιναν για διαφορετική κάθε φορά ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια η ανθρωπότητα έχει αρχίσει να συνειδητοποιεί τους κινδύνους για την τεράστια καταστροφή που θα αντιμετωπίσουν οι σημερινές και μελλοντικές γενιές από την ελευθέρωση στην ατμόσφαιρα μεγάλων ποσοτήτων αερίων που προέρχονται από τις καύσεις του πετρελαίου, του άνθρακα και του φυσικού αερίου μέσα στα τελευταία διακόσια χρόνια.

Αποτελέσματα των παραπάνω είναι το γνωστό φαινόμενο του θερμοκηπίου, που έχει ως συνέπεια την αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας της Γης, γεγονός που με τη σειρά του επιφέρει αλλοιώσεις στις κλιματολογικές συνθήκες και μπορεί τελικά να προκαλέσει καύσωνες, αλλοίωση του προτύπου των βροχοπτώσεων και άλλες κλιματικές αλλαγές, οφειλόμενες στις υψηλές συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Επίσης η όξινη βροχή και η τρύπα του όζοντος έχουν προκαλέσει τεράστια προβλήματα καθώς τέλος και η σημαντική αλλοίωση του φυσικού χώρου, που συνοδεύει αναπόφευκτα την εξόρυξη πετρελαίου και άνθρακα.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις των φαινομένων αυτών που επιβαρύνουν το περιβάλλον επιβάλλεται η αναζήτηση ενέργειας από ήπιες και ανανεώσιμες πηγές, οι οποίες είναι φιλικές στο περιβάλλον. Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ξεκίνησε, ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '70.

Ουσιαστική είναι όμως και η πρόληψη των εξής μέτρων:

A) Να περιοριστεί η έκλυση του διοξειδίου του άνθρακα, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας τις καύσεις των ορυκτών καυσίμων

B) Να εξοικονομείται ενέργεια με τη κατασκευή συσκευών προηγμένης τεχνολογίας.

Γ) Να επεκταθεί η χρησιμοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (θέρμανση από τον ήλιο, παραγωγή ηλεκτρισμού από ήλιο με φωτοβολταϊκά συστήματα ή από τον άνεμο με ανεμογεννήτριες, ή από το νερό με μικρά υδροηλεκτρικά έργα, μετατροπή αγροτικών υπολειμμάτων σε καύσιμα, εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων) στο βαθμό που μπορούν να προσφέρουν ενέργεια στην κλίμακα και την ποιότητα που χρειαζόμαστε.

Είναι φανερό ότι η ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας ενισχύει την προώθηση των πιο πάνω μέτρων. Οι δυνατότητες εφαρμογής στην Ελλάδα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι πάρα πολλές κυρίως στην νησιωτική περιοχή, χάρη στο γεγονός ότι η Ελλάδα είναι μια Χώρα με μεγάλη ηλιοφάνεια οπότε και προσφέρεται για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

Έτσι πιστεύουμε ότι πρέπει να υπάρξει ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε πολλές περιοχές της Ελλάδας και ειδικότερα να ηλεκτροδοτηθούν πολλοί από τους περίπου 1.000 μικρούς οικισμούς, με συνολικό πληθυσμό 50.000 κατοίκων, που δεν έχουν ακόμα συνδεθεί με το δίκτυο της ΔΕΗ, καθώς και τις άλλες περίπου 50.000 κατοικίες, διάσπαρτες σε διάφορες περιοχές της χώρας, που είναι χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα.

Παρόλο που από οικονομικής πλευράς η μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια με τη μέθοδο των φωτοβολταϊκών στοιχείων δεν συναγωνίζεται προς το παρόν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τους γνωστούς κλασσικούς τρόπους υπάρχουν μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης διότι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διαθέτουν κάποια βασικά πλεονεκτήματα. Αυτά είναι η απουσία κινούμενων τμημάτων και η ενεργειακή τους αυτονομία. Ακόμα έχουν μεγάλη διάρκεια ωφέλιμης ζωής γύρω στα τριάντα χρόνια, χαμηλή αναλογία βάρους ανά αποδιδόμενη μονάδα ισχύος (Kg / W), περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης και το σημαντικότερο δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον, αφού τα φωτοβολταϊκά στοιχεία απορροφούν μόνο ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν αθόρυβα ηλεκτρισμό χωρίς να καταναλώνουν πρώτες ύλες και χωρίς να παράγουν τοξικά ή άλλα αέρια θερμοκηπίου και όξινης βροχής.

Χρέος λοιπόν όλων μας, είναι να συνειδητοποιήσουμε την αξία που έχει το περιβάλλον για εμάς και να το προστατέψουμε χρησιμοποιώντας τις ήπιες μορφές ενέργειας και όχι τα συμβατικά καύσιμα.

Έτσι αποφασίσαμε να ασχοληθούμε με την κατασκευή ενός μικρού φωτοβολταϊκού στοιχείου από χαλκό (Cu) και υποξείδιο του χαλκού (Cu₂O) και να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία θα πρέπει λοιπόν να επεκταθεί σε όλες τις χώρες του κόσμου αναπτυγμένες και μη.

Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη βοήθεια του και συνεργασία στην εκπόνηση της πτυχιακής μου τον Κύριο Γιάννη Βουρδουμπά, Επισκέπτη Καθηγητή στο ΤΕΙ Χανίων.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής ενός πειραματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου που αποτελείται από ένα απλό φύλλο χαλκού όπως πωλείται στο εμπόριο και ένα δεύτερο φύλλο χαλκού ίδιου μεγέθους με το πρώτο που έχει υποστεί κατάλληλη επεξεργασία στο μάτι της ηλεκτρικής κουζίνας και έχει μετατραπεί σε υποξείδιο του χαλκού (Cu_2O). Στερεώνονται αντικριστά σε ένα τάπερ, έτσι ώστε ένα μέρος της επιφάνειας τους να είναι εμβαπτισμένο στο αλατόνερο.

Γίνεται η κατασκευή τριών φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπου τα δύο έχουν διαστάσεις $(15,2*15,2) \text{ cm}^2$ και το τρίτο έχει διαστάσεις $(11,4*11,4) \text{ cm}^2$. Εν συνεχεία μελετάται η λειτουργία τους για διάφορες τιμές προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και εξάγονται συμπεράσματα. Γίνεται μετά και σύνδεση σε σειρά του ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου διαστάσεων $(15,2*15,2) \text{ cm}^2$ με το φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(11,4*11,4) \text{ cm}^2$, μελετάται επίσης η λειτουργία τους και γίνεται εξαγωγή συμπερασμάτων.

Αρχικά γίνεται μια αναφορά στην ηλιακή ενέργεια του πλανήτη μας και συνεπώς με αξιοποίηση της μπορούμε να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια. Το φαινόμενο της απευθείας μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται φωτοβολταϊκό και οι αντίστοιχες συσκευές φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης αναφέρεται η φύση του φωτός, η ηλιακή ακτινοβολία και η ένταση της.

Στη συνέχεια γίνεται ο χωρισμός των υλικών σε τρεις κατηγορίες: σε αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές ανάλογα με τη συμπεριφορά που παρουσιάζουν στο ηλεκτρικό ρεύμα. Γίνεται αναφορά στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των υλικών και για την εξήγηση του φαινομένου αυτού, εισάγονται οι ενεργειακές ζώνες και εξηγείται τι συμβαίνει ξεχωριστά σε κάθε κατηγορία με βάση τη θεωρία των ζωνών ενέργειας.

Εισάγονται τα είδη των ημιαγωγών, εν συνεχεία. Έχουμε δύο είδη ημιαγωγών: τους ενδογενείς και τους ημιαγωγούς με προσμίξεις. Σ' αυτούς η αγωγιμότητα τους οφείλεται σε φορείς που προέρχονται κυρίως από προσμίξεις. Ενώ στους ενδογενείς ημιαγωγούς η αγωγιμότητα τους δεν οφείλεται σε ξένους παράγοντες, αλλά προέρχεται από την ενδογενή διέγερση ηλεκτρονίων σθένους προς τη ζώνη αγωγιμότητας. Επίσης οι ημιαγωγοί προσμίξεων διακρίνονται σε δύο τύπους. Στους ημιαγωγούς τύπου n και στους ημιαγωγούς τύπου p. Επίσης αναφέρεται η ειδική αγωγιμότητα των ενδογενών ημιαγωγών και εισάγονται οι όροι ευκινησία φορέων, χρόνος ζωής και μήκος διαχύσεως.

Γίνεται αναφορά στη διέγερση και στον ιονισμό του ατόμου και στην ηλεκτρονική θεωρία των μετάλλων. Εν συνεχεία περιγράφεται η εκπομπή ηλεκτρονίων από ένα μέταλλο, το

έργο εξόδου που αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος ενός υλικού και ακόμα γίνεται αναφορά στη φωτοηλεκτρική εκπομπή, που είναι η εκπομπή ηλεκτρονίων από μια επιφάνεια όταν πέσει πάνω της ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Περιγράφεται η επαφή P – N και οι τρόποι σύνδεσης της με μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσεως. Γίνεται αναφορά και στο ρεύμα κόρου.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων και περιγράφεται η λειτουργία τους. Εξηγείται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και εισάγονται μερικές έννοιες όπως φωτονική ροή, φωτοαγωγιμότητα κ.α. Γίνεται προσέγγιση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων και αναφορά στην απόδοσή τους.

Μπαίνοντας στον τομέα της κατασκευής περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του φωτοβολταϊκού στοιχείου από χαλκό (Cu) / υποξείδιο του χαλκού (Cu₂O). Ακόμα αναφέρονται οι συσκευές και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Γίνεται αναφορά εν συνεχεία στην πειραματική διαδικασία καθώς και στη μεθοδολογία ανάλυσης. Εξάγονται τα αποτελέσματα από τα πειράματα που έγιναν και γίνεται ανάλυση αυτών σχεδιάζοντας τα διαγράμματα I(current) – V(voltage) και P(power) – V(voltage). Μετά γίνεται ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης σε καθένα από αυτά και γίνεται τέλος εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ακολουθεί εν συνεχεία το παράρτημα Α που περιλαμβάνει τη φωτογραφική τεκμηρίωση και το παράρτημα Β που περιλαμβάνει την επίλυση δύο ασκήσεων.

SUMMARY

This thesis concerns the construction of a small photovoltaic cell from simple raw materials (Cu). The copper is reacted to create Cu_2O and the combination of Cu - Cu_2O forms a simple photovoltaic cell when they are placed in a small plastic basin with salty water.

After the construction of the photovoltaic cell, its behaviour is investigated under different operating conditions.

During the experimental work of this study, the I(current) – V(voltage) and P(power) – V(voltage) curves of the cell are created under different solar radiation conditions. After that two photovoltaic cells are connected in series and again the I – V and P – V curves are created.

The efficiencies of the cells are estimated and the conclusions from the experimental study are presented.

In the last part of this study the design of a solar pump and a solar summer house is presented.

This study was implemented in the TEI of CRETE, branch of Chania, Department of Natural resources and Environment, Laboratory of R.E.S. during the year 2004.

Ιστορικά

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Becquerel το 1839, το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο από PbS κατασκευάστηκε το 1937 από τους Fischer και Godden. Το 1939 κατασκευάστηκε το πρώτο Φ/Β στοιχείο από Se με απόδοση 1% από τον Ohl, και το 1941 από τον ίδιο το πρώτο στοιχείο από Si. Η εξέλιξη τεχνολογίας των Φ/Β στοιχείων είναι από τότε συνεχής με κυριότερους σταθμούς:

- > Το 1954 κατασκευή Φ/Β στοιχείου από Si με σχηματισμό ένωσης p-n με διάχυση προσμίξεων και βαθμό απόδοσης 6% από τους Fuller, Pearson, Chappin.
- > Το 1956 Εμπορική παραγωγή Φ/Β στοιχείων (εταιρεία Hoffmann)
- > Το 1958 εκτόξευση Αμερικανικού και Σοβιετικού δορυφόρου εξοπλισμένων με Φ/Β στοιχεία.
- > Το 1972 κατασκευή του «ιώδους» Φ/Β στοιχείου Si με απόδοση 14% από τους Lindmayer και Allison.
- > Το 1976 κατασκευή Φ/Β στοιχείου από άμορφο Si με απόδοση 0,01%
- > Το 1977 κατασκευή Φ/Β στοιχείου από GaAs με απόδοση 16% από τον Kamenth.
- > Το 1983 έναρξη της λειτουργίας Φ/Β σταθμού στη Βίκτορβιλ της Καλιφόρνιας ισχύος 1MW.

Με δεδομένη και δοκιμασμένη στον εχθρικό διαστημικό χώρο (τεχνητοί δορυφόροι) την αξιοπιστία λειτουργίας και την αντοχή των Φ/Β στοιχείων τα κριτήρια αξιολόγησής τους σήμερα είναι η απόδοση και το κόστος τους.

Ως απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου ορίζουμε τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφά. Η απόδοση των Φ/β στοιχείων δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το φορτίο που τροφοδοτείται από το Φ/β στοιχείο, την θερμοκρασία λειτουργίας του Φ/β στοιχείου και την μορφή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Για την εκτίμηση του κόστους των Φ/Β στοιχείων χρησιμοποιείται ο όρος Watt αιχμής (W_{peak} , W_p) Όταν λέμε ότι το κόστος ενός Φ/Β στοιχείου είναι 10 €/W_p εννοούμε ότι το κόστος ενός ή περισσότερων Φ/Β στοιχείων με επιφάνεια τόση ώστε να παράγει 1W όταν δέχεται ακτινοβολία πυκνότητας 1KW/m² είναι 10€.

Όσον αφορά στην απόδοση των Φ/Β στοιχείων η τεχνολογική εξέλιξη οδηγεί αργά αλλά σταθερά προς τον μέγιστο θεωρητικό βαθμό απόδοσης που είναι το 25%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Η ηλιακή ενέργεια

Καθημερινά ο πλανήτης μας <<λούζεται>> με ασύλληπτα ποσά ηλιακής ενέργειας. Η ισχύς που ακτινοβολεί ο ήλιος προς όλες τις κατευθύνσεις είναι ίση με $4 \cdot 10^{26}$ W. Φυσικά η περισσότερη διασκορπίζεται στο αχανές σύμπαν και μόνο ένα πολύ μικρό μέρος φτάνει στη Γη. Συγκεκριμένα, σε κάθε τετραγωνικό μέτρο του πλανήτη μας προσπίπτει ισχύς μόνο 1 KW. Παρόλο το μικρό μέγεθος της ισχύος αυτής, η ενέργεια που δέχεται η Γη σε όλη της την επιφάνεια είναι 20.000 φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια που ξοδεύει όλη η ανθρωπότητα για τις ανάγκες της με οποιαδήποτε μορφή. Ακόμα η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που φτάνει ετησίως στη Γη είναι ισοδύναμη με περισσότερο από 15.000 φορές την παγκόσμια ετήσια χρησιμοποιούμενη ενέργεια που παράγεται από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής.

Θεωρώντας την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη Γη σε ποσοστό 100% από αυτήν:

- το 34% ανακλάται στο διάστημα
- το 19% απορροφάται στην ατμόσφαιρα
- ενώ η επιφάνεια του εδάφους δέχεται άμεση ακτινοβολία κατά 24% - και έμμεση (διάχυτη) ακτινοβολία κατά 23%.

Δηλαδή η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που τελικά προσπίπτει στην επιφάνεια του εδάφους είναι 47%.

Η Ελλάδα είναι χώρα με μεγάλη ηλιοφάνεια (3.000 ώρες το χρόνο) οπότε και προσφέρεται για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Η τοποθεσία της στην υδρόγειο ευνοεί την εκμετάλλευση της καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, με μέση ημερήσια ενέργεια που δίνεται από τον ήλιο στην Ελλάδα να είναι της τάξης των $4,6 \text{ KWh} / \text{m}^2$.

Με αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μπορούμε να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Ήδη από τον προηγούμενο αιώνα, περίπου από το 1840, διαπιστώθηκε ότι αυτό είναι δυνατό με τη βοήθεια των ημιαγωγών. Το φαινόμενο της μετατροπής αυτής ονομάστηκε φωτοβολταϊκό και οι αντίστοιχες συσκευές φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Από υφιστάμενες αναλύσεις υπολογίζεται ότι ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια (ανά μονάδα χρόνου) υπό μορφή ακτινοβολίας ισχύος $3,72 \cdot 10^{23}$ KW. Η ποσότητα εκπεμπόμενης ενέργειας, ανά μονάδα χρόνου, που φτάνει σε μια μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της ακτινοβολίας, στη μέση ετήσια απόσταση γης – ήλιου, ονομάζεται ηλιακή σταθερά και ισούται με $1367 \text{ W} / \text{m}^2$.

Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται στα μικρά μήκη κύματος, δηλαδή έως τα 3 με 4 μm . Επομένως, ακτινοβολία μεγαλύτερη των 4 μm ονομάζεται ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την γήινη ατμόσφαιρα ομοιάζει με το φάσμα μαύρου σώματος θερμοκρασίας 5900K. Το 99% της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνεται σε μήκη κύματος από 0,25 έως 4 μm . Στο ορατό τμήμα της ακτινοβολίας (0,39-0,77 μm) περιέχεται το 46,41% της ενέργειας, ενώ στο υπεριώδες (μήκος κύματος < 0,4 μm) περιέχεται το 8,03%. Τέλος η φασματική περιοχή του ηλιακού φωτός με μήκος κύματος > 0,77 μm περιέχει το υπόλοιπο 45,56% της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Η γήινη ατμόσφαιρα αποτελείται από 78% κατ' όγκο άζωτο 20,9% οξυγόνο, 0,9% αργό και 0,33% διοξείδιο του άνθρακα. Επιπρόσθετα η γήινη ατμόσφαιρα περιέχει υδρατμούς και σωματίδια.

Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την είσοδο της στην γήινη ατμόσφαιρα υφίσταται απορρόφηση και σκέδαση. Οι κυριότεροι απορροφητές της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι τα νέφη, οι υδρατμοί, το όζον και το διοξείδιο του θείου. Η σκεδασθείσα ακτινοβολία ονομάζεται διάχυτη και ένα μέρος της επιστρέφει στο διάστημα, ενώ ένα μέρος της κατευθύνεται στην γη. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος κατευθείαν από τον ήλιο, χωρίς να υποστεί σκέδαση, αλλά μόνο απορρόφηση ονομάζεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Τέλος, η ολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας.

Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας καθορίζει την ωφέλιμη ισχύ που παράγει το φ/β στοιχείο. Δεδομένης της διαρκούς μεταβολής της θέσεως του ήλιου ως προς την επιφάνεια της γης, θα έπρεπε να μεταβάλλεται συνεχώς η κλίση του φ/β ώστε να επιτυγχάνεται κάθετη πρόσπτωση των ηλιακών ακτινών σ' αυτό. Λόγω των σοβαρών κατασκευαστικών δυσκολιών αλλά και των αντίστοιχων οικονομικών προβλημάτων που θα προκαλούσε μια τέτοια επιλογή, προτιμάται συνήθως σταθερή κλίση τοποθέτησης των φ/β. Οι επιλεγόμενες γωνίες (γωνία) κλίσης εξαρτώνται από την επιθυμητή χρήση και την εποχή του έτους. Κατά προσέγγιση η βέλτιστη κλίση του φ/β πλαισίου είναι εκείνη η οποία επιτυγχάνει την κατά το δυνατό κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας για την υπό μελέτη χρονική περίοδο. Για τις περιοχές της χώρας μας η προτεινόμενη κλίση των πλαισίων είναι περίπου 10°-15° μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής για τη χειμερινή περίοδο. Αντίστοιχα, για την καλοκαιρινή περίοδο η προτεινόμενη κλίση των φ/β κυμαίνεται μεταξύ των 10°-15°.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Φύση του φωτός

A. Κυματική φύση του φωτός. Η φύση του φωτός δεν είχε εξηγηθεί ικανοποιητικά μέχρι τις αρχές του αιώνα μας. Πριν από 300 περίπου χρόνια ο Νεύτωνας διατύπωσε τη θεωρία ότι το φως αποτελείται από σωματίδια, ενώ αντίθετα ο Huygens διατύπωσε τη θεωρία ότι το φως είναι κύματα, που διαδίδονται στο υποθετικό ελαστικό μέσο, που ονομάστηκε αιθέρας. Πολλά φαινόμενα (όπως η συμβολή, η περίθλαση, η πόλωση του φωτός) απέδειξαν οριστικά ότι το φως είναι εγκάρσια κύματα και βοήθησαν ώστε από τη γενική εξίσωση των κυμάτων $c = v \cdot \lambda$ να υπολογιστεί το μήκος κύματος λ των ορατών ακτινοβολιών.

Αργότερα ο Maxwell (1865) απέδειξε ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δηλαδή είναι διάδοση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η οποία δεν έχει ανάγκη από τον παράδοξο υποθετικό αιθέρα. Έτσι αποδείχτηκε ότι:

Το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα (κυματική φύση του φωτός). Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell ενώ εξηγεί όλα σχεδόν τα φαινόμενα της οπτικής δεν μπορεί να εξηγήσει ορισμένα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την επίδραση του φωτός επί της ύλης. Σ' αυτά ανήκει και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

B) Θεωρία των κβάντα. Το φως εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης. Από την παρατήρηση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα άτομα εκπέμπουν και απορροφούν τις ακτινοβολίες συνεχώς. Αυτή όμως η αντίληψη για την εκπομπή και την απορρόφηση των ακτινοβολιών δεν μπορεί να εξηγήσει ορισμένα φαινόμενα που παρατηρούμε, όταν συμβαίνει κάποια δράση μεταξύ της ακτινοβολίας και της ύλης, όπως π.χ. συμβαίνει στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Ο Planck (1900) για να εξηγήσει μερικά από τα παραπάνω φαινόμενα διατύπωσε τη θεωρία των κβάντα, την οποία αργότερα γενίκευσαν ο Einstein, ο Bohr και άλλοι. Το 1905 ο Einstein στηριζόμενος στη θεωρία του Planck εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (το φαινόμενο αυτό βοήθησε στη σταδιακή κατασκευή των πρώτων φωτοβολταϊκών στοιχείων) και συνετέλεσε στη γενίκευση της θεωρίας των κβάντα.

Σύμφωνα με τη θεωρία των κβάντα το άτομο εκπέμπει τη φωτεινή ενέργεια ασυνεχώς, δηλαδή εκπέμπει ξεχωριστές ποσότητες ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα ή φωτόνια. Από το άτομο δεν φεύγουν συνεχώς κύματα., αλλά διαδοχικά εκπέμπονται ομάδες κυμάτων (κυματοσυρμοί), που καθεμιά από αυτές αποτελεί ένα φωτόνιο και κλείνει μέσα της ορισμένη ενέργεια E . Όταν η φωτεινή ακτινοβολία πέφτει πάνω στην ύλη, το κάθε

άτομο απορροφά ασυνεχώς την ακτινοβολία, δηλαδή απορροφά ξεχωριστά φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιας ακτινοβολίας, που έχει συχνότητα ν , κλείνει μέσα του ενέργεια E που είναι ίση με $E = h * \nu$ όπου h είναι μια σταθερά, που ονομάζεται σταθερά του Planck και είναι ίση με $6,625 * 10^{-34}$ Joule*sec.

Η θεωρία των κβάντα δέχεται την κυματική φύση του φωτός, όπως τη διατυπώσαμε παραπάνω και ερμηνεύει πως τα άτομα της ύλης εκπέμπουν και απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ωστε:

- 1) Η θεωρία των κβάντα δέχεται ότι τα άτομα της ύλης εκπέμπουν και απορροφούν την ακτινοβολία με τη μορφή φωτονίων.
- 2) Κάθε φωτόνιο είναι μια ομάδα κυμάτων που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός.
- 3) Το φωτόνιο μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας μεταφέρει ενέργεια (E) ανάλογη με τη συχνότητα (ν) της ακτινοβολίας και ίση με $E = h * \nu$.

Με την εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου καθιερώθηκε και η σωματιδιακή θεωρία του φωτός δίπλα από την κυματική θεωρία. Σε φαινόμενα όπου το φως έχει φωτόνια μεγάλης ενέργειας η σωματιδιακή εμφάνιση του φωτός υπερέχει και η εξήγηση γίνεται με τη σωματιδιακή θεωρία, ενώ σε περιπτώσεις φωτός με φωτόνια χαμηλής ενέργειας η κυματική εμφάνιση υπερέχει και η εξήγηση γίνεται με την κυματική θεωρία.

Οι δύο θεωρίες συμπληρώνουν η μια την άλλη και αυτό φαίνεται από το ότι η ενέργεια κάθε φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητας που είναι μέγεθος συνδεδεμένο με τα κύματα.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο που είναι η εξαγωγή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια μετάλλου που φωτίζεται και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο που είναι η δημιουργία τάσης μεταξύ των δύο άκρων μιας κρυσταλλοδιόδου που φωτίζεται, εξηγούνται με τη σωματιδιακή θεωρία. Ότι δηλαδή η ενέργεια του φωτός που προσπίπτει στο υλικό κατανέμεται σε φωτόνια και σε περίπτωση που ένα φωτόνιο συναντήσει ένα ηλεκτρόνιο στο εσωτερικό του υλικού, του δίνει όλη την ενέργεια του. Φυσικά το αποτέλεσμα όλης αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από το είδος του υλικού και από την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που είναι ανάλογη προς τη συχνότητα της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Ηλιακή ακτινοβολία και η ένταση της

Ο ήλιος (εκ του αβέλιος – αέλιος – ηέλιος = ο ακτινοβολών, ο πυρπολών) είναι απλανής αστέρας μέσου μεγέθους που λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών των στοιχείων που τον συνθέτουν μεταξύ των οποίων και το υδρογόνο, τα μόρια αλλά και τα άτομα τους βρίσκονται σε μια κατάσταση ‘‘νέφους’’ θετικών και αρνητικών φορτίων ή κατάσταση πλάσματος, όπως ονομάστηκε.

Σ’ αυτές τις θερμοκρασίες, μερικών εκατομμυρίων °C, οι ταχύτατα κινούμενοι πυρήνες υδρογόνου (H) συσσωματώνονται, υπερνικώντας τις μεταξύ τους απωστικές ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και δημιουργούν πυρήνες του στοιχείου ηλίου (He). Η πυρηνική αυτή αντίδραση – σύντηξη πυρήνων είναι εξώθερμη και χαρακτηρίζεται από τη γνωστή μας έκλυση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας ή θερμότητας ή όπως συνηθίζεται να λέγεται ηλιακής ενέργειας, που ακτινοβολείται προς όλες τις κατευθύνσεις στο διάστημα.

Η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη γη με ταχύτητα 300.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο μεταφέροντας ενέργεια υπό μορφή κυμάτων ή σωματιδίων που ονομάζονται φωτόνια.

Η φασματοσκοπική ανάλυση της ακτινοβολίας δείχνει τα διάφορα χρώματα που περιέχονται σε αυτή. Όλα αυτά τα χρώματα, στο σύνολο τους αποτελούν το ηλιακό φάσμα. Σε κάθε χρώμα του ηλιακού φάσματος αντιστοιχεί μια συχνότητα. Στο ένα άκρο του φάσματος υπάρχει το κόκκινο χρώμα με συχνότητα $4,3 \cdot 10^{14}$ ταλαντώσεις το δευτερόλεπτο ακολουθεί το πορτοκαλί, το κίτρινο, το πράσινο, το μπλε και τέλος στο άλλο άκρο υπάρχει το ιώδες χρώμα με συχνότητα $7,5 \cdot 10^{14}$ ταλαντώσεις το δευτερόλεπτο.

Ο χρόνος μιας ταλάντωσης ενός σημείου που βρίσκεται στη διεύθυνση μετάδοσης του κύματος ονομάζεται περίοδος (T). Η περίοδος για το ιώδες είναι $1,3 \cdot 10^{-15}$ δευτερόλεπτα και για το κόκκινο $2,3 \cdot 10^{-15}$ δευτερόλεπτα. Η σχέση μεταξύ συχνότητας και περιόδου είναι:

$$T = 1 / \nu$$

Το μήκος κύματος λ είναι η απόσταση που διανύει το κύμα μέσα στο χρόνο της περιόδου και βρίσκεται από τον τύπο $\lambda = u \cdot T$.

Ωστε το μήκος κύματος για το ιώδες είναι $4 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0,4 \text{ }\mu\text{m}$ και το μήκος κύματος για το κόκκινο είναι $7 \cdot 10^{-7} \text{ }\mu\text{m}$.

Το φάσμα μεταξύ του κόκκινου και του ιώδους χρώματος που περιλαμβάνει όλα τα γνωστά χρώματα αποτελεί το ορατό ηλιακό φάσμα και περιλαμβάνει μόνο τα 44% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός από το ορατό, περιλαμβάνει την αόρατη υπέρυθρη ακτινοβολία που βρίσκεται μετά το άκρο που βρίσκεται το κόκκινο και έχει μήκος κύματος μεγαλύτερο των 0,7 μm, που αποτελεί το 50% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας. Περιλαμβάνει επίσης την αόρατη υπεριώδης ακτινοβολία που βρίσκεται μετά το άκρο του ιώδους χρώματος με μήκος κύματος μικρότερο των 0,4 μm, που αποτελεί τα 6% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας. Περιλαμβάνει ακόμα τα μικροκύματα, τα ραδιοκύματα, τις ακτίνες χ, τις ακτίνες γ και τέλος τις κοσμικές ακτίνες.

Όπως αναφέρθηκε, η ενέργεια κάθε φωτονίου βρίσκεται από τη σχέση $E = h \cdot \nu$ όπου h η σταθερά του Planck και ν η συχνότητα του κύματος στο οποίο ανήκει το φωτόνιο.

Με εφαρμογή της παραπάνω σχέσης υπολογίζεται ότι η ενέργεια κάθε φωτονίου του ορατού ηλιακού φάσματος κυμαίνεται μεταξύ της τιμής $2,85 \cdot 10^{-19}$ Joule που έχει το φωτόνιο του κόκκινου χρώματος και της τιμής $4,97 \cdot 10^{-19}$ Joule που έχει το φωτόνιο του ιώδους χρώματος.

Ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο προκαλείται από φωτόνια μεγάλης ενέργειας και σε αυτά αντιστοιχούν μεγάλες συχνότητες του ηλιακού φάσματος. Οι συχνότητες αυτές αποτελούν το 75% του φάσματος περίπου ενώ οι υπόλοιπες δεν προκαλούν αξιοσημείωτα αποτελέσματα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Σημαντικό μέγεθος για την αποτελεσματικότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας συμβολίζεται με B και ορίζεται το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε επιφάνεια ενός m^2 σε ένα δευτερόλεπτο.

$$B = E / (S \cdot t) = P / S$$

Όπου E είναι η ενέργεια και P η ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια S σε χρόνο t . Μονάδες της έντασης είναι Joule / ($m^2 \cdot sec$) ή Watt / m^2 .

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα σημεία μεταξύ του ήλιου και της επιφάνειας της γης βρίσκεται από τον τύπο:

$$B_o = E_o / (4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot t) = P_o / (4 \cdot \pi \cdot r^2)$$

Όπου E_o είναι η ολική ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο σε χρόνο t και φτάνει στην εσωτερική επιφάνεια $4 \cdot \pi \cdot r^2$ νοητής σφαίρας που έχει ακτίνα r .

Η ένταση δηλαδή ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από τον ήλιο. Στην αρχή της ατμόσφαιρας της γης η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

$$B_o = E_o / (4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot t) = P_o / (4 \cdot \pi \cdot R^2) \text{ με } R \text{ η απόσταση ήλιου - γης.}$$

Σε όλη τη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα της γης έχουμε ελάττωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω απορρόφησης.

Στην περίπτωση που η ατμόσφαιρα είναι καθαρή και ο ήλιος βρίσκεται αρκετά ψηλά ώστε οι ακτίνες να προσπίπτουν σχεδόν κάθετα στην επιφάνεια της γης, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια απ' ευθείας είναι γύρω στα 72%. Ένα ποσοστό 7% φτάνουν μετά από διάχυση στα σωματίδια της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια και τα υπόλοιπα 18% απορροφούνται από το όζον, τους υδρατμούς, τον αέρα και την σκόνη, ενώ 3% επιστρέφει πίσω στο διάστημα.

Όταν οι ποσότητες των υδρατμών και της σκόνης είναι περισσότερες, η απορρόφηση σαφώς είναι πιο μεγάλη και έτσι το ποσοστό που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι μικρότερο. Η απορρόφηση εξαρτάται ακόμα από τη μάζα αέρα που συναντά η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διαδρομή της προς την επιφάνεια της γης. Αυτό έχει σχέση με το μήκος της διαδρομής της μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου.

Το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα δίνεται συμβατικά από την κλίμακα μάζας αέρα MA. Μέτρο της μάζας αέρα είναι η τέμνουσα της ζενιθιακής απόστασης ζ και ανάλογα με τη θέση του ήλιου εκφράζεται σαν Ματεμζ. Ζενιθιακή απόσταση ζ είναι η γωνία μεταξύ της θέσης του ήλιου και της κατακόρυφου. Δηλαδή η Ματεμζ ουσιαστικά εκφράζει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.

Εκτός από την ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια και η κατανομή της ενέργειας κατά μήκος κύματος επηρεάζεται από την ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό είναι πολύ βασικό στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική διότι η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων εξαρτάται από τα μήκη κύματος (χρώματα) που υπάρχουν μέσα στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Ηλεκτρική αγωγιμότητα των στερεών

4.1 Εισαγωγή

Τα υλικά ανάλογα με τη συμπεριφορά τους στο ηλεκτρικό ρεύμα διακρίνονται σε αγωγούς (conductors) ημιαγωγούς (semiconductors) και μονωτές (insulators). Οι ηλεκτρικοί αγωγοί είναι κυρίως μεταλλικά στερεά με μικρή ειδική ηλεκτρική αντίσταση ($1,6 \cdot 10^{-8} - 1,4 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$), ενώ οι μονωτές έχουν μεγάλη ειδική αντίσταση που κυμαίνεται από 10^7 μέχρι $10^{18} \Omega\text{m}$ στη θερμοκρασία δωματίου. Οι ημιαγωγοί έχουν ενδιάμεση ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ των αγωγών και των μονωτών η οποία κυμαίνεται από 10^{-4} μέχρι $10^6 \Omega\text{m}$ στη θερμοκρασία δωματίου. Ο καθαρός χαλκός, που είναι ένας καλός αγωγός, έχει μια ειδική αντίσταση μόνο $3 \cdot 10^{-6} \Omega\text{.cm}$.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των υλικών είναι αποτέλεσμα της κίνησης των ηλεκτρονίων, των ιόντων ή και των δυο μέσα στη μάζα τους.

Τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας των ατόμων, γνωστά ως ηλεκτρόνια σθένους (valence electrons) καθορίζουν την ηλεκτρική συμπεριφορά των υλικών. Στα μέταλλα τα ηλεκτρόνια σθένους είναι ευκίνητα (ελεύθερα ηλεκτρόνια). Με την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αποκτούν κινητική ενέργεια και, καθώς κινούνται μέσα στο στερεό, συγκρούονται με τα θετικά ιόντα του κρυστάλλου. Η υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα των μετάλλων αποδίδεται στην κινητικότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων και διαφέρει από μέταλλο σε μέταλλο λόγω της διαφορετικής ηλεκτρονικής δομής τους.

Στους μονωτές και τους ημιαγωγούς τα ηλεκτρόνια σθένους συγκρατούνται ισχυρά στα άτομα με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Στους ημιαγωγούς όμως τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ασθενέστερα δεσμευμένα και μόλις πάρουν την απαιτούμενη λίγη ενέργεια, αμέσως εγκαταλείπουν τη θέση τους και γίνονται μέσα στον κρύσταλλο ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια σθένους παίρνουν την απαιτούμενη ενέργεια όταν ακτινοβολία πέφτει πάνω στον κρύσταλλο. Όταν ένα ηλεκτρόνιο σθένους εγκαταλείψει τη θέση του, τότε σε εκείνη τη θέση δημιουργείται μέσα στον κρύσταλλο μια αδειανή θέση ηλεκτρονίου που ονομάζεται οπή. Αποδεικνύεται ότι η έλλειψη ηλεκτρονίου σ' αυτή τη θέση, δηλαδή η οπή, ισοδυναμεί με ένα στοιχειώδες θετικό ηλεκτρικό φορτίο (+e). Η οπή μπορεί να συμπληρωθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικού ατόμου. Τότε όμως δημιουργείται οπή στο γειτονικό άτομο. Ωστε η οπή μπορεί να μετακινείται μέσα στον κρύσταλλο.

Όσο αφορά το δικό μας φωτοβολταϊκό στοιχείο συμβαίνουν τα εξής:

Ένα άτομο χαλκού έχει 29 ηλεκτρόνια καταναμημένα σε τέσσερις διαφορετικές στοιβάδες.

Ηλεκτρονική δομή του χαλκού K(2), L(8), M(18), N(1).

Ένα άτομο οξυγόνου έχει 8 ηλεκτρόνια καταναμημένα σε δύο διαφορετικές στοιβάδες.

Ηλεκτρονική δομή του οξυγόνου K(2), L(6).

Η ένωση Cu_2O (υποξείδιο του χαλκού) αποτελείται από δύο άτομα χαλκού και ένα άτομο οξυγόνου.

Στο κρυσταλλικό πλέγμα του υποξειδίου του χαλκού, το κάθε άτομο του χαλκού έχει ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στοιβάδα, ενώ το άτομο του οξυγόνου έχει έξι ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα.

Ο χαλκός είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ευκίνητα και σ' αυτήν την ευκινησία οφείλονται οι αγωγίμες ιδιότητες του υλικού.

Η ένωση υποξείδιο του χαλκού αποτελεί έναν ημιαγωγό στον οποίο τα ηλεκτρόνια σθένους συνδέονται σχετικά χαλαρά με τον πυρήνα χωρίς να έχουν την ευκινησία των ηλεκτρονίων του χαλκού.

Όταν στον ημιαγωγό (Cu_2O) πέσει κάποια αξιόλογη ποσότητα ηλιακής ενέργειας με μορφή ακτινοβολίας ή θερμότητας τότε σπάει ο ετεροπολικός δεσμός με τον πυρήνα και το μοναδικό ηλεκτρόνιο σθένους του κάθε ατόμου χαλκού που συνδεόταν σχετικά χαλαρά με τον πυρήνα, ελευθερώνεται με αποτέλεσμα να απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους, χάρη στην κινητική ενέργεια που απόκτησαν από την ακτινοβολία και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η θέση από την οποία έφυγε το ηλεκτρόνιο είναι περιοχή με ηλεκτρονικό έλλειμμα, παρουσιάζει θετικό φορτίο ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου και ονομάζεται οπή. Έτσι λοιπόν στο κρυσταλλικό πλέγμα του υποξειδίου του χαλκού δημιουργούνται οπές (+). Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται από το κρυσταλλικό πλέγμα του υποξειδίου του χαλκού οδεύουν προς το χαλκό με αποτέλεσμα να αποκτά αρνητικό φορτίο (-).

4.2 Ζώνες ενέργειας (Energy bands)

Σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg οι ακριβείς θέσεις των ηλεκτρονίων σε ένα υλικό δεν είναι γνωστές. Για την περιγραφή των ηλεκτρονικών ιδιοτήτων των υλικών η ακριβής γνώση της θέσεως των ηλεκτρονίων δεν είναι απαραίτητη.

Αυτό που έχει μεγάλη σπουδαιότητα είναι η γνώση των ενεργειακών επιπέδων που είναι διαθέσιμα για τα ηλεκτρόνια.

Για να εξηγήσουμε το μηχανισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υλικών είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε τις ζώνες ενέργειας που προκύπτουν από τη συνένωση πολλών ατόμων.

Από την εξέταση της δομής του ατόμου είναι γνωστό ότι στα άτομα τα ηλεκτρόνια συγκρατούνται από τον πυρήνα και κατέχουν ενεργειακά επίπεδα (ή τροχιακά) που ορίζονται πλήρως από τους κβαντικούς αριθμούς και την απαγορευτική αρχή του Pauli.

Τα ηλεκτρόνια των χαμηλότερων ενεργειακών επιπέδων συγκρατούνται ισχυρά από τον πυρήνα και ονομάζονται εσωτερικά ηλεκτρόνια (core electrons). Το εξωτερικό ηλεκτρόνιο ονομάζεται ηλεκτρόνιο σθένους (valence electron) συγκρατείται ασθενώς από τον πυρήνα και λαμβάνει μέρος στο σχηματισμό δεσμών με τα άλλα άτομα. Η ενεργειακή ζώνη χαμηλότερης ενέργειας που δημιουργείται στο στερεό ονομάζεται ζώνη σθένους, ενώ η ζώνη υψηλότερης ενέργειας ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόνια σθένους είναι ελεύθερα και κινούνται καταρχήν στη ζώνη σθένους και στη συνέχεια στη ζώνη αγωγιμότητας. Η ενέργεια που απαιτείται για την κίνηση αυτή είναι πολύ μικρή. Η απόσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του λιγότερου ενεργού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας, και του περισσότερο ενεργού από τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια, στην κορυφή της ζώνης σθένους, ονομάζεται ενεργειακό διάκενο ή ενεργειακό χάσμα.

Είναι φανερό ότι το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής. Δηλαδή, η ενέργεια αυτή είναι ισότιμη με την ισχύ των χημικών δεσμών μεταξύ των ατόμων του σώματος.

Συνήθως συμβολίζουμε την ενέργεια της κορυφής της ζώνης σθένους με E_v (από το αρχικό της λέξης valence που σημαίνει σθένος), την ενέργεια του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας με E_c (από τη λέξη conduction, που σημαίνει αγωγιμότητα), και το ενεργειακό διάκενο με E_g (από τη λέξη gap, που σημαίνει διάκενο ή χάσμα). Οι τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων σε κάθε σώμα είναι περιορισμένες μέσα στις ενεργειακές ζώνες. Δηλαδή, σε ένα απολύτως καθαρό σώμα, χωρίς καθόλου προσμίξεις και με τέλει κρυσταλλικό πλέγμα, δεν υπάρχουν ηλεκτρονικές στάθμες στο διάκενο ανάμεσα στις δύο ζώνες που αναφέραμε και έτσι η περιοχή μεταξύ E_v και E_c αποτελεί μια απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη για τα ηλεκτρόνια.

Αν στα ηλεκτρόνια των δεσμών προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας, π.χ. αν δεχθούν μια δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενεργειακό κβάντο $h\nu$ (εδώ h είναι η σταθερά δράσης του Planck και ν η συχνότητα της ακτινοβολίας), μικρότερο από το ενεργειακό διάκενο ($E_g > h\nu$), δεν μπορούν να την απορροφήσουν και μένουν στη ζώνη σθένους. Αν όμως τα ενεργειακά κβάντα που προσφέρονται είναι ίσα ή μεγαλύτερα από το ενεργειακό διάκενο του σώματος ($E_g \leq h\nu$), τότε κάθε κβάντο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να το διεγείρει προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μια οπή. Η περίσσεια της ενέργειας:

$$E_k = h\nu - E_g$$

μεταφέρεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια ως κινητική ενέργεια E_k και γίνεται αντιληπτή με την αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος.

4.3 Αγωγιμότητα και θεωρία των ζωνών ενέργειας

Τα υλικά με βάση τη θεωρία των ζωνών ενέργειας διακρίνονται σε μέταλλα ή αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές.

A) Αγωγοί.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μέταλλα. Εδώ η ζώνη σθένους επικαλύπτεται με τη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι δεν υπάρχει ενεργειακό χάσμα μεταξύ των δύο ζωνών και υπάρχουν περισσότερες δυνατές στάθμες από όσα είναι τα ηλεκτρόνια σθένους. Επομένως δε χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για τη δημιουργία αγωγιμότητας, γιατί ήδη στο απόλυτο μηδέν από την επικάλυψη των δύο ζωνών είναι σα να έχουμε μια μη πλήρη ζώνη που τις διαθέσιμες στάθμες της μπορούν να καταλάβουν ηλεκτρόνια με την επίδραση συνηθισμένων ηλεκτρικών πεδίων.

Η αύξηση της θερμοκρασίας δεν προκαλεί σημαντική αύξηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Αντίθετα, η αύξηση αυτή έχει συνήθως ως συνέπεια την αύξηση της αντιστάσεως του υλικού.

B) Ημιαγωγοί.

Στους ημιαγωγούς, η ζώνη σθένους στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός είναι πλήρης, ενώ η ζώνη αγωγιμότητας κενή. Το εύρος όμως της απαγορευμένης ζώνης E_g είναι μικρό, είναι της τάξεως του 1eV. Έτσι εύκολα σχετικά μπορούν να δημιουργηθούν συνθήκες αγωγιμότητας. Πράγματι τα υλικά αυτά, ενώ στη

θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός είναι μονωτές, στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος εμφανίζουν αγωγιμότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι ήδη στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος η θερμική ενέργεια που παίρνουν αρκετά ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους από το περιβάλλον, είναι αρκετή για να βρεθούν στη ζώνη αγωγιμότητας υπερπηδώντας το μικρό σχετικά ενεργειακό χάσμα E_g . Με παραπέρα αύξηση της θερμοκρασίας, θα έχουμε αύξηση των ηλεκτρονίων αυτών. Έτσι τα ηλεκτρόνια αυτά, όντας ελεύθερα, μπορούν να κινηθούν με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Παράλληλα όμως μπορούν να κινηθούν και ηλεκτρόνια μέσα στη ζώνη σθένους, αφού αυτή δε θα είναι πλήρης.

Γ) Μονωτές.

Χαρακτηρίζονται από μεγάλο σχετικά εύρος της απαγορευμένης ζώνης. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (κοντά στο απόλυτο μηδέν) η ζώνη σθένους είναι πλήρης και η ζώνη αγωγιμότητας κενή.

Για να γίνει αγώγιμο το υλικό, πρέπει να βρεθούν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Πρέπει όμως να τους δοθεί ενέργεια αρκετή, ώστε να πραγματοποιήσουν αυτό το άλμα. Για να δημιουργήσουμε συνθήκες αγωγιμότητας, εφαρμόζουμε ένα αρκετό ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο ή φέρουμε το υλικό σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Προσφορά ενέργειας που αντιστοιχεί σε συνηθισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, δεν αλλοιώνει τις μονωτικές ιδιότητες του υλικού, γιατί δεν είναι αρκετή για να κινηθούν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Ημιαγώγιμα υλικά

5.1 Εισαγωγή

Οι ημιαγωγοί είναι υλικά με μικρό ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας ($E_g < 2eV$). Η αγωγιμότητα τους κυμαίνεται από 10^{-6} έως $10^4 \Omega^{-1}m^{-1}$ και είναι μικρότερη της αγωγιμότητας των μετάλλων και μεγαλύτερη των μονωτών. Διακρίνονται στους ενδογενείς ημιαγωγούς (intrinsic semiconductors) και στους εξωγενείς ημιαγωγούς (extrinsic semiconductors).

5.2 Ενδογενείς ημιαγωγοί – Ενδογενής αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα που παρουσιάζουν οι καθαροί ημιαγωγοί λέγεται ενδογενής ή αυτοτελής αγωγιμότητα, και οι ημιαγωγοί αυτοί ενδογενείς ή αυτοτελείς ημιαγωγοί.

Στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός η ζώνη σθένους στους ενδογενείς ημιαγωγούς είναι πλήρης και η ζώνη αγωγιμότητας κενή. Οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται σα μονωτές. Όταν προσφερθεί αρκετή ενέργεια, ηλεκτρόνια των δεσμών μπορεί να απομακρυνθούν από τους πυρήνες των ατόμων που ανήκουν και να γίνουν ελεύθερα. Αυτό σημαίνει ότι ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους πηγαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Στο δεσμό από τον οποίο έφυγε το ηλεκτρόνιο έμεινε μια θέση κενή. Η θέση αυτή ονομάζεται οπή.

Η οπή μπορεί να χαρακτηριστεί ως αποτέλεσμα διαταραχής του ηλεκτρικού πεδίου όταν φύγει από το δεσμό ένα ηλεκτρόνιο. Στη θέση όμως που έχει συμβεί αυτή η διαταραχή, μπορεί να συγκρατηθεί, αν πλησιάσει ένα ηλεκτρόνιο, οπότε ο δεσμός αποκτά ξανά την κανονική του δομή. Αυτό σημαίνει ότι η οπή εξουδετερώνεται από το ηλεκτρόνιο. Το φαινόμενο αυτό, που παίζει σημαντικό ρόλο στις επιδόσεις ενός ημιαγωγού, λέγεται επανασύνδεση και συνοδεύεται με την έκλυση ενέργειας ίσης περίπου με το ενεργειακό χάσμα του σώματος.

Οι οπές αποτελούν ένα νέο στοιχείο στην αγωγιμότητα. Πραγματικά είναι δυνατό ένα ηλεκτρόνιο από γειτονικό προς την οπή δεσμό να μετακινηθεί και να εξουδετερώσει την οπή. Τότε όμως, ενώ η οπή αυτή θα εξαφανισθεί, στη θέση που έφυγε το ηλεκτρόνιο θα εμφανισθεί μια άλλη. Έτσι φαίνεται σαν να κινήθηκε η οπή προς αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που κινήθηκε το ηλεκτρόνιο. Φυσικά όταν δεν υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο οι κινήσεις αυτές είναι τυχαίες. Σύμφωνα με όσα είπαμε παραπάνω, όταν σπάει ένας δεσμός,

όταν δηλαδή απομακρυνθεί ένα ηλεκτρόνιο από αυτόν, δημιουργείται ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή.

Στους καθαρούς ημιαγωγούς λοιπόν ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των οπών. Έτσι όταν ο ημιαγωγός κρατιέται σε ενεργειακή ισορροπία, ο αριθμός οπών και ηλεκτρονίων είναι σταθερός. Αν προσφέρουμε εξωτερικά περισσότερη ενέργεια, τότε ο αριθμός αυτός θα αυξηθεί.

Η οπή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σωματίο με θετικό φορτίο, ίσο απόλυτα προς το φορτίο του ηλεκτρονίου και με φαινόμενη μάζα λίγο μικρότερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου. Έχουμε συνεπώς στους ημιαγωγούς δύο είδη φορέων: τις οπές και τα ηλεκτρόνια. Οι φορείς αυτοί κινούνται, κάτω από την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, αντίθετα και έτσι δημιουργείται το ρεύμα μέσα στους ημιαγωγούς.

Αν θεωρήσουμε τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων στη μονάδα του όγκου μέσα στον ημιαγωγό, ίσο με n και τον αριθμό των οπών στη μονάδα του όγκου ίσο με p , τότε αφού $n = p = n_i$ θα είναι:

$n \cdot p = n_i^2 =$ σταθερό για σταθερή θερμοκρασία. Είναι ο γνωστός από τη θερμοδυναμική νόμος των μαζών. Στην περίπτωση των ημιαγωγών:

$$n_i = A_0 \cdot T^{3/2} \cdot e^{-E_g/2KT}$$

όπου: A_0 σταθερά που εξαρτάται από τις ενεργές μάζες οπών και ηλεκτρονίων,
 T η απόλυτη θερμοκρασία,
 E_g το ενεργειακό χάσμα και
 K η σταθερά Boltzman.

Από τη σχέση αυτή φαίνεται η εξάρτηση του αριθμού των οπών και ηλεκτρονίων σ' έναν αυτοτελή ημιαγωγό από τη θερμοκρασία.

Αύξηση της θερμοκρασίας, προκαλεί διάσπαση περισσότερων δεσμών, με συνέπεια την αύξηση του αριθμού οπών και ηλεκτρονίων.

Φυσικά η διάσπαση δεσμών δε γίνεται μόνο με προσφορά θερμότητας. Η ενέργεια που χρειάζεται ένας δεσμός για να διασπασθεί, μπορεί να δοθεί από ένα ηλεκτρικό πεδίο ή με φωτόνια ή ακόμη και με τη βοήθεια σωματίων που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα.

5.3 Ημιαγωγοί με προσμίξεις

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν στερεά σώματα κυρίως ομοιοπολικής κατασκευής, των οποίων οι κρύσταλλοι περιέχουν κάποια πρόσμιξη σε πολύ μικρή αναλογία (π.χ. της τάξης

του 1 ατόμου πρόσμιξης προς 1.000.000 άτομα του κυρίως υλικού) η πρόσμιξη είναι συνήθως άτομα στοιχείου με μικρή αγωγιμότητα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν δύο ομάδες υλικών προσμίξεως: η μία είναι μια ομάδα πεντασθενών στοιχείων, όπως ο φώσφορος, το αρσενικό, το αντιμόνιο, το βισμούθιο, και η άλλη τα τρισθενή στοιχεία ίνδιο, γάλλιο, βόριο και αργίλιο. Διακρίνουμε δύο τύπους ημιαγωγών πρόσμιξης:

A. Ημιαγωγοί τύπου n

Σ' αυτούς η πρόσμιξη είναι άτομα στοιχείου μεγαλύτερου σθένους αυτών του κυρίως υλικού, το οποίο είναι συνήθως ένας ενδογενής ημιαγωγός.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι περισσότερα από τις οπές. Οι φορείς πλειονότητας δηλαδή είναι τα ηλεκτρόνια. Τα υλικά αυτά τα λέμε υλικά τύπου N.

Ωστε στα υλικά τύπου N, έχουμε φορείς, ηλεκτρόνια και οπές. Τα ηλεκτρόνια είναι πολύ περισσότερα από τις οπές. Έχουμε όμως και θετικά ιόντα. Το σύνολο πάντως σ' ένα τέτοιο υλικό είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, γιατί τα θετικά φορτία είναι απόλυτα ίσα με τα αρνητικά.

B. Ημιαγωγοί τύπου p

Σ' αυτούς η πρόσμιξη είναι άτομα στοιχείου μικρότερου σθένους.

Οι οπές είναι περισσότερες από τα ηλεκτρόνια. Έχουμε δηλαδή πλειονότητα φορέων από οπές και μειονότητα από ηλεκτρόνια. Τα υλικά αυτά λέγονται υλικά τύπου P.

Το σύνολο βέβαια είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, γιατί πάλι τα θετικά φορτία είναι απόλυτα ίσα με τα αρνητικά.

5.4 Φορείς πλειονότητας και φορείς μειονότητας

Χαρακτηριστική ιδιότητα των ενδογενών ημιαγωγών είναι η εξίσωση της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων (n) και της συγκέντρωσης των οπών (p). Στους ημιαγωγούς προσμίξεων όμως η συγκέντρωση του ενός είδους φορέων, που ονομάζονται φορείς πλειονότητας, είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από του άλλου είδους, δηλαδή των φορέων μειονότητας. Έτσι, στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η συμβολή των φορέων μειονότητας στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού θεωρείται αμελητέα.

5.5 Ειδική αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς – Ειδική αγωγιμότητα ενδογενών ημιαγωγών

Οι φορείς σ' έναν αυτοτελή ημιαγωγό είναι οπές και ηλεκτρόνια που βρίσκονται μάλιστα σε ίσο αριθμό. Από την πλευρά της αγωγιμότητας, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στους αυτοτελείς ημιαγωγούς δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη συμπεριφορά από αυτή που παρουσιάζουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα στους αγωγούς. Το καινούργιο στοιχείο στους ημιαγωγούς είναι η οπή. Όπως είδαμε, η οπή θεωρείται ως ένα σωματίο με θετικό φορτίο ίσο σε απόλυτη τιμή με το φορτίο του ηλεκτρονίου και με ενεργό μάζα μικρότερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

Η ευκινησία των οπών μ_p είναι μικρότερη από την ευκινησία των ηλεκτρονίων μ_n . Αυτό καταρχήν μπορεί να αποδοθεί στο ότι οι οπές κινούνται ανάμεσα σε καθορισμένες θέσεις, που είναι θέσεις ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Βέβαια η ευκινησία των φορέων γενικά εξαρτάται από το είδος του υλικού μέσα στο οποίο κινούνται και από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το υλικό αυτό.

Στην ταυτόχρονη κίνηση οπών και ηλεκτρονίων με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, οφείλεται το ηλεκτρικό ρεύμα στους ημιαγωγούς.

5.6 Ευκινησία φορέων, χρόνος ζωής, μήκος διαχύσεως

Ευκινησία.

Η ευκινησία ενός φορέα μπορεί να ορισθεί ως το πηλίκο του μέτρου της μέσης ταχύτητας που αποκτά υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου εντάσεως E , δια του μέτρου της εντάσεως αυτής. Θα είναι δηλαδή:

$$\mu = u / E$$

Αυτή μετριέται σε μονάδες $m^2 / (Volt * sec)$

Την ευκινησία των ηλεκτρονίων τη συμβολίζουμε με μ_n και των οπών με μ_p . Γενικά είναι $\mu_p < \mu_n$.

Η ευκινησία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Χρόνος ζωής.

Είδαμε στα προηγούμενα ότι στους ημιαγωγούς έχουμε συνεχώς δημιουργία φορέων αλλά και επανασύνδεση οπών και ηλεκτρονίων, έτσι που το υλικό να βρίσκεται σε ηλεκτρική

ισορροπία. Ο μέσος χρόνος που μεσολαβεί από τη δημιουργία των ελευθέρων ηλεκτρονίων μέχρι την επανασύνδεση τους λέγεται χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων. Ανάλογα ορίζεται και ο χρόνος ζωής των οπών. Ο χρόνος ζωής των φορέων παίζει σημαντικό ρόλο σε πολλές εφαρμογές των ημιαγωγών.

Ο μέσος χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων και των οπών στους καθαρούς ημιαγωγούς είναι ο ίδιος.

Στους ημιαγωγούς με προσμίξεις, ο μέσος χρόνος ζωής των φορέων πλειονότητας είναι πολύ μεγαλύτερος από το μέσο χρόνο ζωής των φορέων μειονότητας.

Διάχυση – Μήκος διαχύσεως.

Ας υποθέσουμε ότι σ' ένα μέρος κομματιού από ημιαγωγό παρουσιάζεται μεγαλύτερη πυκνότητα φορέων απ' ότι στο υπόλοιπο. Έστω πως οι φορείς αυτοί είναι ηλεκτρόνια. Τότε θα παρατηρηθεί, χωρίς καμία εξωτερική επίδραση, κίνηση των ηλεκτρονίων έτσι, ώστε να δημιουργηθεί τελικά εξίσωση της πυκνότητας τους σε όλη τη μάζα του ημιαγωγού. Την κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων (ή των οπών) τη λέμε διάχυση. Η κίνηση δημιουργεί ένα ρεύμα που ονομάζεται ρεύμα διαχύσεως.

Η πυκνότητα του ρεύματος διαχύσεως προς μια διεύθυνση εξαρτάται από τη μεταβολή της πυκνότητας των φορέων ανά μονάδα μήκους, από το φορτίο των φορέων και από ένα συντελεστή που ονομάζεται σταθερά διαχύσεως και εξαρτάται από τη φύση του υλικού και τη θερμοκρασία του.

Έτσι θα έχουμε για την πυκνότητα ρεύματος διαχύσεως ηλεκτρονίων:

$$J_{\delta n} = e * D_n * (\Delta_n / \Delta_\chi)$$

Και πυκνότητα ρεύματος οπών:

$$J_{\delta p} = - e * D_p * (\Delta_p / \Delta_\chi)$$

Όπου D_n , D_p οι σταθερές διαχύσεως για ηλεκτρόνια και οπές αντίστοιχα και (Δ_n / Δ_χ) , (Δ_p / Δ_χ) οι μεταβολές της πυκνότητας ηλεκτρονίων και οπών ανά μονάδα μήκους κατά μια διεύθυνση.

Το ρεύμα διαχύσεως είναι ένα μεταβατικό ρεύμα που διαρκεί όσο διαρκεί η κίνηση των φορέων για εξίσωση της πυκνότητας.

Η μέση απόσταση που διανύουν οι φορείς λόγω διαχύσεως κατά το χρόνο ζωής τους ονομάζεται μήκος διαχύσεως.

Για τα ηλεκτρόνια το μήκος διαχύσεως είναι:

$$L_n^2 = D_n * \tau_n$$

Ενώ για τις οπές:

$$L_p^2 = D_p \cdot \tau_p$$

Όπου : D_n , D_p οι σταθερές διαχύσεως ηλεκτρονίων και οπών και τ_n

, τ_p οι χρόνοι ζωής ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Διέγερση και ιονισμός του ατόμου – Ηλεκτρονική θεωρία των μετάλλων

6.1 Διέγερση και ιονισμός του ατόμου

A) Διέγερση.

Όταν όλα τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου βρίσκονται στις επιτρεπόμενες τροχιές που η ενέργεια τους είναι η ελάχιστη, δεν μπορούν να πέσουν σε χαμηλότερες στάθμες ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση και τα ηλεκτρόνια κινούνται στις θεμελιώδεις τροχιές.

Αν ένα άτομο που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση πάρει ενέργεια απ' έξω (από σύγκρουση π.χ. με κινούμενο σωματίο ή με απορρόφηση ακτινοβολίας), είναι δυνατό ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια του να μεταπηδήσουν από τη θεμελιώδη τροχιά σε τροχιά με μεγαλύτερη ολική ενέργεια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διέγερση του ατόμου. Το ηλεκτρόνιο που μεταπήδησε στην τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας, μένει σ' αυτή πολύ μικρό χρονικό διάστημα (10^{-8} ως 10^{-9} sec) και κατόπιν επανέρχεται ή μ' ένα άλμα ή με διαδοχικά άλματα από τροχιά σε τροχιά στη θεμελιώδη τροχιά.

Η ενέργεια που παίρνει το ηλεκτρόνιο για να μεταπηδήσει από τη θεμελιώδη τροχιά με ολική ενέργεια $E_{αρχ}$ σε τροχιά με μεγαλύτερη ολική ενέργεια $E_{τελ}$, λέγεται ενέργεια διεγέρσεως και είναι ίση με $E_{τελ} - E_{αρχ}$.

Η ενέργεια αυτή αποδίδεται κατά την αποδιέγερση, την επάνοδο δηλαδή του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη τροχιά, με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και μάλιστα κατά στοιχειώδη ποσά, που ονομάζονται φωτόνια. Κάθε φωτόνιο έχει ενέργεια E που είναι:

$$E = h * \nu$$

Όπου: h είναι η σταθερά δράσεως του Planck ($h = 6,626 * 10^{-34}$ Joule * sec) και

ν η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Έτσι κατά την αποδιέγερση θα έχουμε εκπομπή φωτονίων που η ενέργεια του καθενός θα είναι:

$$E_{τελ} - E_{αρχ} = h * \nu$$

Εφόσον βέβαια το ηλεκτρόνιο μεταπέσει απευθείας από την τελική τροχιά στην αρχική.

B) Ιονισμός

Αν η ενέργεια που δίνεται σε ηλεκτρόνιο ενός ατόμου ή μορίου στο οποίο ανήκει το άτομο, είναι σχετικά μεγάλη, είναι δυνατό το ηλεκτρόνιο να απομακρυνθεί τόσο από τον πυρήνα,

ώστε να φύγει τελείως από την έλξη του, δηλαδή το ηλεκτρόνιο φεύγει από το άτομο στο οποίο ανήκε. Το φαινόμενο λέγεται ιονισμός και το άτομο (ή μόριο) από το οποίο έφυγε το ηλεκτρόνιο ιόν. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τον ιονισμό ενός ατόμου λέγεται ενέργεια ή έργο ιονισμού. Το άτομο που έχασε το ηλεκτρόνιο έμεινε θετικά φορτισμένο. Είναι δηλαδή τώρα ένα θετικό ιόν.

Η ενέργεια ιονισμού μπορεί να προέρχεται:

A) Από σύγκρουση με μόρια ή άτομα που κινούνται ταχέως ή και με φορτισμένα σωμάτια (ηλεκτρόνια, σωμάτια α κλπ.). Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι έχουμε ιονισμό κρούσεως.

B) Από απορρόφηση φωτονίων (υπεριώδους ακτινοβολίας, ακτινοβολίας Rontgen, ακτινοβολίας γ κλπ.)

Είναι δυνατόν καμιά φορά, το άτομο (ή μόριο) αντί να δώσει ηλεκτρόνιο, να προσλάβει ηλεκτρόνιο. Τότε σχηματίζεται αρνητικό ιόν.

6.2 Ηλεκτρονική θεωρία των μετάλλων

Τα άτομα στα μέταλλα, όταν αυτά βρίσκονται στη στερεή κατάσταση, ανήκουν σε κρυσταλλικό πλέγμα με κανονική ομοιόμορφη δομή.

Η ελκτική δύναμη του πυρήνα για τα εξώτατα ηλεκτρόνια των ατόμων στο εσωτερικό των μετάλλων, είναι μικρότερη από αυτή που θα ήταν αν κάθε άτομο ήταν μόνο του χωρίς την επίδραση των διπλανών του. Για το λόγο αυτό πολλά από τα εξώτατα ηλεκτρόνια έχουν αποσπασθεί από το άτομο που ανήκουν αρχικά και κινούνται ελεύθερα, μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Τα ηλεκτρόνια αυτά τα λέμε ελεύθερα ηλεκτρόνια. Έτσι στο εσωτερικό του μετάλλου υπάρχουν τα ιόντα, από τα άτομα που έχασαν ηλεκτρόνια και που έχουν ορισμένες θέσεις μέσα στο μέταλλο, και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται ανάμεσα στα ιόντα αυτά σχεδόν ανεμπόδιστα. Το σύνολο πάντως είναι ηλεκτρικά ουδέτερο.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ακόμη και στο απόλυτο μηδέν βρίσκονται σε κίνηση. Οι ταχύτητες τους στο απόλυτο μηδέν μπορεί να έχουν τιμές από 0 μέχρι μια μέγιστη u_F που λέγεται ταχύτητα Fermi. Κατά συνέπεια στο απόλυτο μηδέν οι τιμές της κινητικής ενέργειας των ελευθέρων ηλεκτρονίων θα είναι μεταξύ 0 και μιας μέγιστης E_F που ονομάζεται ενέργεια Fermi.

Αν θερμάνουμε το μέταλλο, μερικά ηλεκτρόνια θα αποκτήσουν ενέργειες μεγαλύτερες από την ενέργεια Fermi.

Η ενέργεια Fermi διαφέρει από μέταλλο σε μέταλλο και εξαρτάται από το πλήθος των ελευθέρων ηλεκτρονίων στη μονάδα του όγκου.

Πολλά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των μετάλλων, όπως π.χ. η μεγάλη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μεταλλική λάμψη, η ανακλαστικότητα του φωτός κ.α. οφείλονται στην ύπαρξη των ελευθέρων ηλεκτρονίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Εκπομπή ηλεκτρονίων

7.1 Γενικά

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα στα μέταλλα θεωρούμε, κατά μεγάλη προσέγγιση, ότι κινούνται σ' έναν ισοδυναμικό χώρο. Μπορούμε δηλαδή να θεωρήσουμε ότι η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο ελεύθερο ηλεκτρόνιο από το περιβάλλον του, στο εσωτερικό του μετάλλου, είναι μηδέν. Όταν όμως το ελεύθερο ηλεκτρόνιο βρεθεί κοντά στην επιφάνεια του μετάλλου, τότε υπάρχει μια δύναμη που το έλκει προς το εσωτερικό του και το εμποδίζει να βγει από το μέταλλο. Αν το ηλεκτρόνιο βγει έξω από το μέταλλο, τότε το μέταλλο μένει θετικά φορτισμένο.

Απέναντι από το ηλεκτρόνιο μέσα στο μέταλλο, εμφανίζεται ένα θετικό φορτίο εξ επαγωγής, απόλυτα ίσο προς το φορτίο του ηλεκτρονίου. Το φορτίο αυτό λέγεται φορτίο είδωλο. Ανάμεσα στο ηλεκτρόνιο και στο φορτίο είδωλο δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που τείνει να επαναφέρει το ηλεκτρόνιο στο εσωτερικό του μετάλλου. Δημιουργείται έτσι ένας φραγμός δυναμικού για τα ηλεκτρόνια που θέλουν να εγκαταλείψουν το μέταλλο. Όσα ηλεκτρόνια αποκτήσουν αρκετή ενέργεια για να υπερπηδήσουν αυτό το φραγμό, εγκαταλείπουν τελείως το μέταλλο.

7.2 Έργο εξόδου

Χαρακτηριστικό μέγεθος ενός υλικού είναι το έργο εξόδου του. Το έργο εξόδου (E_w) είναι το ελάχιστο ποσό ενέργειας που χρειάζεται για να αποσπασθεί ένα ηλεκτρόνιο που έχει τη μέγιστη κινητική ενέργεια E_F στο απόλυτο μηδέν. Το έργο αυτό είναι ίσο με τη διαφορά της ενέργειας Fermi (E_F) από τη μέγιστη ενέργεια (E_B) που απαιτείται για την υπερνίκηση του φραγμού δυναμικού. Έτσι έχουμε:

$$E_w = E_B - E_F$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το έργο εξόδου ενός μετάλλου τόσο δυσκολότερα βγαίνουν ηλεκτρόνια από αυτό.

Για να αποσπασθούν ηλεκτρόνια από τα μέταλλα πρέπει να τους δοθεί το κατάλληλο ποσό ενέργειας (λίγα eV).

Η ενέργεια αυτή δίνεται:

- Με τη μορφή θερμότητας (αύξηση της θερμοκρασίας του μετάλλου). Στην περίπτωση αυτή έχουμε τη θερμιονική εκπομπή.

- Με πρόσπτωση φωτονίων. Είναι η περίπτωση της φωτοηλεκτρικής εκπομπής.
- Με βομβαρδισμό της επιφάνειας του μετάλλου με πολύ γρήγορα ηλεκτρόνια (ή ιόντα), οπότε έχουμε τη δευτερογενή εκπομπή.

Μπορεί επίσης να εμφανισθεί εκπομπή ηλεκτρονίων όταν στην επιφάνεια του μετάλλου επιδράσει ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο κατάλληλης πολικότητας. Αυτή είναι η εκπομπή με ισχυρό πεδίο.

Εμείς θα εξετάσουμε την φωτοηλεκτρική εκπομπή.

7.3 Φωτοηλεκτρική εκπομπή

Η εκπομπή ηλεκτρονίων από μια επιφάνεια, όταν σ' αυτήν προσπέσει φως ή άλλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος, ονομάζεται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται ονομάζονται φωτοηλεκτρόνια. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται εύκολα αν λάβουμε υπόψη μας ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από ποσά ενέργειας $h\nu$, τα φωτόνια, όπου το ν είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας. Η συχνότητα αυτή συνδέεται με το μήκος κύματος με τη σχέση:

$$v = c / \lambda$$

Όπου : c η ταχύτητα του φωτός και λ το μήκος κύματος.

Έτσι ως ενέργεια για την απόσπαση ηλεκτρονίων χρησιμοποιούμε την ενέργεια των φωτονίων. Ηλεκτρόνια είναι δυνατόν, απορροφώντας την ενέργεια των φωτονίων, να αποκτήσουν τόση δική τους ενέργεια ώστε να μπορούν να εγκαταλείψουν την επιφάνεια του υλικού στο οποίο ανήκουν. Αν η ενέργεια του φωτονίου είναι αρκετά μεγάλη, το ηλεκτρόνιο όταν βγει από το μέταλλο θα έχει κινητική ενέργεια που δίνεται από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein:

$$1/2 * m * u^2 = h * \nu - E_w$$

όπου: $1/2 * m * u^2$ η κινητική ενέργεια του φωτοηλεκτρονίου και E_w το έργο εξόδου.

Η φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein μας δίνει τη μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να έχει ένα φωτοηλεκτρόνιο όταν στην επιφάνεια προσπίπτουν φωτόνια συχνότητας ν .

Για την ίδια συχνότητα ν μπορεί να έχουμε και φωτοηλεκτρόνια με μικρότερη ενέργεια. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ηλεκτρόνια αυτά ή είχαν ενέργειες μικρότερες από την ενέργεια Fermi ή έχασαν ενέργεια από σύγκρουση με ηλεκτρόνια ή ιόντα στο εσωτερικό του μετάλλου.

Αν σε μια επιφάνεια προσπίπτει μονοχρωματική ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολία με φωτόνια της ίδιας συχνότητας, τότε:

- 1) Ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται είναι ανάλογος του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια αυτή, δηλαδή ανάλογος της φωτεινής ροής.
- 2) Η ταχύτητα με την οποία βγαίνουν τα ηλεκτρόνια εξαρτάται από το μήκος κύματος (ή τη συχνότητα) της ακτινοβολίας που προσπίπτει.
- 3) Για να αποσπασθεί ένα ηλεκτρόνιο από το υλικό, πρέπει η ενέργεια του φωτονίου να είναι μεγαλύτερη ή τουλάχιστο ίση με το έργο εξόδου E_w .

Δηλαδή :

$$h \cdot \nu \geq E_w \text{ οπότε } \nu \geq E_w / h \text{ ή } \lambda \leq h \cdot C / E_w$$

Η ισότητα $h\nu_{op} = E_w$ καθορίζει μια οριακή συχνότητα:

$$\nu_{op} = E_w / h$$

κάτω από την οποία δεν είναι δυνατή η εξαγωγή ηλεκτρονίων. Στη συχνότητα αυτή αντιστοιχεί ένα οριακό μήκος κύματος:

$$\lambda_{op} = c / \nu_{op}$$

$$\text{οπότε } \lambda_{op} = (c \cdot h) / E_w$$

Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από λ_{op} δεν θα έχουμε εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Η ένωση P – N

8.1 Επαφή P – N

Είναι δυνατό κομμάτι καθαρού ημιαγωγού, με κατάλληλη επεξεργασία ενός μέρους του, να γίνει π.χ. τύπου P και στη συνέχεια το υπόλοιπο τύπου N. Το σύνολο αυτό αποτελεί μια επαφή P – N.

Η επαφή P – N παρουσιάζει ιδιότητες που έχουν πολύ μεγάλη σημασία στην τεχνολογία των ημιαγωγών.

Παρόλο που στην πραγματικότητα το πέρασμα από το τμήμα P στο τμήμα N (ή και το αντίστροφο φυσικά) σε μια επαφή P – N, γίνεται προοδευτικά, για να μελετήσουμε πιο εύκολα τα φαινόμενα που παρουσιάζονται σε μια επαφή P – N, θα θεωρήσουμε πως το τμήμα του ημιαγωγού του ενός τύπου διαδέχεται απότομα το τμήμα του άλλου τύπου, θα θεωρήσουμε δηλαδή πως τα δύο τμήματα χωρίζονται μεταξύ τους από μια νοητή επίπεδη επιφάνεια.

Έχουμε λοιπόν καταρχήν ένα τμήμα, με πλειονότητα φορέων οπές, σε επαφή με άλλο τμήμα που έχει πλειονότητα φορέων ηλεκτρόνια. Επόμενο είναι να σημειωθεί το φαινόμενο της διαχύσεως. Οπές δηλαδή από το τμήμα P θα κινηθούν προς το τμήμα N και ηλεκτρόνια από το τμήμα N θα κινηθούν προς το P. Όταν όμως οι οπές βρεθούν στο τμήμα N, που έχει πλήθος ηλεκτρονίων, επανασυνδέονται με ηλεκτρόνια γειτονικά στη διαχωριστική επιφάνεια. Το ίδιο συμβαίνει και με τα ηλεκτρόνια που θα βρεθούν στο τμήμα P.

Η επανασύνδεση αυτή δημιουργεί γύρω από τη διαχωριστική επιφάνεια μια περιοχή στην οποία υπάρχουν σχεδόν μόνο ακίνητα ιόντα (θετικά στο τμήμα N και αρνητικά στο τμήμα P). Μια περιοχή δηλαδή απογυμνωμένη από φορείς. Την περιοχή αυτή ονομάζουμε περιοχή απογυμνώσεως.

Το εύρος της περιοχής αυτής σε κάθε τμήμα (P ή N) της επαφής είναι αντιστρόφως ανάλογο της πυκνότητας των προσμίξεων.

Παρακάτω θα θεωρήσουμε ότι η πυκνότητα των προσμίξεων είναι η ίδια σε κάθε τμήμα της επαφής. Για συνήθεις πυκνότητες προσμίξεων το εύρος αυτό είναι περίπου 10^{-6} m.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην περιοχή απογυμνώσεως υπάρχουν σχεδόν μόνο ακίνητα ιόντα, θετικά από τη μια πλευρά και αρνητικά από την άλλη. Έτσι στην περιοχή αυτή εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο και μάλιστα με φορά τέτοια που να παρεμποδίζεται η

παραπέρα κίνηση φορέων λόγω διαχύσεως, από το ένα τμήμα στο άλλο. Εμποδίζεται δηλαδή η κίνηση οπών, λόγω διαχύσεως, από το P στο N και ηλεκτρονίων από το N στο P. Το πεδίο αυτό οφείλεται σε μια διαφορά δυναμικού V_0 που αναπτύχθηκε ανάμεσα στα υλικά P και N της επαφής και που η πολικότητα του είναι τέτοια, ώστε να αντιτίθεται στην κίνηση των φορέων λόγω διαχύσεως. Το δυναμικό V_0 ονομάζεται δυναμικό φραγμού. Η τιμή του είναι μερικά δέκατα του βολτ.

Η κίνηση των οπών προς το υλικό N και των ηλεκτρονίων προς το υλικό P, λόγω διαχύσεως, δημιουργεί ένα ρεύμα, το ρεύμα διαχύσεως, που θα το συμβολίζουμε I_F .

Μέσα όμως στην περιοχή απογυμνώσεως είναι δυνατό να βρεθούν και φορείς (οπές και ηλεκτρόνια) που να μην προέρχονται από διάχυση. Οι φορείς αυτοί προέρχονται, κυρίως, από θερμική διάσπαση δεσμών των ατόμων του καθαρού υλικού. Το πλήθος των φορέων αυτών εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Βέβαια ο αριθμός αυτών των φορέων μπορεί να αυξηθεί και με παροχή φωτεινής, ηλεκτρικής ή και άλλης μορφής ενέργειας.

Οι φορείς αυτοί μέσα στην περιοχή απογυμνώσεως κινούνται με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής. Η κίνηση θα είναι, για τις οπές, από την πλευρά των θετικών ιόντων (τμήμα τύπου N) προς την πλευρά των αρνητικών ιόντων (τμήμα τύπου P). Τα ηλεκτρόνια θα κινούνται αντίθετα.

Έχουμε δηλαδή μια κίνηση οπών και ηλεκτρονίων ανάστροφη από την κίνηση τους λόγω διαχύσεως. Δημιουργείται έτσι ένα άλλο ρεύμα, που θα το ονομάζουμε ανάστροφο ρεύμα, αντίθετο προς το ρεύμα λόγω διαχύσεως. Το ρεύμα αυτό θα το συμβολίζουμε I_0 .

Στην περίπτωση θερμικής σταθερότητας τα ρεύματα I_F και I_0 είναι ίσα κατά μέτρο αλλά αντίθετης φοράς, με συνέπεια το τελικό ρεύμα της επαφής να είναι μηδέν. Αν μετρήσουμε διαφορά δυναμικού στα άκρα των τμημάτων P και N της επαφής P – N, το όργανο θα δείχνει μηδέν, ως συνέπεια του νόμου του Volta.

Τα παραπάνω ισχύουν για μια ανοικτή επαφή P – N. Μια επαφή δηλαδή που στα άκρα της δεν εφαρμόζεται τάση.

8.2 Επαφή P – N με εξωτερική τάση

Μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσεως μπορεί να συνδεθεί στα άκρα μιας επαφής P – N με δύο τρόπους: Με την ορθή φορά και με την ανάστροφη.

Πόλωση κατά την ορθή φορά

Σ' αυτήν την περίπτωση συνδέουμε τον αρνητικό πόλο της πηγής με το τμήμα τύπου N και το θετικό πόλο της πηγής με το τμήμα τύπου P. Με τη σύνδεση αυτή ωθούνται οι οπές από το τμήμα P προς το τμήμα N και τα ηλεκτρόνια από το τμήμα N προς το τμήμα P.

Πόλωση κατά την ανάστροφη φορά

Σ' αυτήν την περίπτωση συνδέουμε τον αρνητικό πόλο της πηγής με το τμήμα τύπου P και το θετικό πόλο της πηγής με το τμήμα τύπου N. Στην περίπτωση αυτή οι οπές έλκονται από τον αρνητικό πόλο και τα ηλεκτρόνια από το θετικό, με αποτέλεσμα να διευρυνθεί η περιοχή απογυμνώσεως.

8.3 Το ανάστροφο ρεύμα κόρου

Όταν αυξάνουμε την ανάστροφη τάση, έχοντας σταθερή θερμοκρασία, το ανάστροφο ρεύμα αρχικά αυξάνει αλλά γρήγορα παίρνει μια σταθερή τιμή που τη διατηρεί μέσα σε ορισμένα όρια ανάστροφης τάσεως. Εξαιτίας αυτής της σταθερότητας που παρουσιάζει το ανάστροφο ρεύμα I_0 ονομάζεται και ρεύμα κόρου. Βεβαίως το ανάστροφο ρεύμα μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και επίσης μέσα σε καθορισμένα όρια τάσεων και θερμοκρασιών είναι γενικά ένα πολύ μικρό ρεύμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή

9.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα φωτοβολταϊκά ή ηλιακά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλιακό φως.

Ένα ηλιακό στοιχείο είναι βασικά μια επαφή p-n που εκτίθεται στο ηλιακό φως. Τα φωτόνια που απορροφούνται διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και δημιουργούν ελεύθερους φορείς (οπές και ηλεκτρόνια) στην περιοχή της επαφής. Η βασική διεργασία που λαμβάνει χώρα για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι ότι οι ελεύθεροι φορείς μετακινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται στην περιοχή της επαφής. Τα ηλεκτρόνια κινούνται προς την πλευρά n και οι οπές προς την πλευρά p.

Αν η επαφή δεν συνδέεται με εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα το ρεύμα που παράγεται από τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών αναπτύσσει μια διαφορά δυναμικού στα άκρα της επαφής η οποία προκαλεί τη δημιουργία αντίθετου ρεύματος με αποτέλεσμα η συνολική ροή ρεύματος να μηδενίζεται. Όταν η επαφή συνδέεται με εξωτερικό κύκλωμα μέρος του ρεύματος διαρρέει το κύκλωμα οπότε η επαφή p-n λειτουργεί ως στοιχείο μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

9.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται μέσω τριών γνωστών διαδικασιών που είναι η θερμοιονική γεννήτρια, τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Και για τις τρεις διαδικασίες το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, θεωρώντας δεδομένη τη φασματική της κατανομή.

Τα ηλιακά στοιχεία είναι μια εφαρμογή των ιδιοτήτων που έχουν οι ημιαγωγοί. Στην πράξη 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. Όταν πάνω στον ημιαγωγό πέφτει φως, τότε μέσα στον ημιαγωγό

δημιουργείται μια περίσσεια από ζεύγη ηλεκτρικών φορέων, δηλαδή ηλεκτρόνια και οπές, πέρα απ' τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου.

Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου και η διάταξη να διαρρέεται από ρεύμα. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που η ένταση του είναι ανάλογη με τη φωτεινή ροή που πέφτει πάνω στο ηλιακό στοιχείο και 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. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο επομένως λειτουργεί ως γεννήτρια, στην οποία η ενέργεια των φωτονίων μετατρέπεται αμέσως σε ηλεκτρική ενέργεια. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p 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 ειδών. Π.χ. από διόδους ετεροενώσεων p-n διαφορετικών ημιαγωγών ή από διόδους Σότκυ που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο. Στο πείραμα μας είναι η δεύτερη περίπτωση, δηλαδή δίοδος Σότκυ.

9.3 Η απορρόφηση της ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά στοιχεία

Όλη η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία στην επιφάνεια τους δεν είναι δυνατόν να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Ορισμένα μόνο φωτόνια συγκεκριμένου μήκους κύματος (ή συχνότητας) μπορούν να ενεργοποιήσουν τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού. Παράλληλα ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του υλικού, ενώ φωτόνια μεγάλης κινητικής ενέργειας διασχίζουν τον ημιαγωγό. Τέλος, φωτόνια με μικρή κινητική ενέργεια δεν είναι ικανά να συμμετάσχουν στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Σύμφωνα δε με την ισχύουσα θεωρία κυματικής μηχανικής κάθε

φωτόνιο μπορεί να ενεργοποιήσει και να ελευθερώσει μόνο ένα ηλεκτρόνιο. Η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια ενός φωτονίου για την ενεργοποίηση και απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου του ημιαγωγού ονομάζεται ενεργειακό κατώφλι του ημιαγωγού. Φωτόνια που διαθέτουν πολύ μεγάλη ενέργεια μεταφέρουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας στα απελευθερωμένα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα η κινητική αυτή ενέργεια τελικά να μετασχηματίζεται σε θερμότητα, που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Ανάλογος μετασχηματισμός συνοδεύει και την πρόσπτωση φωτονίων χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου. Όπως θα αναλυθεί όμως παρακάτω, η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιδρά αρνητικά στην απόδοση τους.

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

$$E = h \cdot \nu = h \cdot (c / \lambda)$$

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

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

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

$$\Phi = H / (h \cdot \nu) = (H \cdot \lambda) / (h \cdot c)$$

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 χ την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στον ημιαγωγό, αρχίζοντας από την επιφάνεια του, και με $\Phi(\chi)$ την τιμή της ροής των φωτονίων (δηλαδή το πλήθος των φωτονίων που δεν έχουν ακόμα απορροφηθεί) στο βάθος αυτό. Η ευκολία με την οποία πραγματοποιείται η απορρόφηση των φωτονίων, που είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα για τη χρησιμοποίηση του ημιαγωγού ως υλικού κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα δίνεται από τον 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 Μπερ (Beer).

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 επιφάνεια του και εξασθενίζει εκθετικά με την απόσταση από αυτή.

9.4 Φωτονική ροή

Η φωτονική ροή (photon flux) είναι μια χρήσιμη ποσότητα στους υπολογισμούς των φωτοβολταϊκών στοιχείων και ορίζεται ως ο αριθμός των φωτονίων που περνάνε (κάθετα) από τη μονάδα της επιφάνειας σ' ένα δευτερόλεπτο.

9.5 Φωτοαγωγιμότητα

Η φωτοαγωγιμότητα ορίζεται, γενικά, ως η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ημιαγωγού, όταν ακτινοβολία κατάλληλης συχνότητας πέφτει πάνω στο υλικό αυτό. Η φωτοαγωγιμότητα είναι σημαντική, όταν η ενέργεια των φωτονίων της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού.

Αν η προσπίπτουσα ακτινοβολία παράγει g ζεύγη ηλεκτρονίου – οπής / ($m^3 \cdot s$), μέσα σ' έναν ημιαγωγό, τότε η αύξηση της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων και οπών δίδεται από τις σχέσεις:

$$\Delta n = g \cdot \tau_e$$

$$\Delta p = g \cdot \tau_h$$

Όπου τ_e και τ_h είναι ο ενεργός χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων και οπών, αντίστοιχα.

Η μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ημιαγωγού θα είναι:

$$\Delta\sigma = e * (\mu_e * \Delta n + \mu_h * \Delta p) = e * g * (\mu_e * \tau_e + \mu_h * \tau_h)$$

Για να είναι εύκολο να μετρηθεί η $\Delta\sigma$ με ακρίβεια, πρέπει να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του ημιαγωγού χωρίς την πρόσπτωση της ακτινοβολίας (στο σκοτάδι). Έτσι λοιπόν, υλικά που είναι αρκετά καλοί μονωτές (δηλαδή υλικά που έχουν μικρές σχετικά ειδικές ηλεκτρικές αγωγιμότητες στο σκοτάδι) δίνουν εν γένει καλούς φωτοαγωγούς.

9.6 Φωτόρευμα

Το φωτόρευμα (photocurrent) I_L που παράγεται όταν φωτίζουμε έναν ημιαγωγό δίδεται από τη σχέση:

$$I_L = e * g * t / T_T$$

Όπου g είναι ο ολικός αριθμός ηλεκτρονίων ή οπών που παράγονται σε κάθε δευτερόλεπτο από τα απορροφούμενα φωτόνια, T_T είναι ο χρόνος διέλευσης (transit time), δηλαδή ο χρόνος που ξοδεύει ένα ηλεκτρόνιο για να κινηθεί από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο.

Ο χρόνος T_T μπορεί να γραφτεί με τη μορφή:

$$T_T = L / \langle u_d \rangle = L / (\mu_e * E)$$

Όπου L είναι η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, $\langle u_d \rangle$ είναι η μέση κατευθυνόμενη ταχύτητα των ηλεκτρονίων, μ_e είναι η κατευθυνόμενη ευκινησία (drift mobility) των ηλεκτρονίων και E είναι η ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση τη σχέση:

$$E = V / L$$

Όπου V είναι η εφαρμοζόμενη τάση στα δύο ηλεκτρόδια του ημιαγωγού που απέχουν απόσταση L , παίρνουμε την εξίσωση:

$$T_T = L^2 / (\mu_e * V)$$

Αν θεωρήσουμε ότι ο ενεργός χρόνος ζωής τ_e των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερος από το χρόνο ζωής τ_h των οπών, τότε οι οπές παγιδεύονται γρήγορα από τα κέντρα παγίδευσης (trapping centers), ενώ τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ζουν αρκετό χρόνο ώστε να σαρωθούν από το ένα άκρο του κρυστάλλου στο άλλο με τη βοήθεια του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Επειδή όμως ισχύει η συνθήκη ηλεκτρικής ουδετερότητας, το αρνητικό ηλεκτρόδιο εγγείει ένα νέο ηλεκτρόνιο μέσα στον κρύσταλλο μέχρις ότου το αρχικό ελεύθερο ηλεκτρόνιο ανασυζευχθεί με μια οπή. Βλέπουμε λοιπόν, ότι ένα φωτόνιο μπορεί να φαίνεται ότι συντελεί ώστε περισσότερα από ένα ηλεκτρόνια να είναι διαθέσιμα για την

αγωγή του ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό κέρδος ρεύματος παριστάνεται με τον εξής παράγοντα κέρδους (gain factor):

$$G = \tau / T_r$$

Ο οποίος αποτελεί άμεσο δείκτη της απόδοσης των φωτοαγωγών, όπως φαίνεται και από την αντικατάσταση της εξίσωσης $G = \tau / T_r$ στην εξίσωση $I_L = e * g't / T_r$. Ο παράγοντα κέρδους G , λοιπόν, μπορεί να αυξηθεί με την ελάττωση του χρόνου διέλευσης T_r καθώς και με την αύξηση του ενεργού χρόνου ζωής, ο οποίος με τη σειρά του σχετίζεται αντίστροφα ανάλογα με την κατευθυνόμενη ταχύτητα, τον αριθμό των παγίδων και με την παγιδευτική ικανότητα των παγίδων αυτών.

9.7 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων – Πρώτη προσέγγιση

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 μια δίοδο.

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:

$$I_\phi = I_0 [\exp ((e * V) / ((\gamma * k * T)) - 1]$$

Από την οποία βρίσκουμε ότι η τιμή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης του στοιχείου V_{oc} (από την αγγλική έκφραση open-circuit voltage) θα είναι :

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

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

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

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.

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα I_{sc} (από την αγγλική έκφραση 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 τη λύση της εξίσωσης:

$$I_L = I_\phi - I_0 \left[\exp \left(\frac{e * I_L * R_L}{\gamma * k * T} \right) - 1 \right]$$

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 τη λύση της εξίσωσης:

$$\left(\frac{I_\phi}{I_0} \right) + 1 = \left[1 + \frac{e * V_m}{\gamma * k * T} \right] * \exp \left[\frac{e * V_m}{\gamma * k * T} \right]$$

9.8 Ο συντελεστής πλήρωσης

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

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

Οι τρεις παραπάνω παράμετροι, δηλαδή ο FF, η 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 των στοιχείων n που αναφέραμε στην αρχή, μπορούμε τώρα να τον ορίσουμε με τη σχέση:

$$n = \frac{P_m}{H * A} = \frac{I_m * V_m}{H * A} = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{H * A}$$

Όπου H η ένταση (πυκνότητα της ισχύος) της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού 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:

$$n = \frac{\phi(E_g) * V_m}{\Phi * E_\mu}$$

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_μ είναι η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

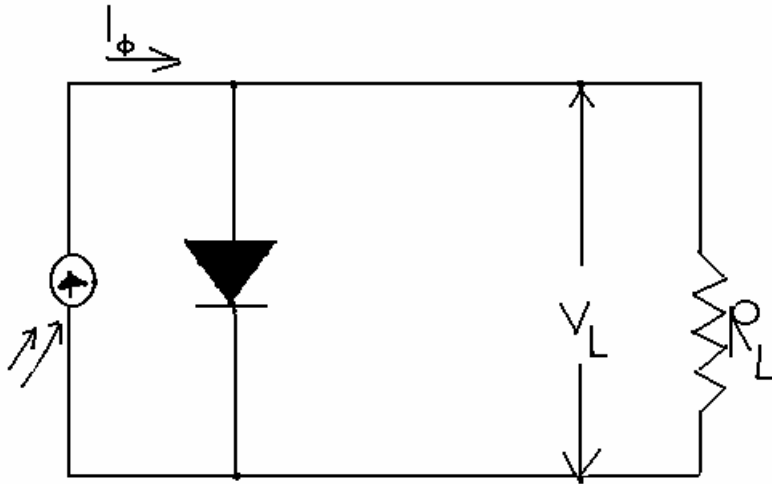
Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Δηλαδή, μια δέσμη ακτινοβολίας θα προκαλέσει σε ένα στοιχείο την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με μια άλλη δέσμη ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια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

9.9 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων – Δεύτερη προσέγγιση

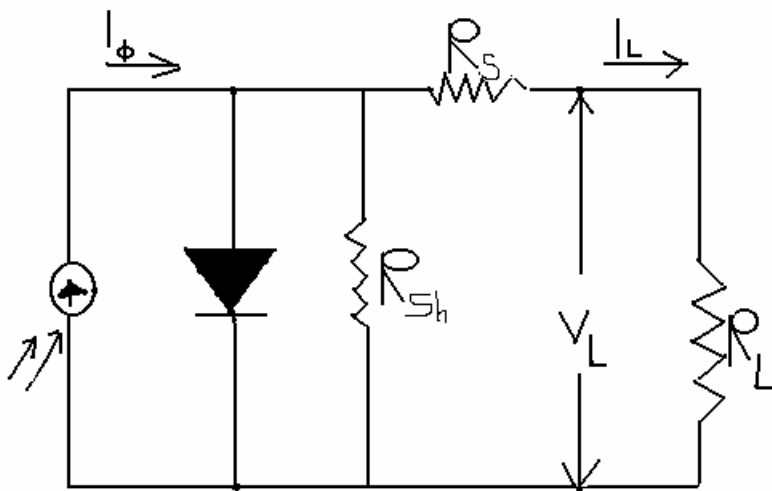
Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος (1) περιγράφει ιδανικές συνθήκες, που δεν υπάρχουν στα πραγματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Μια σωστότερη προσέγγιση αποτελεί το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος (2) διότι περιέχει και τις αναπόφευκτες αντιστάσεις R_s (από την αγγλική έκφραση series resistance) που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό 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 5 Ω και η R_{sh} είναι μεγαλύτερη από 500 Ω. Πάντως επηρεάζουν αισθητά την τιμή της τάσης 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:

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

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 προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και του FF. Παράλληλα, μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 1. Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 2. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, που περιλαμβάνει τις αντιστάσεις σειράς R_s , καθώς και τις παράλληλες αντιστάσεις R_{sh} .

9.10 Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η ηλεκτρική συμπεριφορά που παρουσιάζει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που συνδέεται με μια μεταβλητή αντίσταση είναι η παρακάτω:

- Όταν η τιμή της αντίστασης είναι μηδέν, δηλαδή στη βραχυκυκλωμένη κατάσταση, η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή I_{sc} , ενώ η τάση θα μηδενιστεί.
- Όταν η τιμή της αντίστασης τείνει στο άπειρο, δηλαδή στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση, μηδενίζεται η ένταση του ρεύματος αλλά η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή V_{oc} .

Επίσης στην βραχυκυκλωμένη και στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η ηλεκτρική ισχύς που παράγει το στοιχείο ($P = V * I$) είναι μηδέν αφού αντίστοιχα είναι μηδενική η τάση, στην πρώτη περίπτωση, και η ένταση του ρεύματος στη δεύτερη.

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. Ακόμη η ισχύς που παράγει το στοιχείο μεταβάλλεται ομαλά, με μέγιστη ισχύς P_m σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και έντασης I_m .

Η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, επιδρά στην καμπύλη λειτουργίας του φ/β στοιχείου. Δηλαδή η αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει το ρεύμα βραχυκυκλώσεως μετατοπίζοντας την καμπύλη $I - V$ προς τα πάνω. Αντίστοιχα, η μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατοπίζει την καμπύλη λειτουργίας $I - V$ προς τα κάτω. Αντίθετα, η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας δεν επηρεάζει σημαντικά την τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} του φ/β.

Όταν μεταβάλλεται η αντίσταση του κυκλώματος, η ένταση του ρεύματος παραμένει περίπου σταθερή για το μεγαλύτερο τμήμα του διαγράμματος, ενώ μεταβάλλεται ουσιαστικά η τάση. Δηλαδή το φ/β στοιχείο συμπεριφέρεται, σε μεγάλο βαθμό, σαν πηγή περίπου σταθερού ρεύματος, με την προϋπόθεση ότι παραμένει σταθερή η πυκνότητα της ακτινοβολίας.

9.11 Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης ($I - V$)

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι βασικά μια δίοδος η οποία είναι κατάλληλα σχεδιασμένη να δίνει τάση και ρεύμα όταν εκτίθεται στο φως. Είναι γνωστό από τη βασική θεωρία της

επαφής p – n ότι η χαρακτηριστική I – V της διόδου απουσία επίδρασης φωτός δίνεται από τη σχέση:

$$J = J_s [\exp (eV / AkT) - 1]$$

Όπου J, V : η πυκνότητα του ρεύματος και τάση αντίστοιχα

J_s : πυκνότητα ρεύματος κορεσμού

k, T: σταθερά Boltzman και απόλυτη θερμοκρασία αντίστοιχα

A: παράγοντας ιδανικότητας διόδου, συνήθως μεγαλύτερος του 1

e: στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

Αποδεικνύεται ότι η χαρακτηριστική J - V του φωτοβολταϊκού στοιχείου δίνεται από τη σχέση:

$$J = J_L + J_s [\exp (eV / AkT) - 1]$$

Όπου J_L είναι το ρεύμα που οφείλεται στην προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Από τη σχέση αυτή παρατηρούμε ότι το συνολικό ρεύμα είναι συνδυασμός του ρεύματος που δίνει η διόδος όταν δεν επιδρά σ' αυτή ακτινοβολία και του ρεύματος λόγω επίδρασης ακτινοβολίας.

Το ρεύμα J_L είναι συνάρτηση εξωτερικών παραμέτρων (π.χ. της ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει ανά μονάδα επιφάνειας του στοιχείου) και πολλών παραμέτρων που εξαρτώνται από το υλικό (π.χ. του συντελεστή απορρόφησης, του συντελεστή διάχυσης των ελεύθερων φορέων, του πάχους του υλικού, της δομής του υλικού, του ενεργειακού χάσματος κλπ.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. Πειραματικό μέρος

10.1 Σκοπός του πειράματος

Σκοπός του πειράματος είναι η κατασκευή μικρού φωτοβολταϊκού στοιχείου από χαλκό (Cu) και υποξείδιο του χαλκού (Cu_2O) και η μελέτη της συμπεριφοράς του σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Στο πείραμα αυτό γίνεται η μέτρηση των χαρακτηριστικών τιμών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, που είναι η τάση, η ένταση του ρεύματος και η παραγόμενη ισχύς, δημιουργώντας κάθε φορά ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο αποτελείται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, τα πολύμετρα και μια αντίσταση συνδεδεμένα σε σειρά. Στην συνέχεια γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων προκειμένου να σχεδιαστούν τα διαγράμματα $I - V$ και $P - V$, να προσδιοριστεί το σημείο μέγιστης ισχύος καθώς επίσης και ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε κάθε τιμή έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Μελετάται τέλος και η σύνδεση δύο φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά.

10.2 Διαδικασία κατασκευής ηλιακού στοιχείου

Το πρώτο βήμα ήταν να κοπεί ένα κομμάτι χαλκού που να καλύπτει το μέγεθος του ματιού της ηλεκτρικής κουζίνας.

Χρησιμοποιήσαμε το γυαλόχαρτο εν συνεχεία για να καθαρίσουμε λεπτομερώς την κάλυψη χαλκού, έτσι ώστε οποιοδήποτε σουλφίδιο ή άλλη ελαφριά διάβρωση περιείχε να αφαιρεθεί. Κατόπιν πλύνουμε το φύλλο χαλκού με σαπούνι και πήραμε οποιοδήποτε λίπος μακριά απ' αυτό. Έπειτα, τοποθετήσαμε το καθαρισμένο και ξηρό φύλλο χαλκού στο μάτι της ηλεκτρικής κουζίνας και γυρίσαμε το διακόπτη του ηλεκτρικού ματιού στην υψηλότερη ρύθμιση του.

Καθώς ο χαλκός άρχισε και θερμαινόταν επάνω είδαμε τα όμορφα σχέδια της οξείδωσης να αρχίζουν να διαμορφώνονται.

Πορτοκαλιά, μοβ και κόκκινα χρώματα κάλυψαν το χαλκό.

Δεδομένου, ότι ο χαλκός ζεσταινόταν, τα χρώματα (πορτοκαλιά, μοβ, κόκκινα) αντικαταστάθηκαν με ένα μαύρο επίστρωμα του δισθενούς χαλκού οξειδίου. Τα οξείδια αυτά δεν ήταν αυτά που θέλαμε, αλλά ξεφλούδισε αργότερα, παρουσιάζοντας τα κόκκινα, πορτοκαλιά και μοβ του μονοθενούς χαλκού στρώμα οξειδίων κάτω από αυτά. Τα

τελευταία κομμάτια του χρώματος εξαφανίστηκαν ως ενάρξεις του ηλεκτρικού ματιού για να καεί κόκκινο.

Όταν το ηλεκτρικό μάτι έγινε κόκκινο, το φύλλο χαλκού ντύθηκε με ένα μαύρο δισθενούς χαλκού παλτό οξειδίων. Το αφήσαμε να μαγειρευτεί για μισή ώρα περίπου, έτσι το μαύρο επίστρωμα θα ήταν παχύ. Αυτό είναι σημαντικό, δεδομένου ότι ένα παχύ επίστρωμα ξεφλουδίζει ωραία, ενώ ένα λεπτό επίστρωμα μένει κολλημένο στο χαλκό.

Αφού πέρασε η μισή ώρα του μαγειρέματος κλείσαμε το ηλεκτρικό μάτι της κουζίνας. Αφήσαμε τον καυτό χαλκό στο ηλεκτρικό μάτι για να δροσίσει αργά. Εάν τον δροσίσαμε πάρα πολύ γρήγορα, το μαύρο οξείδιο θα έμενε κολλημένο στο χαλκό.

Δεδομένου, ότι ο χαλκός δροσίζει, στενεύει. Το μαύρο δισθενούς χαλκού οξείδιο στενεύει επίσης. Στενεύουν όμως σε διαφορετικά ποσοστά, κάνοντας τη μαύρη δισθενούς χαλκού νιφάδα οξειδίων.

Οι μικρές μαύρες νιφάδες σκάσανε από το χαλκό με αρκετή δύναμη.

Όταν ο χαλκός δρόσισε στη θερμοκρασία δωματίου (αυτό διέρκησε περίπου 20 λεπτά) το μεγαλύτερο μέρος του μαύρου οξειδίου απομακρύνθηκε. Ένα ελαφρύ τρίψιμο με τα χέρια μας κάτω από το τρεχούμενο νερό αφαίρεσε τα περισσότερα από τα μικρά κομμάτια.

Δεν έπρεπε να αφαιρεθούν τα μαύρα σημεία με σκληρά αντικείμενα γιατί θα έβλαπταν το λεπτό κόκκινο μονοσθενούς χαλκού στρώμα οξειδίων που πρέπει να κάνουμε στην εργασία αυτή.

Έπειτα κόψαμε ένα άλλο φύλλο χαλκού του ίδιου μεγέθους χαλκού όπως το πρώτο. Τα δύο αυτά κομμάτια τα στερεώσαμε με μανταλάκια στο τάπερ. Το μονοσθενούς χαλκού επίστρωμα οξειδίων που ήταν σε επαφή με το ηλεκτρικό μάτι είναι συνήθως η καλύτερη πλευρά που αντιμετωπίζει εξωτερικά στο τάπερ, επειδή έχει την ομαλότερη και καθαρότερη επιφάνεια.

Συνδέσαμε τους δύο μολύβδους σαν αλιγάτορες συνδετήρων, τον ένα με το νέο πιάτο χαλκού και το άλλο στο μονοσθενούς χαλκού ντυμένο οξείδιο φύλλο. Συνδέσαμε το μολύβδο από το καθαρό φύλλο χαλκού με το θετικό τερματικό του μετρητή. Ενώ το μολύβδο από το μονοσθενούς χαλκού φύλλο οξειδίων το συνδέσαμε με το αρνητικό τερματικό του μετρητή.

Ανακατώνουμε τις 2 κουταλιές σούπας αλάτι περίπου 35 gr και τα 1.500 ml περίπου νερού βρύσης, έως ότου διαλυθεί όλο το αλάτι και το ρίχνουμε μέσα στο τάπερ. Έτσι όλη αυτή η πειραματική διάταξη αποτελεί το ηλιακό μας στοιχείο που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια.

10.3 Περιγραφή του πειράματος

10.3.1 Πειραματικές συσκευές

Η εργαστηριακή διάταξη, αποτελείται από δύο φύλλα χαλκού διαστάσεων $(15,2*15,2)$ cm² το καθένα, στερεωμένα με μανταλάκια σε ένα τάπερ και εμβαπτισμένα κατά ένα μέρος της επιφάνειάς τους σε διάλυμα αλατόνευρου. Αποτελείται ακόμα από ένα πυρανόμετρο για τη μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, δύο πολύμετρα για τη μέτρηση τάσεων και αντιστάσεων καθώς και τα απαραίτητα καλώδια σύνδεσης και ορισμένα στοιχειώδη φορτία κατανάλωσης. Με τη χρήση της εν λόγω διάταξης, παίρνουμε τις πειραματικές μας μετρήσεις. Πήραμε ακόμα μετρήσεις χρησιμοποιώντας ένα μικρότερο φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(11,4*11,4)$ cm².

Και στο τέλος συνδέσαμε τα παραπάνω δύο φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά και πήραμε επίσης μετρήσεις.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του πειραματικού ηλιακού στοιχείου είναι:

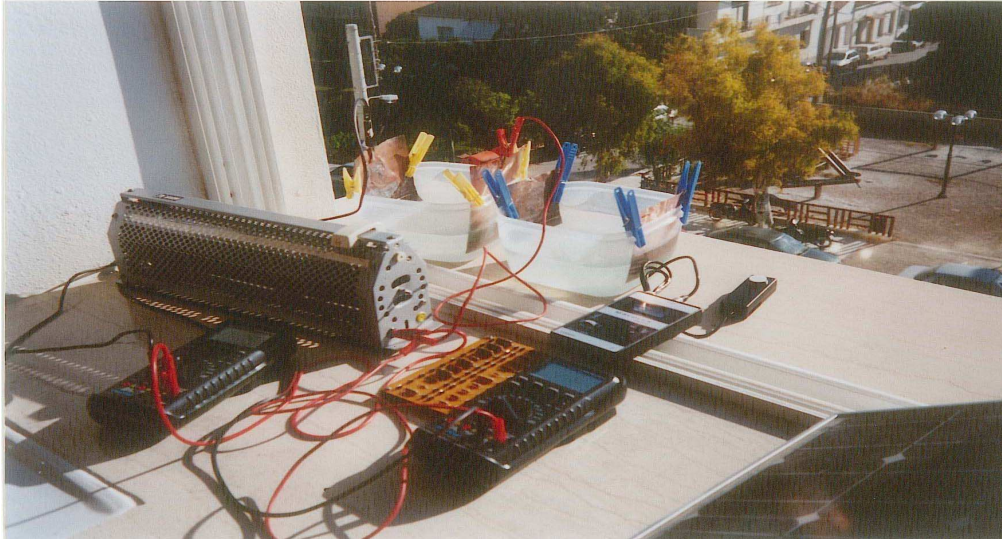
1. Δύο φύλλα χαλκού με διαστάσεις $(15,2*15,2)$ cm² και $(11,4*11,4)$ cm².
2. Μόλυβδοι σαν αλιγάτορες συνδετήρων (κροκοδιλάκια).
3. Πολύμετρα για τη μέτρηση των αντιστάσεων καθώς και των τάσεων.
4. Ένα μάτι ηλεκτρικής κουζίνας για τη μετατροπή του χαλκού σε μονοσθενούς χαλκού οξείδιο.
5. Δύο πλαστικά τάπερ.
6. Επιτραπέζιο αλάτι.
7. Νερό βρύσης.
8. Φύλλο άμμου (γυαλόχαρτο), για τη λείανση της επιφάνειας των φύλλων χαλκού.

10.3.2 Πειραματική διαδικασία

Δημιουργείται ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο περιλαμβάνει το πειραματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(15,2*15,2)$ cm², δύο πολύμετρα και μια μεταβλητή αντίσταση με τιμές από 0 - 42 Ω. Με το ένα πολύμετρο μετράμε την τιμή της αντίστασης σε Ωμ συνδεδεμένο σε σειρά και με το άλλο πολύμετρο μετράμε την τάση του φωτοβολταϊκού

στοιχείου, συνδεδεμένο εν παραλλήλω. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο εκτίθεται σε ηλιακή ακτινοβολία.

Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:

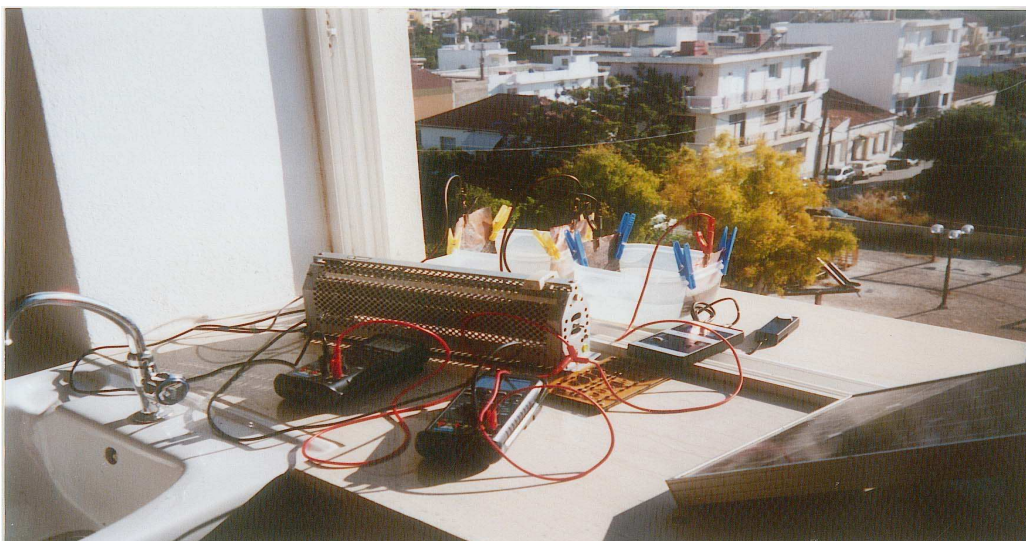


Με τη βοήθεια του πυρανόμετρου μετράται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο εκτίθεται στον ήλιο και μεταβάλλεται η αντίσταση του κυκλώματος, καταγράφοντας ορισμένες τιμές τάσης και αντίστασης και εν συνεχεία με χρήση του νόμου του Ohm υπολογίζεται η ένταση του ρεύματος του συστήματος.

Όμοια και με το φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(11,4*11,4) \text{ cm}^2$.

Στη συνέχεια τα παραπάνω δύο φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται εν σειρά



10.4 Μεθοδολογία ανάλυσης

Από τις μετρήσεις που γίνονται στη διάρκεια του πειράματος επιχειρείται ο σχεδιασμός των καμπύλων $I - V$ και $P - V$ για κάθε χρησιμοποιούμενο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Συγκεκριμένα ακολουθούνται τα εξής βήματα:

→Σχεδιάζονται οι καμπύλες $I - V$ και $P - V$ για το μεμονωμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο υπό σταθερή ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Από τα διαγράμματα εκτιμάται η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στη μέγιστη ισχύ του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Στη συνέχεια υπολογίζεται η αντίσταση φορτίου που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό.

→Για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων εν σειρά προσδιορίζονται οι προκύπτουσες καμπύλες $I - V$ και $P - V$ της συνδεσμολογίας, βάσει των πειραματικών τιμών που μετρήθηκαν.

→Υπολογίζονται οι καμπύλες $I - V$ και $P - V$ για τα απλά φωτοβολταϊκά στοιχεία και τις διάφορες τιμές έντασης G της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα συνολικά αποτελέσματα παρουσιάζονται τόσο για τη διανομή $I - V$ όσο και για τη διανομή $P - V$ σε κοινά διαγράμματα.

→Τέλος βάσει των δεδομένων υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

10.5 Αποτελέσματα πειραμάτων

Μετρήσεις:

Για το φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(15,2*15,2)$ cm² οι μετρήσεις φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων 15,2*15,2 cm² Ηλιακή ακτινοβολία $G = 993$ W/m²			
R (Ω)	V (mV)	I (mA)	P (μW)
11,2	2,2	0,2	0,44
220	37,8	0,17	6,43
390	51	0,13	6,63
560	55,5	0,1	5,55
1.000	59,8	0,06	3,59
2.200	66	0,03	1,98
3.300	67,9	0,02	1,36
5.600	69,6	0,01	0,70

Μετρήσεις:

Για το νέο φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(15,2*15,2)$ cm² οι μετρήσεις φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων 15,2*15,2 cm² Ηλιακή ακτινοβολία $G = 946$ W/m²			
R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
0	-	0,0098	-
11,2	0,11	0,0098	0,0011
21,2	0,18	0,0085	0,0015
220	0,50	0,0023	0,0012
390	0,53	0,0014	0,0007
560	0,55	0,001	0,0006
1.000	0,58	0,0006	0,0003
2.200	0,60	0,0003	0,0002
3.300	0,61	0,0002	0,0001
5.600	0,62	0,0001	0,0001

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων 15,2*15,2 cm² Ηλιακή ακτινοβολία $G = 1.104$ W/m²			
R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
0	-	0,0116	-
11,2	0,13	0,0116	0,0015
21,2	0,2	0,0094	0,0019
220	0,52	0,0024	0,0012
390	0,56	0,0014	0,0008
560	0,57	0,0010	0,0006
1.000	0,6	0,0006	0,0004
2.200	0,61	0,0003	0,0002
3.300	0,62	0,0002	0,0001
5.600	0,63	0,0001	0,0001

Μετρήσεις:

Για το φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(11,4*11,4) \text{ cm}^2$ οι μετρήσεις φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων 11,4*11,4 cm² Ηλιακή ακτινοβολία G = 906 W/m²			
R (Ω)	V (mV)	I (mA)	P (μW)
15	3	0,2	0,6
33	7	0,2	1,4
51	8,7	0,17	1,48
220	11,7	0,05	0,58
390	12,8	0,03	0,38
560	13	0,02	0,26
1.000	13,4	0,01	0,13

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων 11,4*11,4 cm² Ηλιακή ακτινοβολία G = 1.179 W/m²			
R (Ω)	V (mV)	I (mA)	P (μW)
1,2	1	0,83	0,83
1,5	1,2	0,8	0,96
1,8	1,4	0,78	1,09
17	11,4	0,67	7,64
82	14,4	0,17	2,45
220	17	0,08	1,36
560	17,9	0,03	0,54
1.000	18,7	0,02	0,37
2.200	19,1	0,009	0,17

Μετρήσεις:

Για τα φ/β στοιχεία σε σειρά οι μετρήσεις φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων 15,2*15,2 cm² Ηλιακή ακτινοβολία G = 900 W/m²			
R (Ω)	V (mV)	I (mA)	P (μW)
0	0,2	0,87	0,17
1,5	1,3	0,87	1,13
9	5,4	0,6	3,24
17,8	8,4	0,47	3,95
33,5	12	0,36	4,32
390	18	0,05	0,90
1.000	19,4	0,02	0,39
2.200	19,6	0,009	0,18

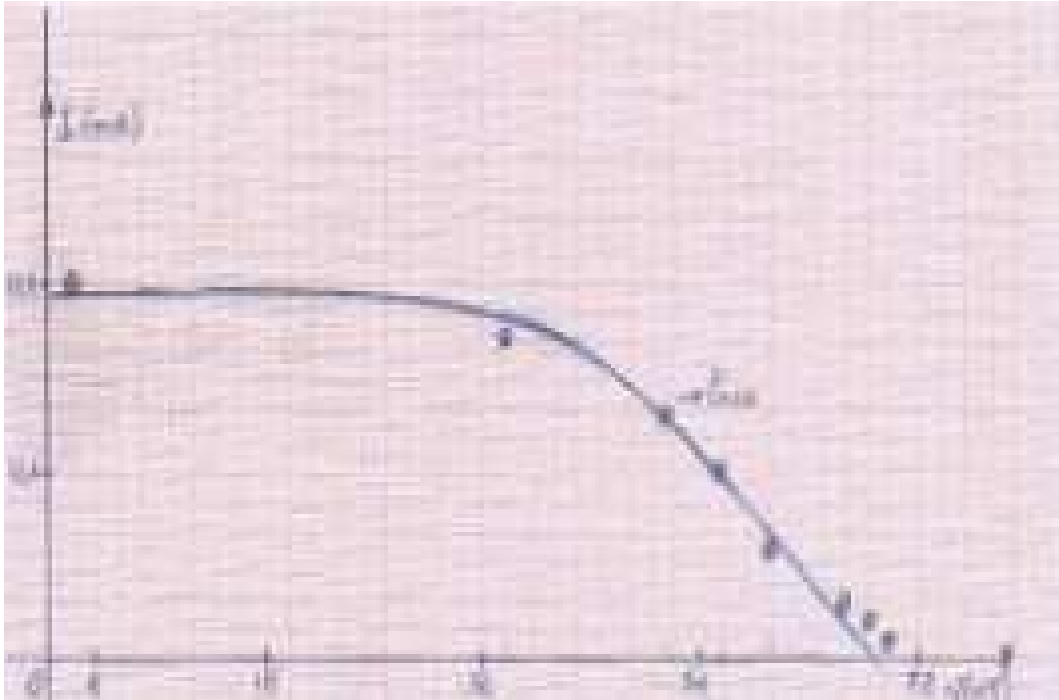
Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων 11,4*11,4 cm² Ηλιακή ακτινοβολία G = 881 W/m²			
R (Ω)	V (mV)	I (mA)	P (μW)
0	0,3	1,06	0,32
9	9,5	1,06	10,07
17,8	15,3	0,86	13,16
33,5	23,9	0,71	16,97
390	68,3	0,18	12,29
1.000	75,5	0,08	6,04
2.200	76,3	0,03	2,29

Πειραματική διάταξη με δυο φωτοβολταϊκά στοιχεία εν σειρά Ηλιακή ακτινοβολία G = 927 W/m²			
R (Ω)	V (mV)	I (mA)	P (μW)
0	0,1	1,07	0,11
1,5	1,6	1,07	1,71
9	8	0,89	7,12
17,8	13,8	0,78	10,76

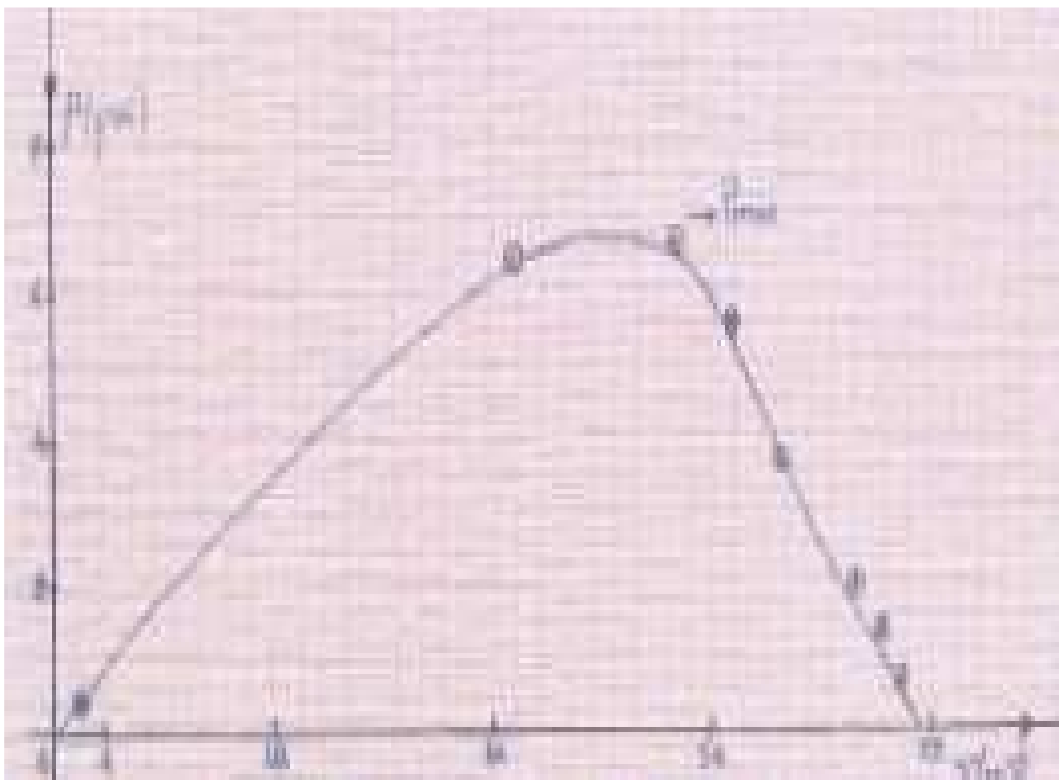
33,5	22,1	0,66	14,59
390	75,8	0,19	14,40
1.000	91	0,09	8,19
2.200	101	0,05	5,05

10.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 15,2*15,2 cm²
ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 993 \text{ W / m}^2$.**

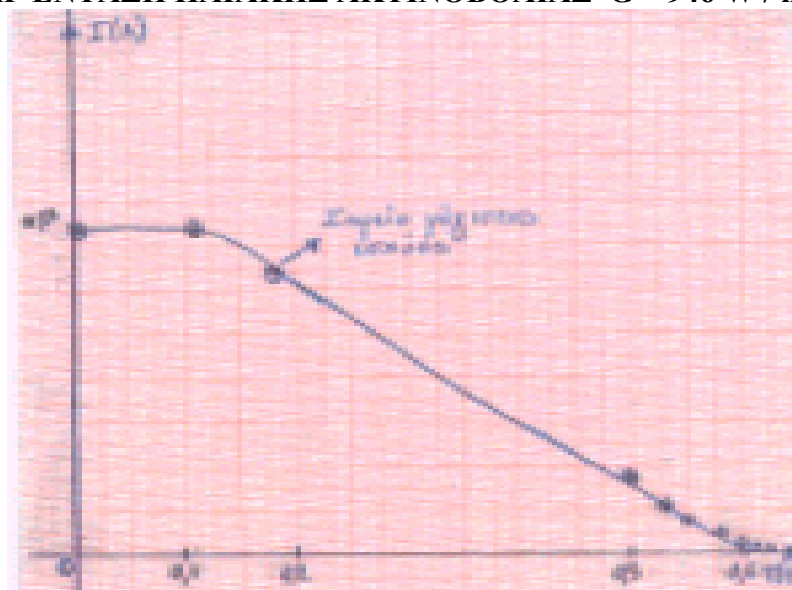


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 993 \text{ W / m}^2$.

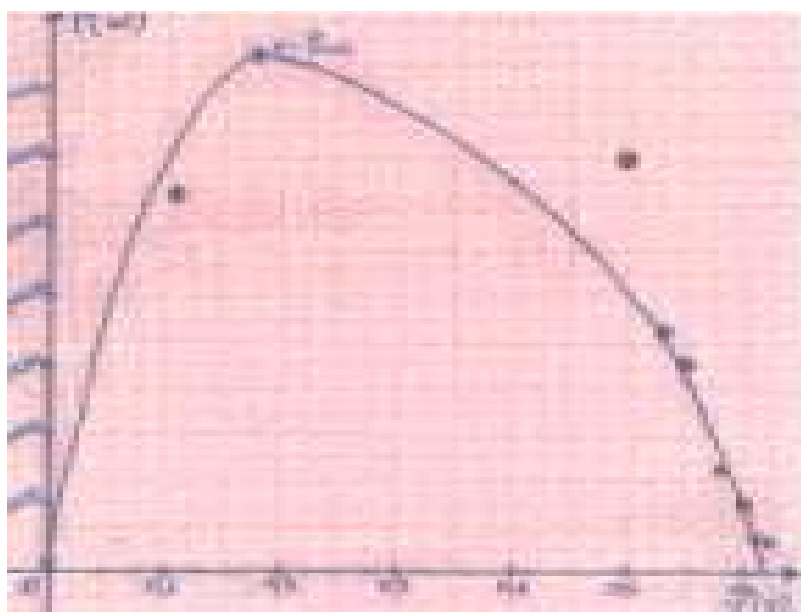


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ηλεκτρική ισχύ (P) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 993 \text{ W / m}^2$.

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 15,2*15,2 cm² (NEO)
ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 946 \text{ W / m}^2$.**

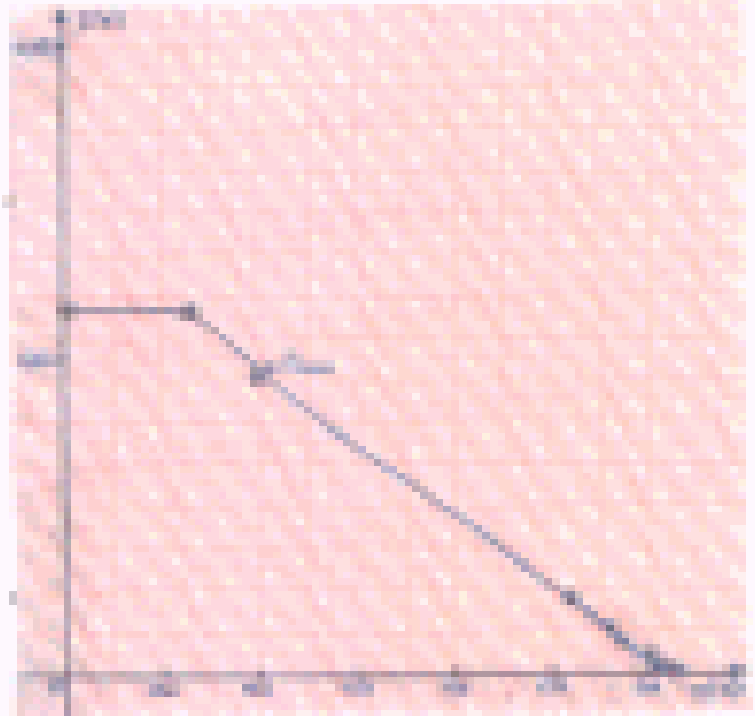


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 946 \text{ W / m}^2$.

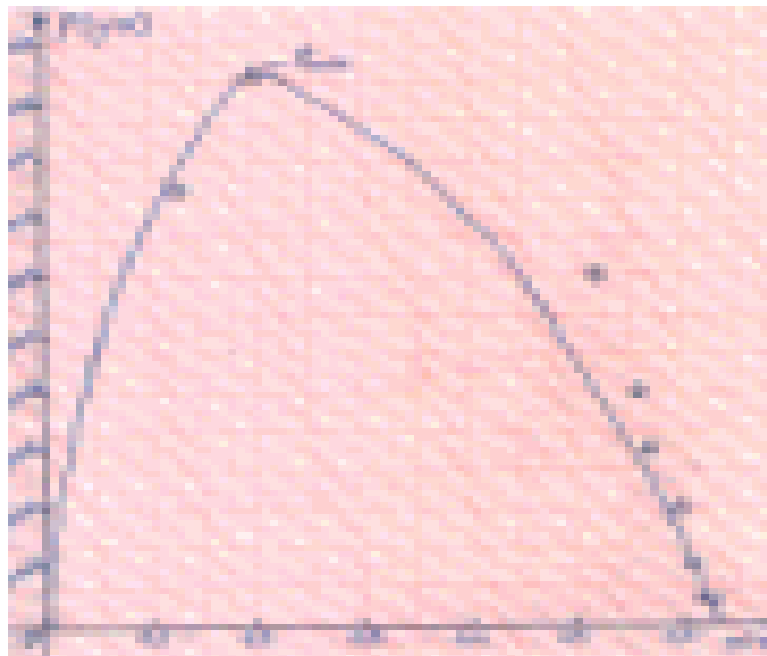


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ηλεκτρική ισχύ (P) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 946 \text{ W / m}^2$.

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 15,2*15,2 cm² (NEO)
ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 1.104 \text{ W / m}^2$.**

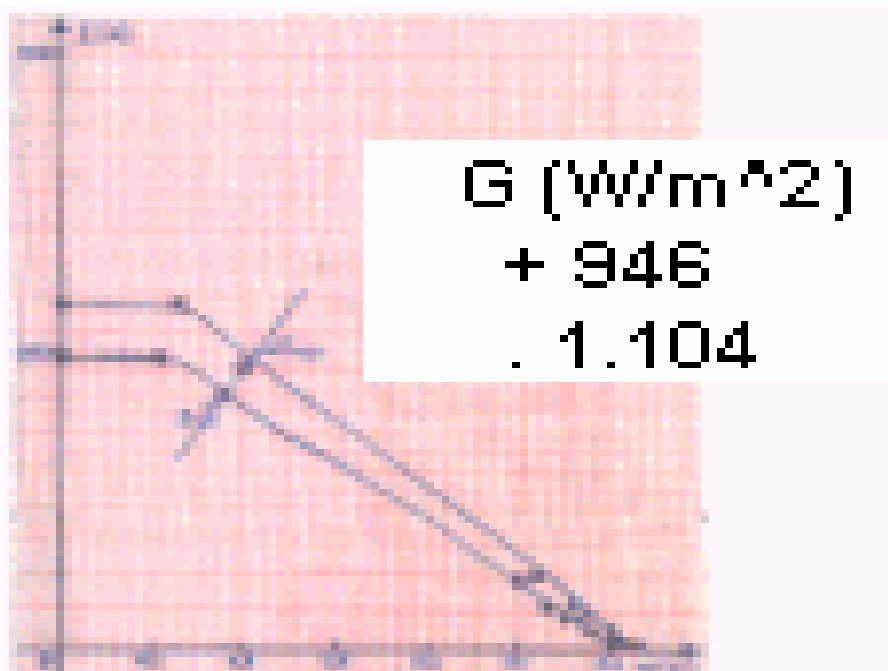


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 1.104 \text{ W / m}^2$.

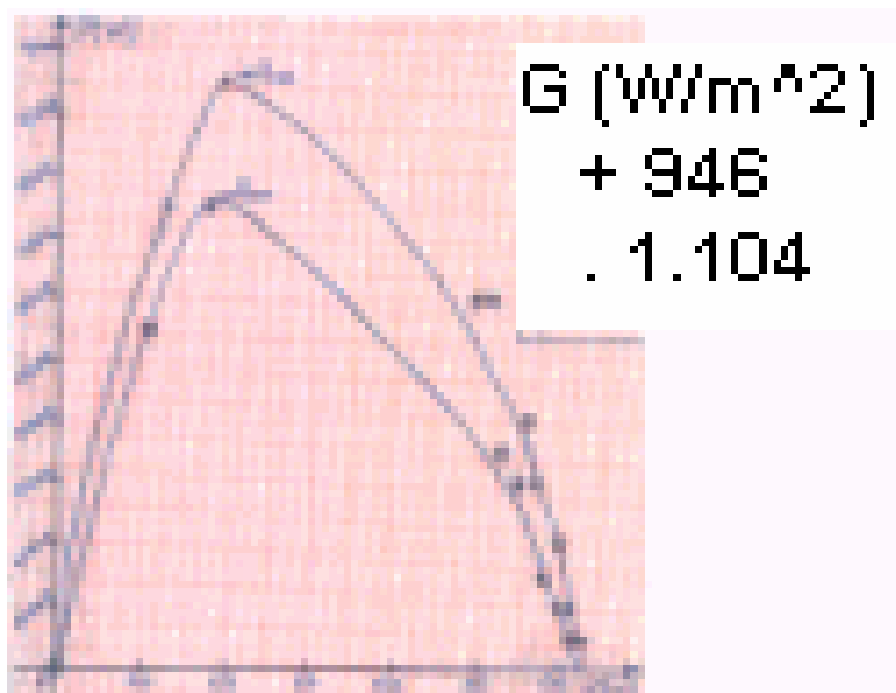


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ηλεκτρική ισχύ (P) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 1.104 \text{ W / m}^2$.

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 15,2*15,2 cm² (NEO)
 ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 946 \text{ W / m}^2$
 ΚΑΙ $G = 1.104 \text{ W / m}^2$.**

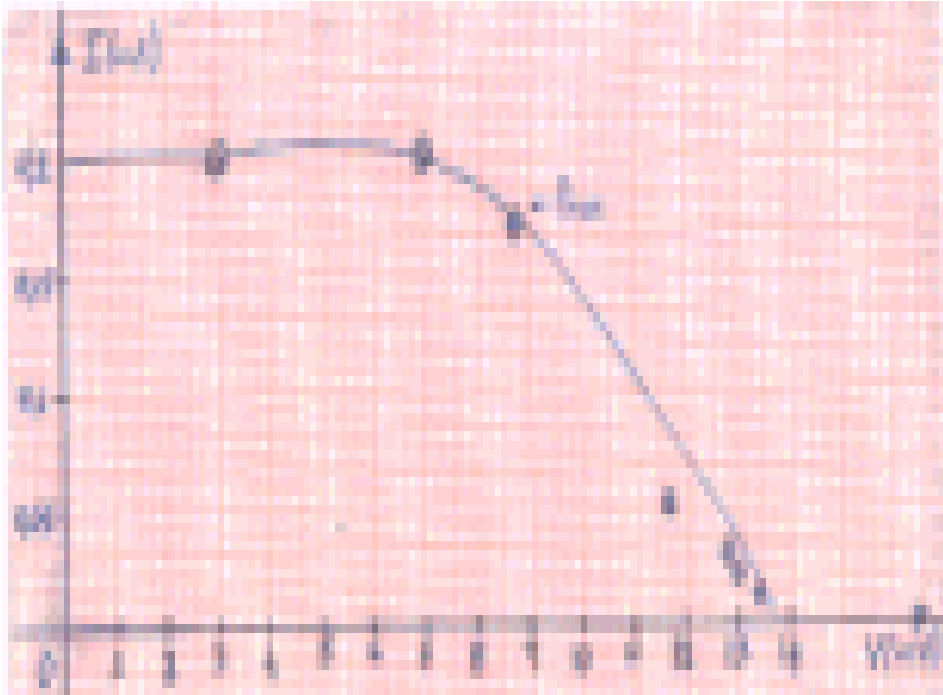


Χαρακτηριστικές καμπύλες ϕ/β , (I - V) για τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 946 \text{ W / m}^2$ και $G = 1.104 \text{ W / m}^2$.

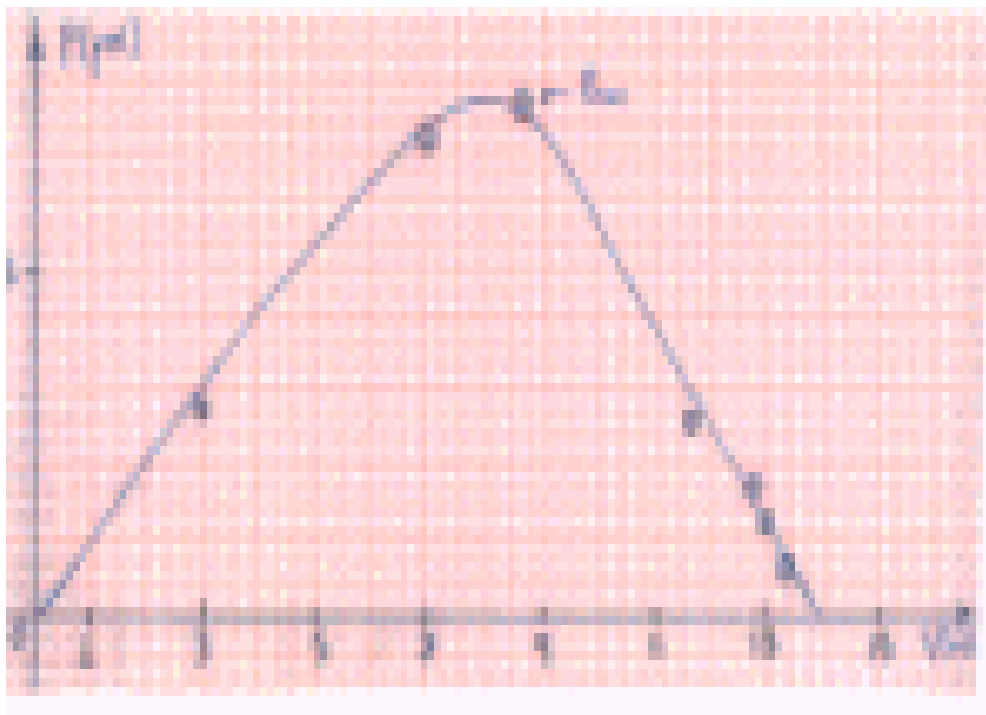


Χαρακτηριστικές καμπύλες ϕ/β , (P - V) για τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 946 \text{ W / m}^2$ και $G = 1.104 \text{ W / m}^2$.

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11,4*11,4 cm²
ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 906 \text{ W / m}^2$.**

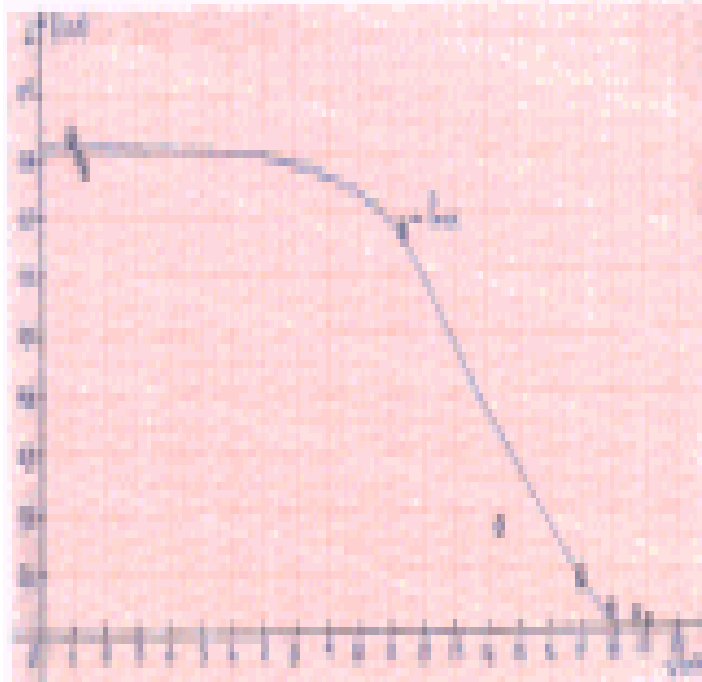


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 906 \text{ W / m}^2$.

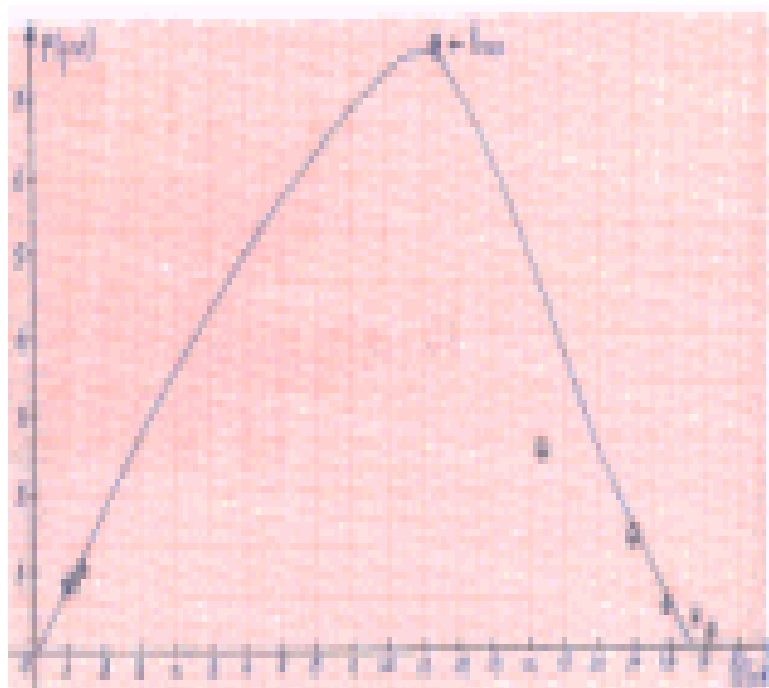


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ηλεκτρική ισχύ (P) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 906 \text{ W / m}^2$.

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11,4*11,4 cm²
ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 1.179 \text{ W / m}^2$.**

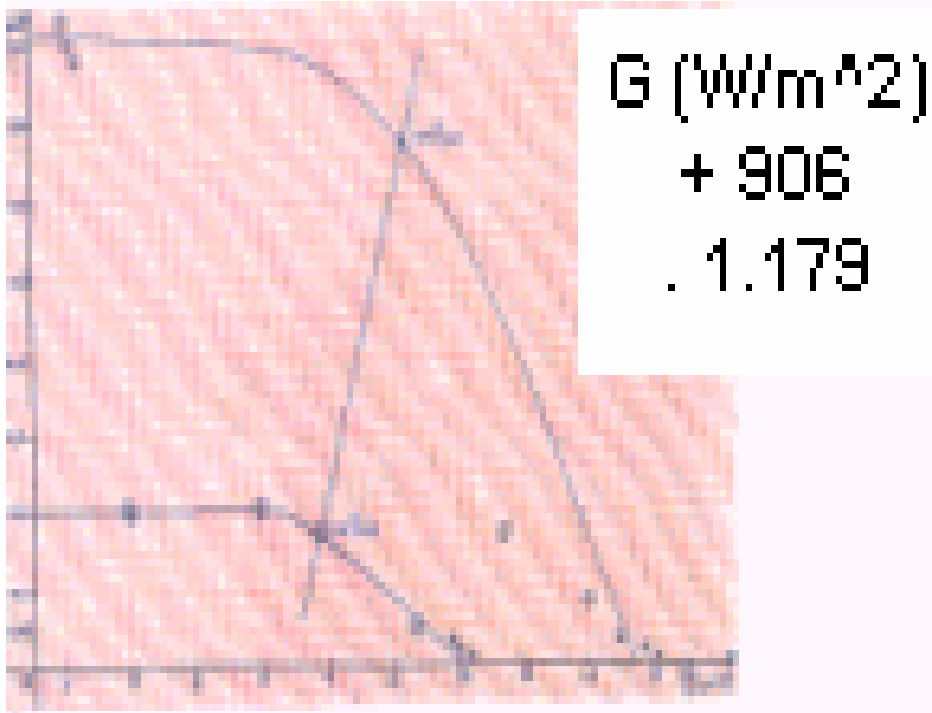


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 1.179 \text{ W / m}^2$.

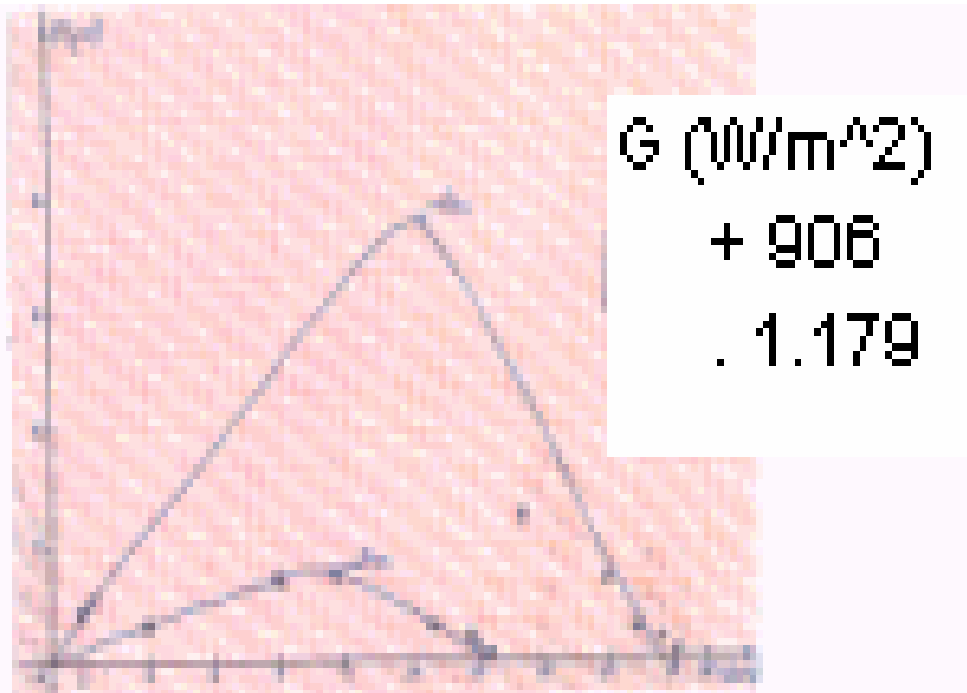


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ηλεκτρική ισχύ (P) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 1.179 \text{ W / m}^2$.

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11,4*11,4 cm²
 ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 906 \text{ W / m}^2$
 ΚΑΙ $G = 1.179 \text{ W / m}^2$.**



Χαρακτηριστικές καμπύλες φ/β, (I - V) για τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 906 \text{ W / m}^2$ και $G = 1.179 \text{ W / m}^2$.

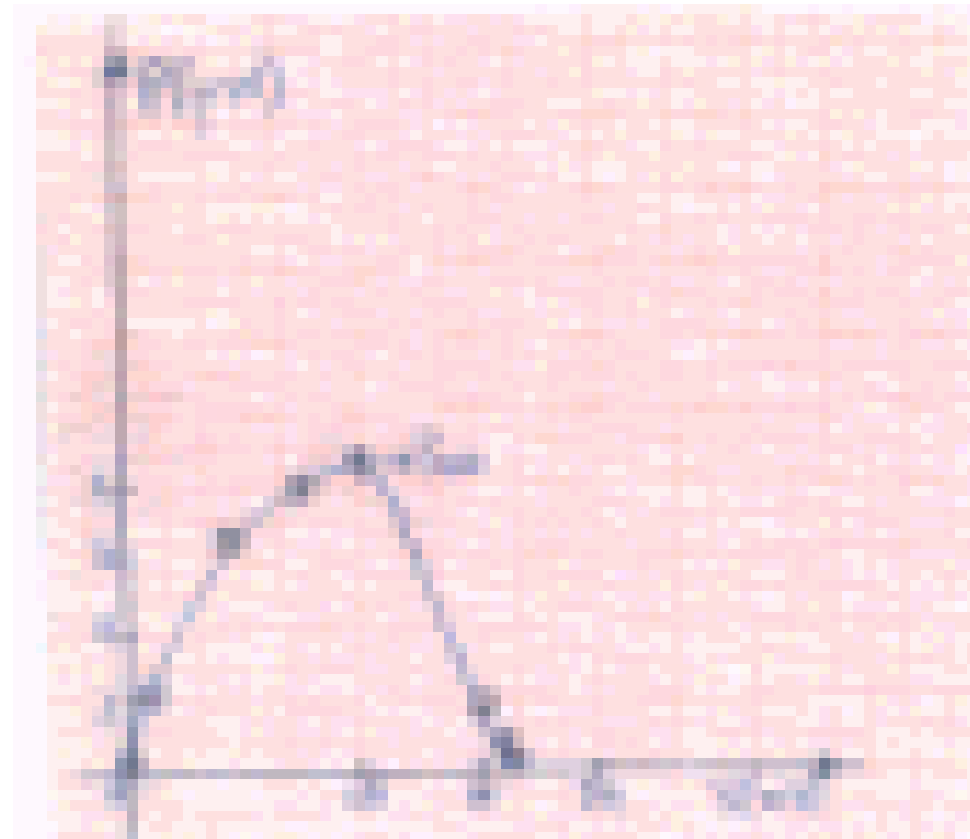


Χαρακτηριστικές καμπύλες φ/β, (P - V) για τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 906 \text{ W / m}^2$ και $G = 1.179 \text{ W / m}^2$.

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 15,2*15,2 cm²
ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 900 \text{ W / m}^2$.**

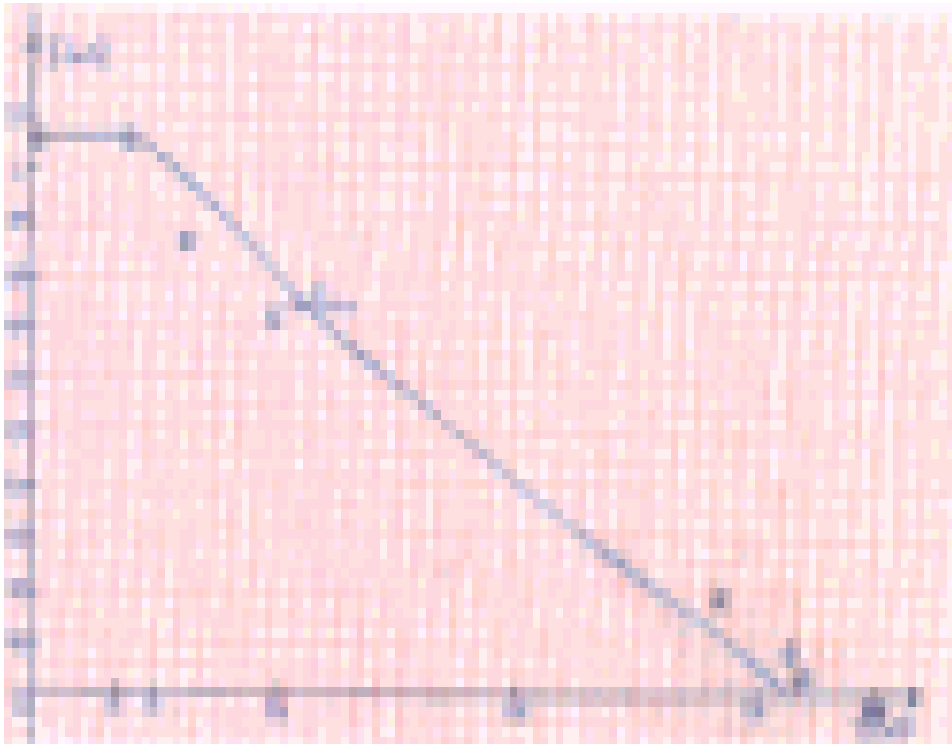


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 900 \text{ W / m}^2$.

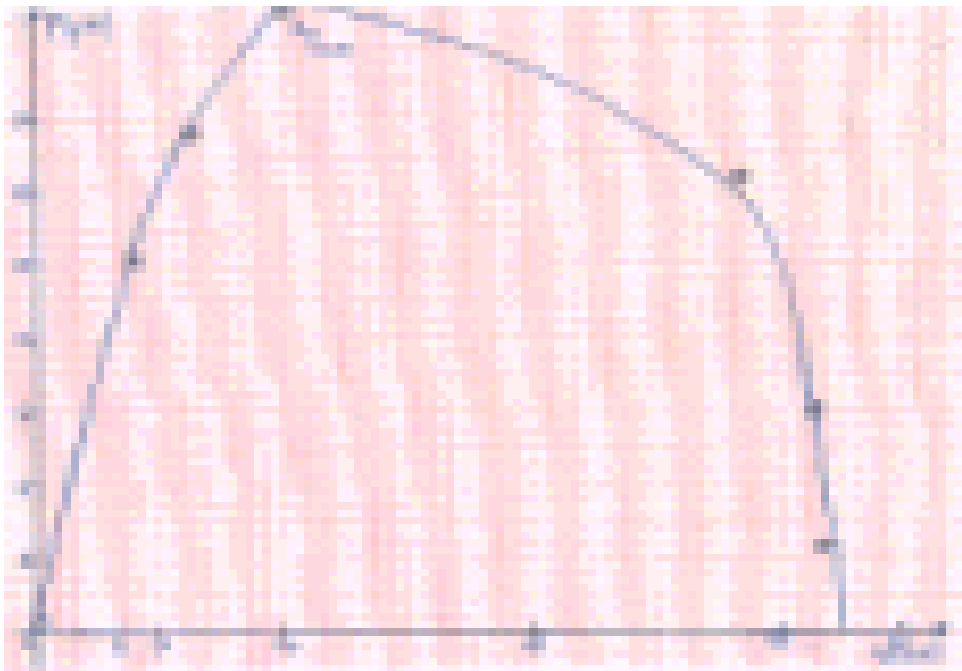


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ηλεκτρική ισχύ (P) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 900 \text{ W / m}^2$.

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11,4*11,4 cm²
ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 881 \text{ W / m}^2$.**

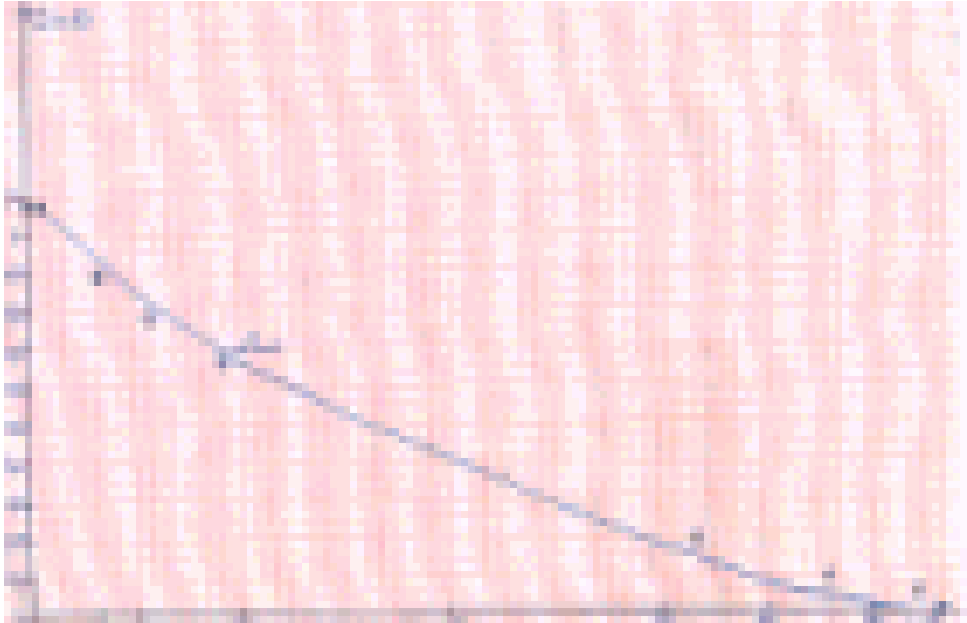


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 881 \text{ W / m}^2$.

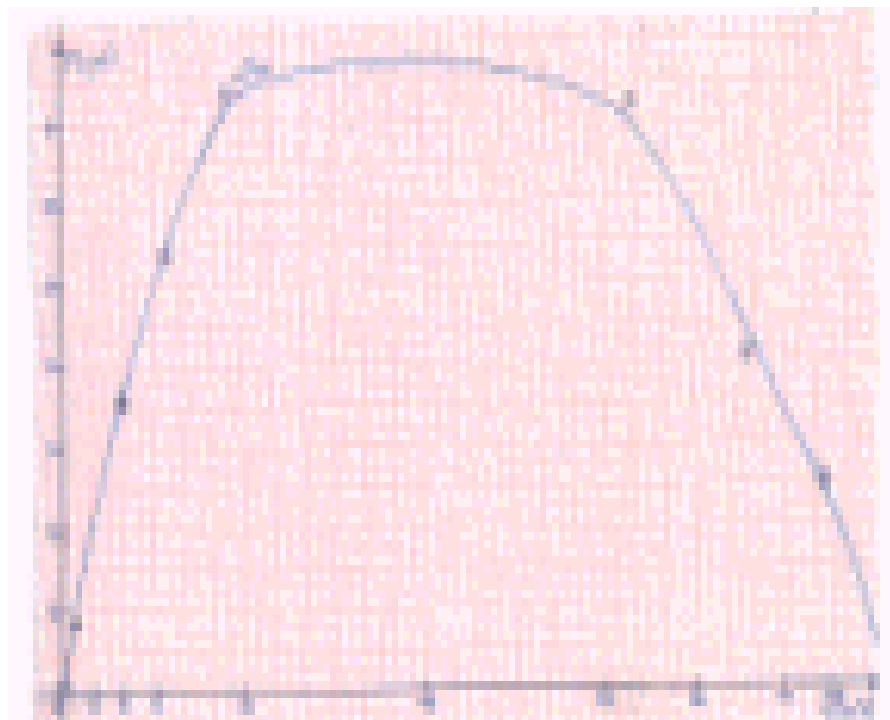


Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ηλεκτρική ισχύ (P) που παράγει το φ/β για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 881 \text{ W / m}^2$.

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 15,2*15,2 cm²
ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ
ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11,4*11,4 cm² ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $G = 927 \text{ W / m}^2$.**

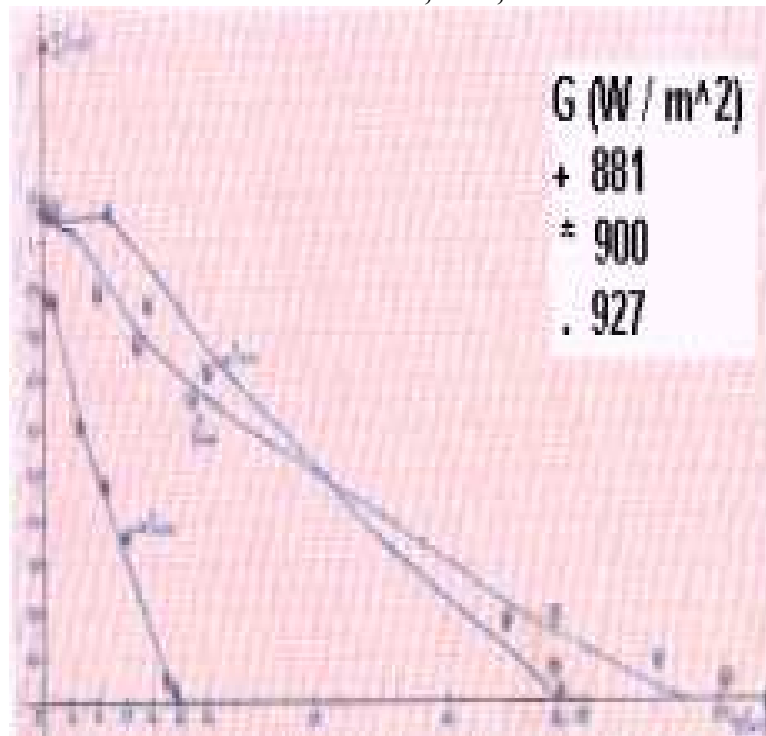


**Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με
την ένταση του ρεύματος (I) που παράγουν τα φ/β σε σειρά
για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 927 \text{ W / m}^2$.**

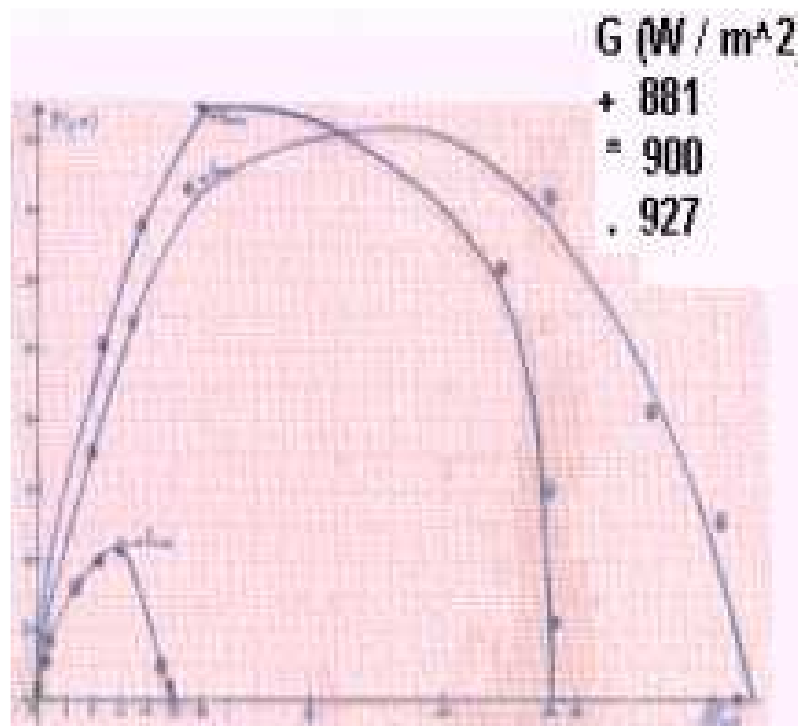


**Διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με
την ηλεκτρική ισχύ (P) που παράγουν τα φ/β σε σειρά
για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G = 927 \text{ W / m}^2$.**

**ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ
ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 11,4*11,4 cm².**



Συνολικό διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος (I) που παράγουν τα φ/β σε σειρά.



Συνολικό διάγραμμα μεταβολής της τάσης (V) σε συνάρτηση με την ηλεκτρική ισχύ (P) που παράγουν τα φ/β σε σειρά.

10.7 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων

>Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (15,2*15,2) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 993 (W / m²).

Εμβαδόν φωτοβολταϊκού πλαισίου = (15,2*15,2) cm² = 0,023104 m²

Η ισχύς που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$P_{\Phi/B} = E * A = 993 \text{ (W / m}^2\text{)} * 0,023104 \text{ (m}^2\text{)} = 22,942272 \text{ W}$$

Η μέγιστη ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$6,63 \mu\text{W} = 6,63 * 10^{-6} \text{ W}$$

Άρα ο βαθμός απόδοσης $\phi/\beta = 100 * [(6,63 * 10^{-6}) \text{ W} / (22,942272) \text{ W}] = 2,89 * 10^{-5}$ ή 0,0000289%

>>Για το νέο φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (15,2 *15,2) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 946 (W / m²).

Εμβαδόν φωτοβολταϊκού πλαισίου = (15,2 *15,2) cm² = 0,023104 m²

Η ισχύς που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$P_{\Phi/B} = E * A = 946 \text{ (W / m}^2\text{)} * 0,023104 \text{ (m}^2\text{)} = 21,856384 \text{ W}$$

Η μέγιστη ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$0,0015 \text{ W}$$

Άρα ο βαθμός απόδοσης $\phi/\beta = 100 * [(0,0015) \text{ W} / (21,856384) \text{ W}] = 6,86 * 10^{-3}$ ή 0,00686%

>>Για το νέο φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (15,2 *15,2) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 1.104 (W / m²).

Εμβαδόν φωτοβολταϊκού πλαισίου = (15,2 *15,2) cm² = 0,023104 m²

Η ισχύς που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$P_{\Phi/B} = E * A = 1.104 \text{ (W / m}^2\text{)} * 0,023104 \text{ (m}^2\text{)} = 25,506816 \text{ W}$$

Η μέγιστη ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$0,0019 \text{ W}$$

$$\text{Άρα ο βαθμός απόδοσης } \varphi/\beta = 100 * [(0,0019) \text{ W} / (25,506816) \text{ W}] = 7,45 * 10^{-3} \text{ ή } 0,00745\%$$

>>>Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (11,4*11,4) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 906 (W / m²).

$$\text{Εμβαδόν φωτοβολταϊκού πλαισίου} = (11,4 * 11,4) \text{ cm}^2 = 0,012996 \text{ m}^2$$

Η ισχύς που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$P_{\Phi/B} = E * A = 906 \text{ (W / m}^2\text{)} * 0,012996 \text{ (m}^2\text{)} = 11,774376 \text{ W}$$

Η μέγιστη ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$1,48 \text{ } \mu\text{W} = 1,48 * 10^{-6} \text{ W}$$

$$\text{Άρα ο βαθμός απόδοσης } \varphi/\beta = 100 * [(1,48 * 10^{-6}) \text{ W} / (11,774376) \text{ W}] = 1,26 * 10^{-5} \text{ ή } 0,0000126\%$$

>>>Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (11,4*11,4) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 1.179 (W / m²).

$$\text{Εμβαδόν φωτοβολταϊκού πλαισίου} = (11,4 * 11,4) \text{ cm}^2 = 0,012996 \text{ m}^2$$

Η ισχύς που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$P_{\Phi/B} = E * A = 1.179 \text{ (W / m}^2\text{)} * 0,012996 \text{ (m}^2\text{)} = 15,322284 \text{ W}$$

Η μέγιστη ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$7,64 \mu\text{W} = 7,64 * 10^{-6} \text{ W}$$

Άρα ο βαθμός απόδοσης $\phi/\beta = 100 * [(7,64 * 10^{-6}) \text{ W} / (15,322284) \text{ W}] = 4,99 * 10^{-5}$ ή 0,0000499%

->Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (15,2*15,2) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 900 (W / m²).

$$\text{Εμβαδόν φωτοβολταϊκού πλαισίου} = (15,2 * 15,2) \text{ cm}^2 = 0,023104 \text{ m}^2$$

Η ισχύς που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$P_{\phi/\beta} = E * A = 900 \text{ (W / m}^2) * 0,023104 \text{ (m}^2) = 20,7936 \text{ W}$$

Η μέγιστη ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$4,32 \mu\text{W} = 4,32 * 10^{-6} \text{ W}$$

Άρα ο βαθμός απόδοσης $\phi/\beta = 100 * [(4,32 * 10^{-6}) \text{ W} / (20,7936) \text{ W}] = 2,08 * 10^{-5}$ ή 0,0000208%

->Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (11,4*11,4) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 881 (W / m²).

$$\text{Εμβαδόν φωτοβολταϊκού πλαισίου} = (11,4 * 11,4) \text{ cm}^2 = 0,012996 \text{ m}^2$$

Η ισχύς που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$P_{\phi/\beta} = E * A = 881 \text{ (W / m}^2) * 0,012996 \text{ (m}^2) = 11,449476 \text{ W}$$

Η μέγιστη ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$16,97 \mu\text{W} = 16,97 * 10^{-6} \text{ W}$$

Άρα ο βαθμός απόδοσης $\phi/\beta = 100 * [(16,97 * 10^{-6}) \text{ W} / (11,449476) \text{ W}] = 1,48 * 10^{-4}$ ή 0,000148 %

->Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε σειρά και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 927 (W / m²).

Εμβαδόν 1^{ου} φωτοβολταϊκού πλαισίου = (15,2*15,2) cm² = 0,023104 m²

Εμβαδόν 2^{ου} φωτοβολταϊκού πλαισίου = (11,4*11,4) cm² = 0,012996 m²

Συνολικό εμβαδόν ϕ/β πλαισίων = 0,0361 m²

Η ισχύς που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$P_{\phi/\beta} = E * A = 927 \text{ (W / m}^2\text{)} * 0,0361 \text{ (m}^2\text{)} = 33,4647 \text{ W}$$

Η μέγιστη ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$14,59 \mu\text{W} = 14,59 * 10^{-6} \text{ W}$$

Άρα ο βαθμός απόδοσης $\phi/\beta = 100 * [(14,59 * 10^{-6}) \text{ W} / (33,4647) \text{ W}] = 4,36 * 10^{-5}$ ή 0,0000436 %

10.8 Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων

Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (15,2*15,2) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 993 (W / m²).

Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών (I – V) – (0,13 / 51) με μέγιστη ισχύ 6,63 μW και αντίστοιχη τιμή της αντίστασης φορτίου $R = 390 \Omega$. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του ϕ/β είναι 0,0000289%.

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων 15,2*15,2 cm²					
Ηλιακή ακτινοβολία (W/ m ²)	P _{max} (μW)	R⇒ P _{max} (Ω)	I _{βραχ.} (mA)	V _{ανοιχτ.} (mV)	ΑΠΟΔΟΣΗ %
993	6,63	390	≅0,2	≅69,6	0,0000289

Για το νέο φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (15,2*15,2) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 946 (W / m²).

Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών (I – V) – (0,0085 / 0,18) με μέγιστη ισχύ 0,0015 W και αντίστοιχη τιμή της αντίστασης φορτίου R = 21,2 Ω. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του φ/β είναι 0,00686%.

Για το νέο φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων (15,2*15,2) cm² και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 1.104 (W / m²).

Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών (I – V) – (0,0094 / 0,2) με μέγιστη ισχύ 0,0019 W και αντίστοιχη τιμή της αντίστασης φορτίου R = 21,2 Ω. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του φ/β είναι 0,00745%.

Συγκεντρωτικά:

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων 15,2*15,2 cm²					
Ηλιακή ακτινοβολία (W/ m ²)	P _{max} (W)	R⇒ P _{max} (Ω)	I _{βραχ.} (A)	V _{ανοιχτ.} (V)	ΑΠΟΔΟΣΗ %
946	0,0015	21,2	≅0,0098	≅0,62	0,00686
1.104	0,0019	21,2	≅0,0116	≅0,63	0,00745

Για τις δύο διαφορετικές πυκνότητες της ακτινοβολίας 946 W / m² και 1.104 W / m², σχηματίζεται μια οικογένεια μετατοπισμένων καμπύλων έντασης-τάσης.

Είναι φανερό ότι π.χ. για την ακτινοβολία 1.104 W / m² που δίνει I_{sc} = 0,0116 A έχουμε V_m = 0,2 V και I_m = 0,0094 A και επομένως η κατάλληλη αντίσταση του κυκλώματος για να παράγεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς από το φ/β στοιχείο είναι R = 21,2 Ω. Η αντίσταση όμως αυτή βλέπουμε ότι είναι εντελώς ακατάλληλη για την άλλη συνθήκη

ακτινοβολίας, αφού η ευθεία με κλίση $21,2 \Omega$ τέμνει την αντίστοιχη καμπύλη $I - V$ σε σημείο διαφορετικό από το σημείο της μέγιστης ισχύος.

Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων $(11,4*11,4) \text{ cm}^2$ και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας $906 \text{ (W / m}^2\text{)}$.

Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών $(I - V) - (0,17 / 8,7)$ με μέγιστη ισχύ $1,48 \mu\text{W}$ και αντίστοιχη τιμή της αντίστασης φορτίου $R = 51 \Omega$. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του ϕ/β είναι $0,0000126\%$.

Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων $(11,4*11,4) \text{ cm}^2$ και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας $1.179 \text{ (W / m}^2\text{)}$.

Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών $(I - V) - (0,67 / 11,4)$ με μέγιστη ισχύ $7,64 \mu\text{W}$ και αντίστοιχη τιμή της αντίστασης φορτίου $R = 17 \Omega$. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του ϕ/β είναι $0,0000499\%$.

Συγκεντρωτικά:

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $11,4*11,4 \text{ cm}^2$					
Ηλιακή ακτινοβολία (W / m^2)	$P_{\max} (\mu\text{W})$	$R \Rightarrow P_{\max} (\Omega)$	$I_{\beta\text{ρα}\chi.} (\text{mA})$	$V_{\text{ανοιχτ.}} (\text{mV})$	ΑΠΟΔΟΣΗ %
906	1,48	51	$\cong 0,2$	$\cong 13,4$	0,0000126
1.179	7,64	17	$\cong 0,83$	$\cong 19,1$	0,0000499

Για τις δύο διαφορετικές πυκνότητες της ακτινοβολίας 906 W / m^2 και 1.179 W / m^2 , σχηματίζεται μια οικογένεια μετατοπισμένων καμπύλων έντασης-τάσης.

Είναι φανερό ότι π.χ. για την ακτινοβολία 1.179 W / m^2 που δίνει $I_{sc} = 0,83 \text{ mA}$ έχουμε $V_m = 11,4 \text{ mV}$ και $I_m = 0,67 \text{ mA}$ και επομένως η κατάλληλη αντίσταση του κυκλώματος για να παράγεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς από το ϕ/β στοιχείο είναι $R = 17 \Omega$. Η αντίσταση όμως αυτή βλέπουμε ότι είναι εντελώς ακατάλληλη για την άλλη συνθήκη ακτινοβολίας, αφού η ευθεία με κλίση 17Ω τέμνει την αντίστοιχη καμπύλη $I - V$ σε σημείο διαφορετικό από το σημείο της μέγιστης ισχύος.

Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων $15,2*15,2 \text{ cm}^2$ και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 900 W / m^2 .

Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών $(I-V) - (0,36 / 12)$ με μέγιστη ισχύ $4,32 \mu\text{W}$ και αντίστοιχη τιμή της αντίστασης φορτίου $R = 33,5 \Omega$. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του ϕ/β είναι $0,0000208\%$.

Για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαστάσεων $11,4*11,4 \text{ cm}^2$ και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 881 W / m^2 .

Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών $(I-V) - (0,71 / 23,9)$ με μέγιστη ισχύ $16,97 \mu\text{W}$ και αντίστοιχη τιμή της αντίστασης φορτίου $R = 33,5 \Omega$. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του ϕ/β είναι $0,000148\%$.

Για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά και τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 927 W / m^2 .

Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών $(I-V) - (0,66 / 22,1)$ με μέγιστη ισχύ $14,59 \mu\text{W}$ και αντίστοιχη τιμή της αντίστασης φορτίου $R = 33,5 \Omega$. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του ϕ/β είναι $0,0000436\%$.

Συγκεντρωτικά:

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $15,2*15,2 \text{ cm}^2$					
Ηλιακή ακτινοβολία (W / m^2)	$P_{\max} (\mu\text{W})$	$R \Rightarrow P_{\max} (\Omega)$	$I_{\beta\rho\alpha\chi.} (\text{mA})$	$V_{\text{ανοιχτ.}} (\text{mV})$	ΑΠΟΔΟΣΗ %
900	4,32	33,5	$\cong 0,87$	$\cong 19,6$	0,0000208

Πειραματική διάταξη με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $11,4*11,4 \text{ cm}^2$					
Ηλιακή ακτινοβολία (W / m^2)	$P_{\max} (\mu\text{W})$	$R \Rightarrow P_{\max} (\Omega)$	$I_{\beta\rho\alpha\chi.} (\text{mA})$	$V_{\text{ανοιχτ.}} (\text{mV})$	ΑΠΟΔΟΣΗ %
881	16,97	33,5	$\cong 1,06$	$\cong 76,3$	0,000148

Πειραματική διάταξη με δύο φωτοβολταϊκά στοιχεία εν σειρά					
Ηλιακή ακτινοβολία (W / m^2)	$P_{\max} (\mu\text{W})$	$R \Rightarrow P_{\max} (\Omega)$	$I_{\beta\rho\alpha\chi.} (\text{mA})$	$V_{\text{ανοιχτ.}} (\text{mV})$	ΑΠΟΔΟΣΗ %
927	14,59	33,5	$\cong 1,07$	$\cong 101$	0,0000436

10.9 Συμπεράσματα

1^ο) Παρατηρούμε από τα διαγράμματα $I - V$, ότι αν κρατώντας σταθερή την τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αυξήσουμε την τάση, στην αρχή αυξάνεται και το ρεύμα. Από μια τιμή όμως ανοδικής τάσεως και πέρα, το ρεύμα ελάχιστα αυξάνεται με την αύξηση της τάσεως και πρακτικά έχουμε ρεύμα κόρου. Δηλαδή το ρεύμα είναι σχεδόν ανεξάρτητο από την ανοδική τάση.

2^ο) Παρατηρούμε ότι σε κάθε καμπύλη έντασης (I) – τάσης (V) υπάρχει ένα σημείο μέγιστης ισχύος. Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών $I - V$ στο οποίο η τιμή της τάσης είναι ελαφρά μικρότερη από την τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} και η τιμή της έντασης είναι ελαφρά μικρότερη από το ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} . Είναι φανερό ότι για το σημείο μέγιστης ισχύος, το ορθογώνιο που σχηματίζεται έχει το μεγαλύτερο εμβαδόν από όλα τα ορθογώνια που μπορούν να σχηματιστούν για άλλα σημεία.

3^ο) Παρατηρούμε ότι όταν τα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι βραχυκυκλωμένα ($R=0$) ή όταν το κύκλωμα είναι ανοικτό ($R=\infty$) η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μηδέν, αφού στην πρώτη περίπτωση η τάση είναι μηδέν και στη δεύτερη η ένταση του ρεύματος είναι μηδέν.

4^ο) Παρατηρούμε ότι το σχήμα των καμπύλων $I - V$ και $P - V$ που μας προέκυψαν από τις μετρήσεις μας, μοιάζουν με τα διαγράμματα $I - V$ και $P - V$ που δίνουν τα βιβλία για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

5^ο) Παρατηρούμε ότι όταν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι στη σειρά δεν αλλάζει η μορφή της καμπύλης $I - V$ και $P - V$. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στη σύνδεση των δύο φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους καμπύλων που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που συνδέσαμε σε σειρά.

6^ο) Όταν δύο φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται σε σειρά η τάση που αντιστοιχεί στη σύνδεση αυτή είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που συνδέσαμε σε σειρά.

Συγκεκριμένα στην εργασία μας:

Για $I = 0,3 \text{ mA}$ έχουμε τάση 12 mV για το φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(15,2 * 15,2) \text{ cm}^2$, ενώ η τάση για το φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(11,4 * 11,4) \text{ cm}^2$ είναι $53,6 \text{ mV}$ και για τη σύνδεση σε σειρά που έπρεπε να είναι το άθροισμα των 12 mV και $53,6 \text{ mV}$ δηλαδή $65,6 \text{ mV}$, η τάση είναι $60,8 \text{ mV}$. Έχουμε όπως παρατηρούμε μια μικρή απόκλιση $7,9\%$.

7^ο) Στη σύνδεση σε σειρά, η ένταση του ρεύματος παραμένει σταθερή και ίση με την ελάχιστη της επιτρεπόμενης έντασης που διαρρέει κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο της συνδεσμολογίας.

8^ο) Η ισχύς P που παράγεται από τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά, προκύπτει από το γινόμενο της ισοδύναμης έντασης επί την αντίστοιχη τάση της συνδεσμολογίας ($P = V * I$).

9^ο) Κατά την κατασκευή του υποξειδίου του χαλκού πάνω στο μάτι της ηλεκτρικής κουζίνας γενικά δεν υπήρξαν προβλήματα.

Όμως από τα διαγράμματα $I - V$ και $P - V$ της σύνδεσης σε σειρά, παρατηρούμε κάποια παράδοξα σχετικά με τις καμπύλες και μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(15,2 * 15,2) \text{ cm}^2$ πιθανόν δεν είχε επιτυχία στην κατασκευή του. Το γεγονός ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί στο φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(15,2 * 15,2) \text{ cm}^2$ βρίσκεται πολύ χαμηλά σε σχέση με την καμπύλη που αντιστοιχεί στο φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(11,4 * 11,4) \text{ cm}^2$ <ρίχνει> τη συνολική καμπύλη (σε σειρά).

Οι καμπύλες που αντιστοιχούν στο νέο φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(15,2 * 15,2) \text{ cm}^2$ και στο φωτοβολταϊκό στοιχείο διαστάσεων $(11,4 * 11,4) \text{ cm}^2$ δεν παρουσιάζουν προβλήματα και σημαίνει ότι η διαδικασία κατασκευής τους ήταν καλή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ALBERT PAUL MALVINO, Ph.D., <<Βασική Ηλεκτρονική>>, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη (4^η έκδοση).
2. RICHARD C. JAEGER , <<Μικροηλεκτρονική>>, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη (τόμος Α).
3. Α. ΝΕΟΚΛΕΟΥΣ Μ. Sc. και Σ.Π. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗ Μ. Sc., Μ. Ed., <<Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα>>, Εκδόσεις Ιων, 1999.
4. Κ. ΚΑΓΚΑΡΑΚΗ, <<Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία>>, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1992.
5. Α. Κ. ΘΑΝΑΗΛΑΚΗ, <<Φωτοβολταϊκή Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική>>, Αθήνα 1984.
6. Ι. ΒΟΥΡΔΟΥΜΠΙΑΣ, <<Εργαστηριακά πειράματα στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας>> Χανιά 2001.
7. Ι. Κ. ΚΑΛΔΕΛΛΗΣ και Κ. Α. ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ, <<Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας>>, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα 2001.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Φωτογραφική τεκμηρίωση



Εικόνα 1: Φύλλο χαλκού πριν την επεξεργασία



Εικόνα 2: Φύλλο χαλκού μετά την επεξεργασία



Εικόνα 3: Πυρανόμετρο για τη μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας



Εικόνα 4: Πολύμετρο για τη μέτρηση τάσεων και αντιστάσεων



Εικόνα 5: Μεταβλητή ωμική αντίσταση από 0 έως 42 Ω



Εικόνα 6: Διάφορες ωμικές αντιστάσεις , που μερικές απ' αυτές χρησιμοποιήθηκαν



Εικόνα 7: Το ηλιακό κύτταρο διαστάσεων $15,2*15,2 \text{ cm}^2$



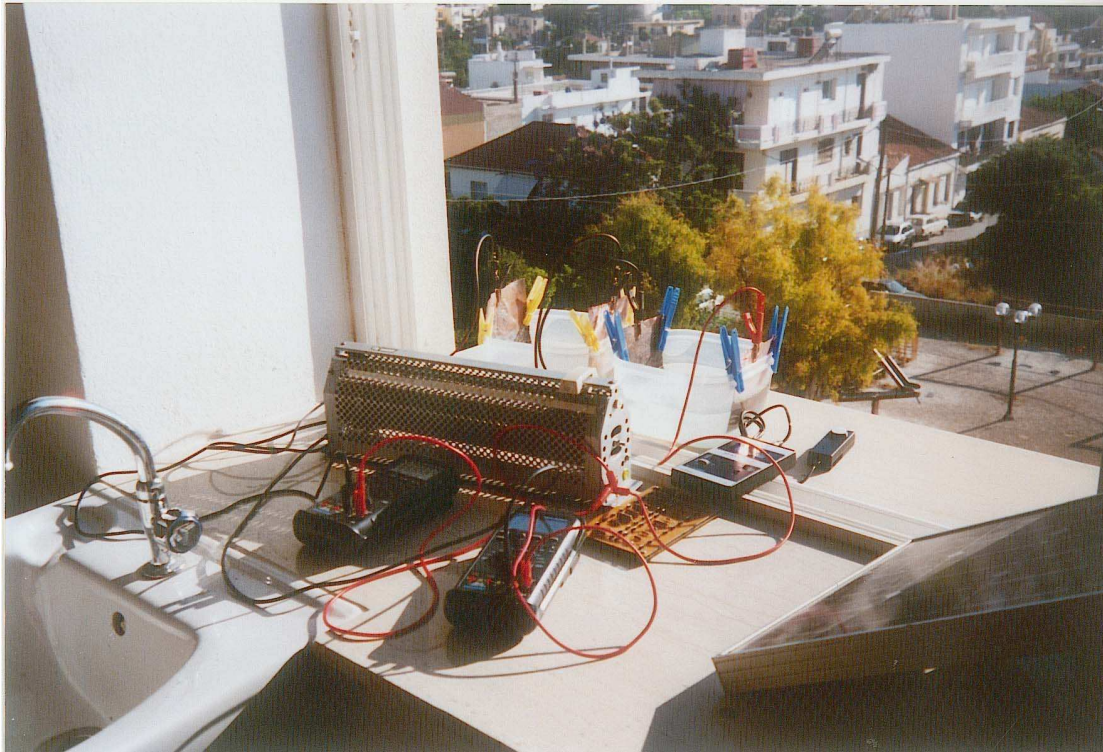
Εικόνα 8: Το ηλιακό κύτταρο διαστάσεων $11,4*11,4 \text{ cm}^2$



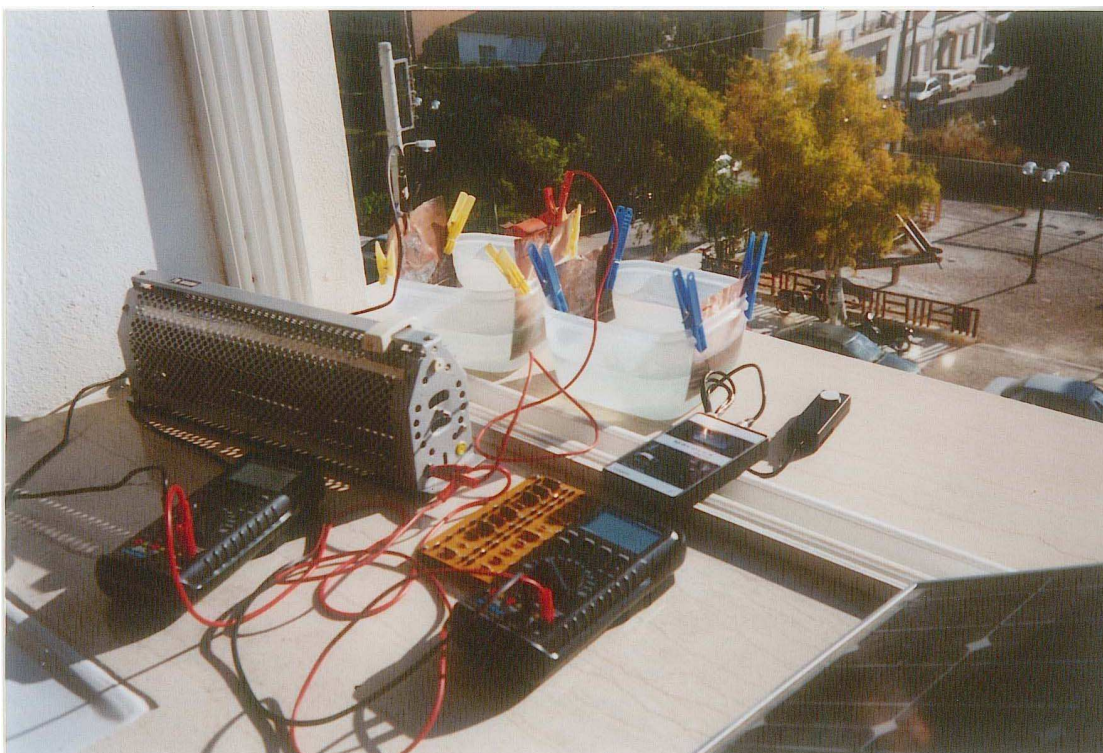
Εικόνα 9: Διάταξη φ/β στοιχείου διαστάσεων $15,2*15,2 \text{ cm}^2$ με γνωστή αντίσταση και μέτρηση της τάσης με τη βοήθεια πολύμετρου



Εικόνα 10: Διάταξη φ/β στοιχείου διαστάσεων $15,2*15,2 \text{ cm}^2$ με μεταβλητή αντίσταση και μέτρηση αυτής και της τάσης με τη βοήθεια πολύμετρου



Εικόνα 11: Πειραματική διάταξη δυο φ/β στοιχείων διαστάσεων $15,2*15,2 \text{ cm}^2$ και $11,4*11,4 \text{ cm}^2$ σε σειρά



Εικόνα 12: Πειραματική διάταξη φ/β στοιχείων

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Επίλυση 2 ασκήσεων

ΑΣΚΗΣΗ 1 <<ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ>>

Αντλία χρησιμοποιείται για την άντληση νερού παροχής $100 \text{ m}^3 / \text{h}$ σε ύψος 15 μέτρων και η ονομαστική της ισχύς είναι 2 KW. Η αντλία λειτουργεί 4 ώρες ημερησίως καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Καλείστε να σχεδιάσετε για την περιοχή σας ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα που θα καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της αντλίας σας όλο το έτος.

Δίδονται:

- A) οι συνθήκες ηλιοφάνειας για την περιοχή σας θα ληφθούν από τους πίνακες
- B) η αντλία λειτουργεί στα 220 V, EP
- Γ) μέγιστος συνεχόμενος αριθμός ημερών χωρίς ηλιοφάνεια 5 ημέρες
- Δ) καταναλισκόμενη ισχύς στον μετατροπέα / ανορθωτή 120W
- E) βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών 14%
- Στ) βαθμός απόδοσης συσσωρευτών 90%
- Z) βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών 60%

Τρόπος εργασίας

Θα σχεδιάσετε το σύστημα για το μήνα του έτους με τη μικρότερη ηλιοφάνεια.

Στη συνέχεια θα υπολογίσετε το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τους άλλους μήνες του έτους όπου η ηλιοφάνεια είναι μεγαλύτερη.

Υπολογίσατε α) την ηλεκτρική ενέργεια που δαπανά ετησίως η αντλία και β) την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του συστήματός σας ετησίως και δεν χρησιμοποιεί η αντλία.

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και της χωρητικότητας των συσσωρευτών θα κάνετε υπερδιαστασιολόγηση 30%.

Συγκρίνατε δυο τέτοια συστήματα για μια πόλη της Κρήτης και μια πόλη της βορείου Ελλάδας.

Υπολογίστε το λόγο – Ηλεκτρική ενέργεια που καταναλίσκει η αντλία ετησίως προς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ετησίως (και για τις δύο πόλεις).

Ενδεικτικά δίδονται:

Πόλη

Χανιά

Σέρρες

Για κλίση 30° ως προς το οριζόντιο επίπεδο

Μήνας	Ηλιακή ακτινοβολία (KWH/M ²)	
Ιανουάριος	83	72
Φεβρουάριος	97	81
Μάρτιος	128	115
Απρίλιος	152	136
Μάιος	183	163
Ιούνιος	191	170
Ιούλιος	208	184
Αύγουστος	207	181
Σεπτέμβριος	172	149
Οκτώβριος	127	116
Νοέμβριος	107	86
Δεκέμβριος	83	74

ΛΥΣΗ:

Ερώτημα α)

Η ηλεκτρική ενέργεια που δαπανά η αντλία ετησίως είναι:

$$E_{\text{καταναλώνει}} = P * t$$

όπου P η ονομαστική ισχύς της αντλίας σε KW και t οι ώρες λειτουργίας της αντλίας σε h / έτος

Η αντλία όμως λειτουργεί 4h / ημέρα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους επομένως λειτουργεί:
4h / ημέρα * 365 ημέρες = 1.460 h το χρόνο.

Η ονομαστική ισχύς της αντλίας είναι 2 KW, επομένως:

$$E_{\text{καταναλώνει}} = 2 \text{ KW} * 1.460 \text{ h} / \text{έτος} = \underline{2.920 \text{ KWh} / \text{έτος}}$$

Στα Χανιά :

Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα :

Ιανουάριο : $83(\text{KWh} / \text{m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 2,68 \text{ KWh} / (\text{m}^2 * \text{ημέρα})$

Φεβρουάριο : $97 (\text{KWh} / \text{m}^2) / 28 \text{ ημέρες} = 3,46 \text{ KWh} / (\text{m}^2 * \text{ημέρα})$

Μάρτιο : $128 (\text{KWh} / \text{m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 4,13 \text{ KWh} / (\text{m}^2 * \text{ημέρα})$

Απρίλιο : $152 (\text{KWh} / \text{m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 5,07 \text{ KWh} / (\text{m}^2 * \text{ημέρα})$

Μάϊο : $183 (\text{KWh} / \text{m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 5,90 \text{ KWh} / (\text{m}^2 * \text{ημέρα})$

Ιούνιο : $191 (\text{KWh} / \text{m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 6,37 \text{ KWh} / (\text{m}^2 * \text{ημέρα})$

Ιούλιο : $208 (\text{KWh} / \text{m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 6,71 \text{ KWh} / (\text{m}^2 * \text{ημέρα})$

Αύγουστο : $207 (\text{KWh} / \text{m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 6,68 \text{ KWh} / (\text{m}^2 * \text{ημέρα})$

Σεπτέμβριο : $172 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 5,73 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Οκτώβριο : $127 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 4,10 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Νοέμβριο : $107 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 3,57 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Δεκέμβριο : $83 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 2,68 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Στις Σέρρες :

Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα :

Ιανουάριο : $72 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 2,32 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Φεβρουάριο : $81 \text{ (KWh / m}^2) / 28 \text{ ημέρες} = 2,89 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Μάρτιο : $115 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 3,71 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Απρίλιο : $136 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 4,53 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Μάιο : $163 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 5,26 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Ιούνιο : $170 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 5,67 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Ιούλιο : $184 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 5,94 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Αύγουστο : $181 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 5,84 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Σεπτέμβριο : $149 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 4,97 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Οκτώβριο : $116 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 3,74 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Νοέμβριο : $86 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 2,87 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Δεκέμβριο : $74 \text{ (KWh / m}^2\text{)} / 31 \text{ ημέρες} = 2,39 \text{ KWh / (m}^2 \text{ * ημέρα)}$

ΣΥΣΚΕΥΗ	ΙΣΧΥΣ (KW)	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (h)	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (KWh / ημέρα)
Αντλία	2	4	8
Μετατροπέα / Ανορθωτή	0,12	4	0,48
ΣΥΝΟΛΟ	2,12	4	8,48

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΗΝΑ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ (ΔΗΛΑΔΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΗΝΑ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟ)

Υπολογισμός της επιφάνειας των φ / β πλαισίων :

$$E = \Pi * A * n \Rightarrow A = E / (\Pi * n) \text{ (m}^2\text{)}$$

Όπου A : εμβαδόν Φ / Β σε m²

E : ηλεκτρική ενέργεια σε KWh

Π : πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε KWh / M²

n : βαθμός απόδοσης Φ / Β (αδιάστατο μέγεθος)

Τα Φ / Β στοιχεία με βαθμό απόδοσης 14%, τοποθετημένα στα Χανιά με κλίση 30°, όπου τον Ιανουάριο αντιστοιχεί ηλιακή ακτινοβολία 83 KWh / m². Δηλαδή η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα Ιανουάριο είναι $83(\text{KWh / m}^2) / 31 = 2,68 \text{ KWh / m}^2$.

Βρίσκουμε ότι η επιφάνεια των φ / β στοιχείων που απαιτούνται για τη κάλυψη της ημερήσιας κατανάλωσης των 8,48 KWh είναι:

$$A = 8,48 \text{ (KWh / ημέρα)} / [2,68 \text{ (KWh / m}^2\text{* ημέρα)} * 0,14] = \underline{22,60 \text{ m}^2}$$

Ενώ τοποθετημένα στις Σέρρες, όπου τον Ιανουάριο αντιστοιχεί ηλιακή ακτινοβολία 72 KWh / m². . Δηλαδή η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα Ιανουάριο είναι 72 (KWh / m²) / 31 = 2,32 KWh / m².

Βρίσκουμε ότι η επιφάνεια των φ / β στοιχείων που απαιτούνται για τη κάλυψη της ημερήσιας κατανάλωσης των 8,48 KWh είναι:

$$A = 8,48 \text{ (KWh / ημέρα)} / [2,32 \text{ (KWh / m}^2 \text{ * ημέρα)} * 0,14] = \underline{26,11 \text{ m}^2}.$$

Κάνουμε υπερδιαστολόγηση 30% της επιφάνειας των φ / β πλαισίων, επομένως:

$$\text{Για τα Χανιά} \quad A = 22,60 * 1,3 = 29,38 \text{ m}^2.$$

$$\text{Για τις Σέρρες} \quad A = 26,11 * 1,3 = 33,94 \text{ m}^2.$$

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν τα Φ / Β στοιχεία με βαθμό απόδοσης n και συνολική επιφάνεια A (m²), όταν δεχτούν μια πυκνότητα ακτινοβολίας Π (KWh / m²) είναι :

$$E = \Pi * A * n \text{ (KWh)}$$

$$\underline{\text{Για τα Χανιά}} \text{ έχουμε} \quad A = 29,38 \text{ m}^2$$

$$n = 0,14$$

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται τον μήνα :

$$\text{Ιανουάριο :} \quad 83 \text{ (KWh / m}^2 \text{)} * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 341,40 \text{ KWh}$$

$$\text{Φεβρουάριο :} \quad 97 \text{ (KWh / m}^2 \text{)} * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 398,98 \text{ KWh}$$

$$\text{Μάρτιο :} \quad 128 \text{ (KWh / m}^2 \text{)} * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 526,49 \text{ KWh}$$

$$\text{Απρίλιο :} \quad 152 \text{ (KWh / m}^2 \text{)} * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 625,21 \text{ KWh}$$

$$\text{Μάιο :} \quad 183 \text{ (KWh / m}^2 \text{)} * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 752,72 \text{ KWh}$$

$$\text{Ιούνιο :} \quad 191 \text{ (KWh / m}^2 \text{)} * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 785,62 \text{ KWh}$$

Ιούλιο :	$208 \text{ (KWh / m}^2) * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 855,54 \text{ KWh}$
Αύγουστο :	$207 \text{ (KWh / m}^2) * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 851,43 \text{ KWh}$
Σεπτέμβριο :	$172 \text{ (KWh / m}^2) * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 707,47 \text{ KWh}$
Οκτώβριο :	$127 \text{ (KWh / m}^2) * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 522,38 \text{ KWh}$
Νοέμβριο :	$107 \text{ (KWh / m}^2) * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 440,11 \text{ KWh}$
Δεκέμβριο :	$83 \text{ (KWh / m}^2) * 29,38 \text{ m}^2 * 0,14 = 341,40 \text{ KWh}$

Για τις Σέρρες έχουμε $A = 33,94 \text{ m}^2$
 $n = 0,14$

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται τον μήνα :

Ιανουάριο :	$72 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 342,12 \text{ KWh}$
Φεβρουάριο :	$81 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 384,88 \text{ KWh}$
Μάρτιο :	$115 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 546,43 \text{ KWh}$
Απρίλιο :	$136 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 646,22 \text{ KWh}$
Μάιο :	$163 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 774,51 \text{ KWh}$
Ιούνιο :	$170 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 807,77 \text{ KWh}$
Ιούλιο :	$184 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 874,29 \text{ KWh}$
Αύγουστο :	$181 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 860,04 \text{ KWh}$
Σεπτέμβριο :	$149 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 707,99 \text{ KWh}$

Οκτώβριο : $116 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 551,18 \text{ KWh}$

Νοέμβριο : $86 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 408,64 \text{ KWh}$

Δεκέμβριο : $74 \text{ (KWh / m}^2) * 33,94 \text{ m}^2 * 0,14 = 351,62 \text{ KWh}$

Η ενέργεια που καταναλώνεται τον μήνα :

Ιανουάριο : $8,48 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 341,74 \text{ KWh}$

Φεβρουάριο : $8,48 \text{ KWh} * 28 \text{ ημέρες} * 1,3 = 308,67 \text{ KWh}$

Μάρτιο : $8,48 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 341,74 \text{ KWh}$

Απρίλιο : $8,48 \text{ KWh} * 30 \text{ ημέρες} * 1,3 = 330,72 \text{ KWh}$

Μάιο : $8,48 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 341,74 \text{ KWh}$

Ιούνιο : $8,48 \text{ KWh} * 30 \text{ ημέρες} * 1,3 = 330,72 \text{ KWh}$

Ιούλιο : $8,48 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 341,74 \text{ KWh}$

Αύγουστο : $8,48 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 341,74 \text{ KWh}$

Σεπτέμβριο : $8,48 \text{ KWh} * 30 \text{ ημέρες} * 1,3 = 330,72 \text{ KWh}$

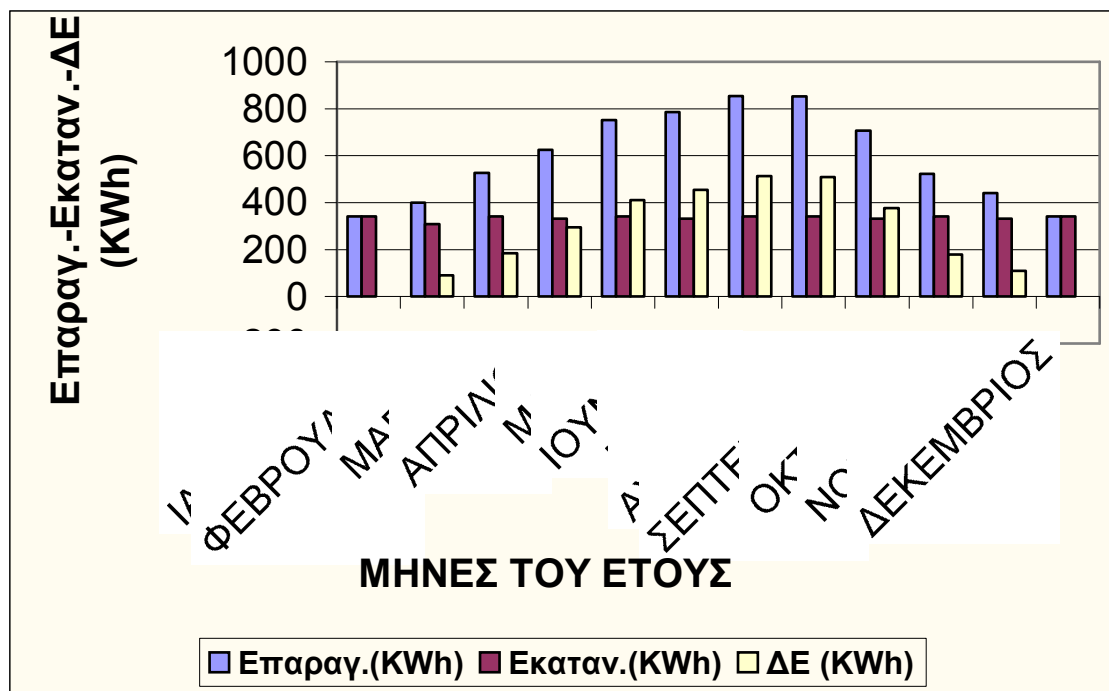
Οκτώβριο : $8,48 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 341,74 \text{ KWh}$

Νοέμβριο : $8,48 \text{ KWh} * 30 \text{ ημέρες} * 1,3 = 330,72 \text{ KWh}$

Δεκέμβριο : $8,48 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 341,74 \text{ KWh}$

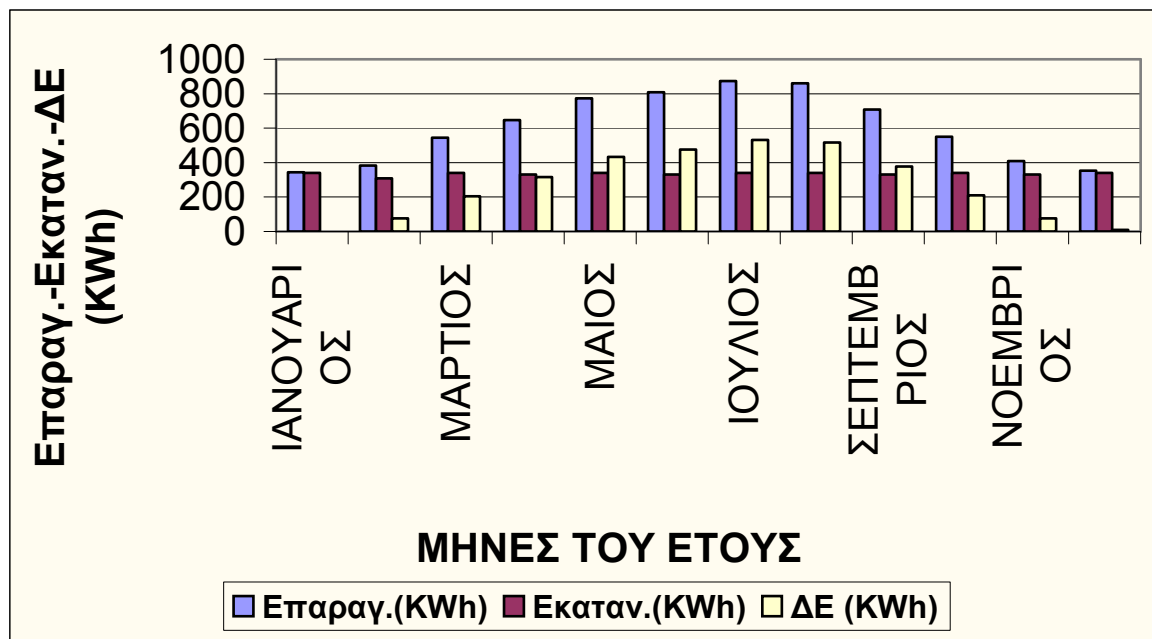
ΧΑΝΙΑ

ΜΗΝΑΣ	Παραγόμενη ενέργεια (KWh)	Καταναλισκόμενη ενέργεια (KWh)	Περίσσειμα ενέργειας $\Delta E = E_{\text{παραγ.}} - E_{\text{καταν.}}$ (KWh)
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	341,40	341,74	-0,34
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	398,98	308,67	90,31
ΜΑΡΤΙΟΣ	526,49	341,74	184,75
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	625,21	330,72	294,49
ΜΑΪΟΣ	752,72	341,74	410,98
ΙΟΥΝΙΟΣ	785,62	330,72	454,9
ΙΟΥΛΙΟΣ	855,54	341,74	513,8
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	851,43	341,74	509,69
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	707,47	330,72	376,75
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	522,38	341,74	180,64
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	440,11	330,72	109,39
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	341,40	341,74	-0,34
ΕΤΗΣΙΑ ⇒	7148,75	4023,73	3125,02



ΣΕΡΡΕΣ

ΜΗΝΑΣ	Παραγόμενη ενέργεια (KWh)	Καταναλισκόμενη ενέργεια (KWh)	Περίσσεια ενέργειας $\Delta E = E_{\text{παραγ.}} - E_{\text{καταν.}}$ (KWh)
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	342,12	341,74	0,38
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	384,88	308,67	76,21
ΜΑΡΤΙΟΣ	546,43	341,74	204,69
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	646,22	330,72	315,5
ΜΑΪΟΣ	774,51	341,74	432,77
ΙΟΥΝΙΟΣ	807,77	330,72	477,05
ΙΟΥΛΙΟΣ	874,29	341,74	532,55
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	860,04	341,74	518,3
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	707,99	330,72	377,27
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	551,18	341,74	209,44
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	408,64	330,72	77,92
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	351,62	341,74	9,88
ΕΤΗΣΙΑ ⇒	7255,69	4023,73	3231,96



- Υπολογισμός λόγου – Ηλεκτρική ενέργεια που καταναλίσκει η αντλία ετησίως προς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φ/ β πλαίσια ετησίως (και για τις 2 πόλεις).

Για τα Χανιά : $(2920 \text{ KWh} / \text{έτος} * 1,3) / (7148,75 \text{ KWh} / \text{έτος}) = 0,53$

Για τις Σέρρες : $(2920 \text{ KWh} / \text{έτος} * 1,3) / (7255,69 \text{ KWh} / \text{έτος}) = 0,52$

Ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση $8,48 \text{ KWh} / \text{ημέρα} * 1,3 = 11,024 \text{ KWh} / \text{ημέρα}$

Αυτή την ενέργεια θα πρέπει να την καλύψω για αυτονομία 5 ημερών με τις μπαταρίες.

Άρα οι μπαταρίες θα πρέπει να δίνουν ενέργεια :

$$E_{\text{bat}} = 11,024 (\text{KWh} / \text{ημέρα}) * 5 \text{ ημέρες} \Rightarrow E_{\text{bat}} = 55,12 \text{ KWh} \text{ ή } E_{\text{bat}} = 55.120 \text{ Wh}$$

Η ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών θα πρέπει να είναι :

$$C_N = E / (\alpha * \beta * V) = 55120 \text{ Wh} / (0,9 * 0,6 * 12\text{V}) = 8506 \text{ Ah}$$

Η ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα C είναι :

$$C = \beta * C_N \Rightarrow C = 0,6 * 8506 \text{ Ah} \Rightarrow C = 5104 \text{ Ah}$$

Η ισχύς που μπορούν να δίνουν οι συσσωρευτές μας επί το παραπάνω μέγιστο διάστημα των 5 διαδοχικών ημερών είναι περίπου :

$$P = (C * \alpha * V) / (24 * \mu) = (5104 \text{ Ah} * 0,9 * 12\text{V}) / [24 (\text{h} / \text{ημέρα}) * 5 \text{ ημέρες}] = 459,36 \text{ W}$$

Όπου:

E : ηλεκτρική ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν οι συσσωρευτές

α : βαθμός απόδοσης των συσσωρευτών

β : βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών

C_N : ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών

C : ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα των συσσωρευτών

P : ισχύς που δίνουν οι συσσωρευτές

V : η τάση των συσσωρευτών

ΑΣΚΗΣΗ 2

Μια καλοκαιρινή εξοχική κατοικία έχει κατανάλωση στα 12 V Σ.Ρ. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται , τα χαρακτηριστικά τους και οι ώρες λειτουργίας τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

ΣΥΣΚΕΥΕΣ	ΙΣΧΥΣ	ΩΡΕΣ / ΗΜΕΡΑ
1 ΨΥΓΕΙΟ	48 W	10
3 ΦΩΤΙΣΤΙΚΑ	48 W / έκαστο	6
1 ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ	12 W	4

Ο μέγιστος συνεχόμενος αριθμός ημερών χωρίς ηλιοφάνεια 3 ημέρες

Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών 14 %

Βαθμός απόδοσης συσσωρευτών 90 %

Βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών 60 %

Καλούμαστε να σχεδιάσουμε για τα Χανιά και την Κομοτηνή ένα αυτόνομο φ/ β σύστημα που θα καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της κατοικίας τους 5 μήνες του έτους Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο.

Δίδονται:

A) οι συνθήκες ηλιοφάνειας για την περιοχή σας θα ληφθούν από τους πίνακες

B) η αντλία λειτουργεί στα 220 V, EP

Γ) μέγιστος συνεχόμενος αριθμός ημερών χωρίς ηλιοφάνεια 3 ημέρες

Δ) καταναλισκόμενη ισχύς στον μετατροπέα / ανορθωτή 120W

E) βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών 14%

Στ) βαθμός απόδοσης συσσωρευτών 90%

Z) βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών 60%

Τρόπος εργασίας

Θα σχεδιάσετε το σύστημα για το μήνα του έτους με τη μικρότερη ηλιοφάνεια.

Στη συνέχεια θα υπολογίσετε το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τους άλλους μήνες όπου η ηλιοφάνεια είναι μεγαλύτερη.

Υπολογίσατε α) την ηλεκτρική ενέργεια που δαπανούν τους 5 μήνες οι συσκευές και β) την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του συστήματός σας τους 5 μήνες και δεν χρησιμοποιούν οι συσκευές.

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και της χωρητικότητας των συσσωρευτών θα κάνετε υπερδιαστασιολόγηση 30%.

Συγκρίνατε δυο τέτοια συστήματα για μια πόλη της Κρήτης και μια πόλη της βορείου Ελλάδας.

Υπολογίστε το λόγο – Ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν οι συσκευές στους 5 μήνες προς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στους 5 μήνες (και για τις δύο πόλεις).

Ενδεικτικά δίδονται:

Πόλη	Χανιά	Κομοτηνή
	Για κλίση 30° ως προς το οριζόντιο επίπεδο	
Μήνας	Ηλιακή ακτινοβολία (KWH/M ²)	
Μάιος	183	158

Ιούνιος	191	168
Ιούλιος	208	182
Αύγουστος	207	180
Σεπτέμβριος	172	150

ΛΥΣΗ:

Ερώτημα α)

Η ηλεκτρική ενέργεια που δαπανούν οι συσκευές στους 5 μήνες είναι:

$E_{\text{καταναλώνει}} = P * t$, όπου P η ονομαστική ισχύς των συσκευών σε KW και t οι ώρες λειτουργίας τους σε h / 5μηνο

Καθ' όλη τη διάρκεια των 5 μηνών

-Το ψυγείο λειτουργεί 10h / ημέρα
 $10\text{h} / \text{ημέρα} * 153 \text{ ημέρες} = 1.530 \text{ h}$

-Τα 3 φωτιστικά λειτουργούν 6h / ημέρα
 $6\text{h} / \text{ημέρα} * 153 \text{ ημέρες} = 918 \text{ h}$

-Η τηλεόραση λειτουργεί 4h / ημέρα
 $4\text{h} / \text{ημέρα} * 153 \text{ ημέρες} = 612 \text{ h}$

Το ψυγείο έχει ονομαστική ισχύ 48 W άρα $E_{\text{καταναλώνει}} = 48 \text{ W} * 1530 \text{ (h / 5μηνο)} = 73.440$
(WWh / 5μηνο)

Τα 3 φωτιστικά έχουν ονομαστική ισχύ 144 W άρα $E_{\text{καταναλώνει}} = 144 \text{ W} * 918 \text{ (h / 5μηνο)}$
 $= 132.192 \text{ (Wh / 5μηνο)}$

Η τηλεόραση έχει ονομαστική ισχύ 12 W άρα $E_{\text{καταναλώνει}} = 12 \text{ W} * 612 \text{ (h / 5μηνο)} = 7.344$
(WWh / 5μηνο)

Η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που δαπανούν οι συσκευές στους 5 μήνες είναι:

$$E_{\text{καταναλώνει}} = (73.440+132.192+7.344) \text{ (Wh / 5μηνο)} = 212.976 \text{ (Wh / 5μηνο)} \text{ ή } 212,976 \text{ (KWh / 5μηνο)}$$

Στα Χανιά :

Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα :

Μάϊο : $183 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 5,90 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Ιούνιο : $191 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 6,37 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Ιούλιο : $208 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 6,71 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Αύγουστο : $207 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 6,68 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Σεπτέμβριο : $172 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 5,73 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Στην Κομοτηνή :

Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα :

Μάϊο : $158 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 5,10 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Ιούνιο : $168 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 5,6 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Ιούλιο : $182 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 5,87 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Αύγουστο : $180 \text{ (KWh / m}^2) / 31 \text{ ημέρες} = 5,81 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

Σεπτέμβριο : $150 \text{ (KWh / m}^2) / 30 \text{ ημέρες} = 5 \text{ KWh / (m}^2 * \text{ ημέρα)}$

ΣΥΣΚΕΥΗ	ΙΣΧΥΣ (W)	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (h)	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (Wh / ημέρα)
ΨΥΓΕΙΟ	48 W	10 h	480
ΦΩΤΙΣΤΙΚΑ	48W/έκαστο άρα 48*3=144 W	6 h	864
ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ	12 W	4 h	48
ΣΥΝΟΛΟ	204 W		1392 ή 1,392 KWh/ ημέρα

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΗΝΑ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ (ΔΗΛΑΔΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΗΝΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟ)

Υπολογισμός της επιφάνειας των φ / β πλαισίων :

$$E = \Pi * A * n \Rightarrow A = E / (\Pi * n) \quad (m^2)$$

Όπου A : εμβαδόν Φ / Β σε m²

E : ηλεκτρική ενέργεια σε KWh

Π : πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε KWh / M²

n : βαθμός απόδοσης Φ / Β (αδιάστατο μέγεθος)

Τα Φ / Β στοιχεία με βαθμό απόδοσης 14%, τοποθετημένα στα Χανιά με κλίση 30°, όπου το Σεπτέμβριο αντιστοιχεί ηλιακή ακτινοβολία 172 KWh / m². Δηλαδή η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα Σεπτέμβριο είναι 172 (KWh / m²) / 30 = 5,73 KWh / m².

Βρίσκουμε ότι η επιφάνεια των φ / β στοιχείων που απαιτούνται για τη κάλυψη της ημερήσιας κατανάλωσης των 1,392 KWh είναι:

$$A = 1,392 \text{ (KWh / ημέρα)} / [5,73 \text{ (KWh / m}^2 \text{ * ημέρα)} * 0,14] = \underline{1,74 \text{ m}^2}$$

Ενώ τοποθετημένα στην Κομοτηνή, όπου το Σεπτέμβριο αντιστοιχεί ηλιακή ακτινοβολία $150 \text{ KWh} / \text{m}^2$. . Δηλαδή η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα Σεπτέμβριο είναι $150 (\text{KWh} / \text{m}^2) / 30 = 5 \text{ KWh} / \text{m}^2$.

Βρίσκουμε ότι η επιφάνεια των ϕ / β στοιχείων που απαιτούνται για τη κάλυψη της ημερήσιας κατανάλωσης των $1,392 \text{ KWh}$ είναι:

$$A = 1,392 (\text{KWh} / \text{ημέρα}) / [5 (\text{KWh} / \text{m}^2 * \text{ημέρα}) * 0,14] = \underline{1,99 \text{ m}^2}$$

Κάνουμε υπερδιαστολόγηση 30% της επιφάνειας των ϕ / β πλαισίων, επομένως :

Για τα Χανιά $A = 1,74 * 1,3 = 2,26 \text{ m}^2$.

Για την Κομοτηνή $A = 1,99 * 1,3 = 2,59 \text{ m}^2$.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν τα Φ / β στοιχεία με βαθμό απόδοσης n και συνολική επιφάνεια $A (\text{m}^2)$, όταν δεχτούν μια πυκνότητα ακτινοβολίας $\Pi (\text{KWh} / \text{m}^2)$ είναι :

$$E = \Pi * A * n (\text{KWh})$$

Για τα Χανιά έχουμε $A = 2,26 \text{ m}^2$

$$n = 0,14$$

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται τον μήνα :

Μάιο : $183 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,26 \text{ m}^2 * 0,14 = 57,90 \text{ KWh}$

Ιούνιο : $191 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,26 \text{ m}^2 * 0,14 = 60,43 \text{ KWh}$

Ιούλιο : $208 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,26 \text{ m}^2 * 0,14 = 65,81 \text{ KWh}$

Αύγουστο : $207 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,26 \text{ m}^2 * 0,14 = 65,49 \text{ KWh}$

Σεπτέμβριο : $172 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,26 \text{ m}^2 * 0,14 = 54,42 \text{ KWh}$

Για την Κομοτηνή έχουμε $A = 2,59 \text{ m}^2$

$$n = 0,14$$

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται τον μήνα :

Μάιο : $158 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,59 \text{ m}^2 * 0,14 = 57,29 \text{ KWh}$

Ιούνιο : $168 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,59 \text{ m}^2 * 0,14 = 60,92 \text{ KWh}$

Ιούλιο : $182 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,59 \text{ m}^2 * 0,14 = 65,99 \text{ KWh}$

Αύγουστο : $180 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,59 \text{ m}^2 * 0,14 = 65,27 \text{ KWh}$

Σεπτέμβριο : $150 (\text{KWh} / \text{m}^2) * 2,59 \text{ m}^2 * 0,14 = 54,39 \text{ KWh}$

Η ενέργεια που καταναλώνεται τον μήνα :

Μάιο : $1,392 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 56,10 \text{ KWh}$

Ιούνιο : $1,392 \text{ KWh} * 30 \text{ ημέρες} * 1,3 = 54,29 \text{ KWh}$

Ιούλιο : $1,392 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 56,10 \text{ KWh}$

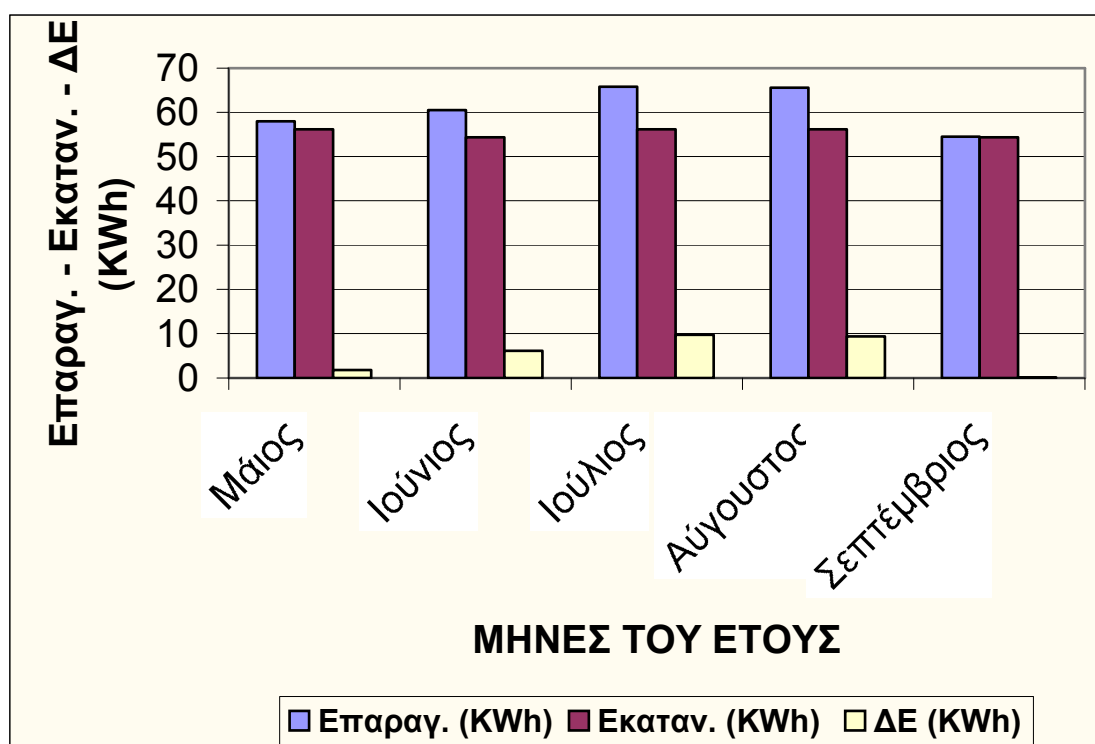
Αύγουστο : $1,392 \text{ KWh} * 31 \text{ ημέρες} * 1,3 = 56,10 \text{ KWh}$

Σεπτέμβριο : $1,392 \text{ KWh} * 30 \text{ ημέρες} * 1,3 = 54,29 \text{ KWh}$

ΧΑΝΙΑ

ΜΗΝΑΣ	Παραγόμενη ενέργεια (KWh)	Καταναλισκόμενη ενέργεια (KWh)	Περίσσειμα ενέργειας $\Delta E = E_{\text{παραγ.}} -$
--------------	--------------------------------------	---	---

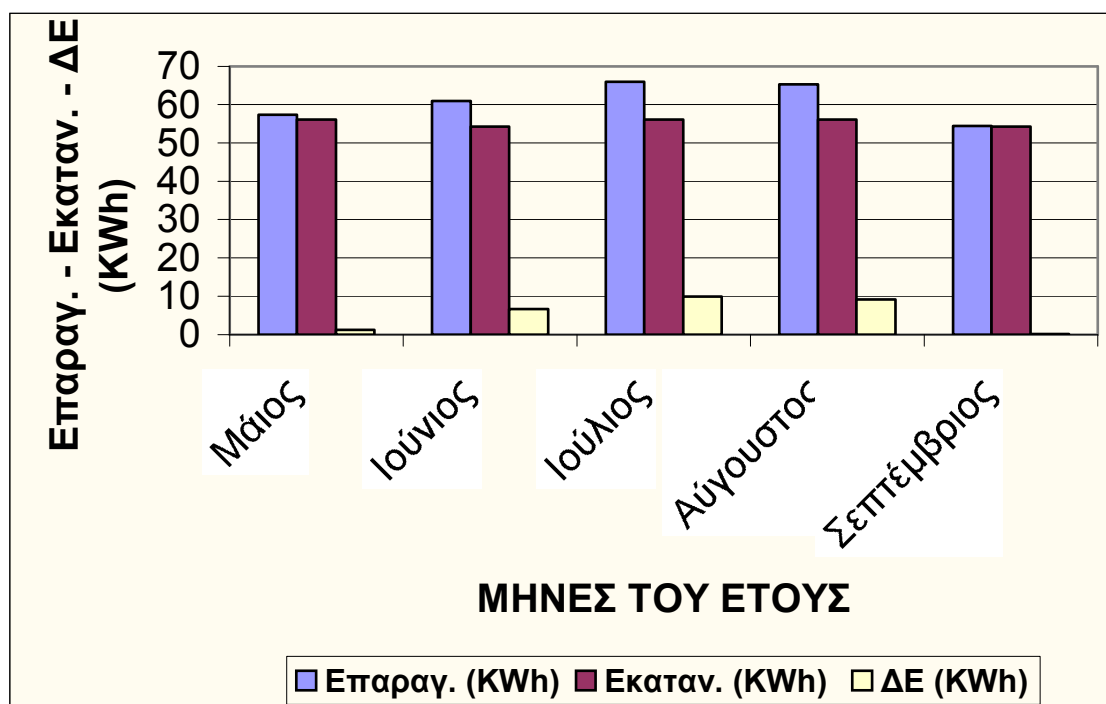
			Εκαταν. (KWh)
ΜΑΪΟΣ	57,90	56,10	1,8
ΙΟΥΝΙΟΣ	60,43	54,29	6,14
ΙΟΥΛΙΟΣ	65,81	56,10	9,71
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	65,49	56,10	9,39
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	54,42	54,29	0,13
ΣΥΝΟΛΟ	304,05	276,88	27,17



ΚΟΜΟΤΗΝΗ

ΜΗΝΑΣ	Παραγόμενη ενέργεια (KWh)	Καταναλισκόμενη ενέργεια (KWh)	Περίσσευμα ενέργειας $\Delta E = E_{\text{παραγ.}} - E_{\text{καταν.}}$ (KWh)
ΜΑΪΟΣ	57,29	56,10	1,19
ΙΟΥΝΙΟΣ	60,92	54,29	6,63
ΙΟΥΛΙΟΣ	65,99	56,10	9,89

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	65,27	56,10	9,17
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	54,39	54,29	0,1
ΣΥΝΟΛΟ	303,86	276,88	26,98



- Υπολογισμός λόγου – Ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν οι συσκευές στους 5 μήνες προς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φ/ β πλαίσια στους 5 μήνες (και για τις 2 πόλεις).

Για τα Χανιά : $(276,88 \text{ KWh} / 5\mu\eta\nu\omicron) / (304,05 \text{ KWh} / 5\mu\eta\nu\omicron) = 0,9106$

Για την Κομοτηνή : $(276,88 \text{ KWh} / 5\mu\eta\nu\omicron) / (303,86 \text{ KWh} / 5\mu\eta\nu\omicron) = 0,9112$

Ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση $1,392 \text{ KWh} / \eta\mu\epsilon\rho\alpha * 1,3 = 1,8096 \text{ KWh} / \eta\mu\epsilon\rho\alpha$
 Αυτή την ενέργεια θα πρέπει να την καλύψω για αυτονομία 3 ημερών με τις μπαταρίες.
 Άρα οι μπαταρίες θα πρέπει να δίνουν ενέργεια :

$$E_{\text{bat}} = 1,8096 (\text{KWh} / \eta\mu\epsilon\rho\alpha) * 3 \eta\mu\epsilon\rho\epsilon\varsigma \Rightarrow E_{\text{bat}} = 5,4288 \text{ KWh} \quad \eta \quad E_{\text{bat}} = 5428,8 \text{ Wh}$$

Η ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών θα πρέπει να είναι :

$$C_N = E / (\alpha * \beta * V) = 5428,8 \text{ Wh} / (0,9 * 0,6 * 12\text{V}) = 838 \text{ Ah}$$

Η ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα C είναι :

$$C = \beta * C_N \Rightarrow C = 0,6 * 838 \text{ Ah} \Rightarrow C = 503 \text{ Ah}$$

Η ισχύς που μπορούν να δίνουν οι συσσωρευτές μας επί το παραπάνω μέγιστο διάστημα των 3 διαδοχικών ημερών είναι περίπου:

$$P = (C * \alpha * V) / (24 * \mu) = (503 \text{ Ah} * 0,9 * 12\text{V}) / [24 (\text{h} / \text{ημέρα}) * 3 \text{ ημέρες}] = 75,45 \text{ W}$$

Όπου:

E : ηλεκτρική ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν οι συσσωρευτές

α : βαθμός απόδοσης των συσσωρευτών

β : βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών

C_N : ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών

C : ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα των συσσωρευτών

P : ισχύς που δίνουν οι συσσωρευτές

V : η τάση των συσσωρευτών