

Αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

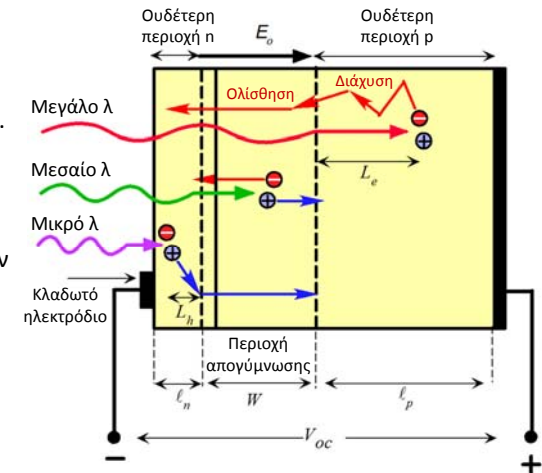
Δ. Γ. Παπαγεωργίου
Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

dparageo@cc.uoi.gr
<http://pc164.materials.uoi.gr/dparageo>

1

Τι είναι ένα ηλιακό κύτταρο

- Επαφή pn^+ , με λεπτή ($\sim 0.2\mu\text{m}$) και έντονα νοθευμένη περιοχή n .
- Μεγάλη περιοχή p ($\sim 200\mu\text{m}$).
- Η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται κυρίως στην πλευρά p .
- Η έκθεση σε φως γίνεται στην πλευρά n όπου προστίθεται μια αντιανακλαστική επιφάνεια έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απορρόφηση φωτός.
- Η εισερχόμενη ακτινοβολία δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών (ΖΗΟ).



Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

2

Αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

Τι είναι ένα ηλιακό κύτταρο

- Τα ηλεκτρόδια στην πλευρά n δεν πρέπει να περιορίζουν την έκθεση στο φως, αλλά ούτε να παρουσιάζουν αντίσταση στο παραγόμενο ρεύμα.



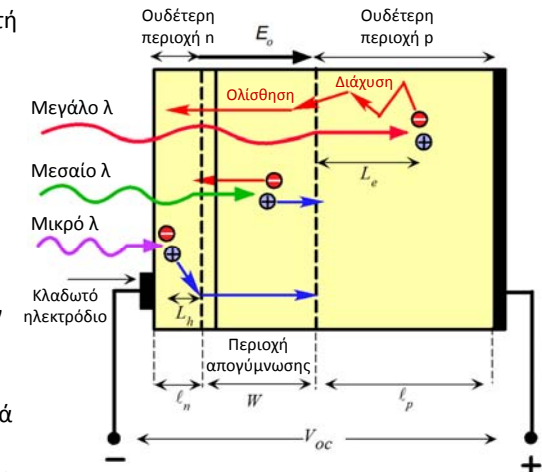
Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

3

Αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

Τάση ανοιχτού κυκλώματος

- Επειδή η πλευρά n είναι λεπτή η απορρόφηση γίνεται κατά κύριο λόγο στην περιοχή απογύμνωσης και στην ουδέτερη περιοχή p .
- Τα ΖΗΟ που δημιουργούνται στην περιοχή απογύμνωσης διαχωρίζονται από το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.
- Η οπές ολισθαίνουν προς την πλευρά p και τα ηλεκτρόνια προς την πλευρά n .
- Η ουδέτερη περιοχή p αποκτά επιπλέον θετικό φορτίο και η ουδέτερη περιοχή n επιπλέον αρνητικό φορτίο.
- Δημιουργείται έτσι μια τάση **ανοιχτού κυκλώματος** V_{oc}



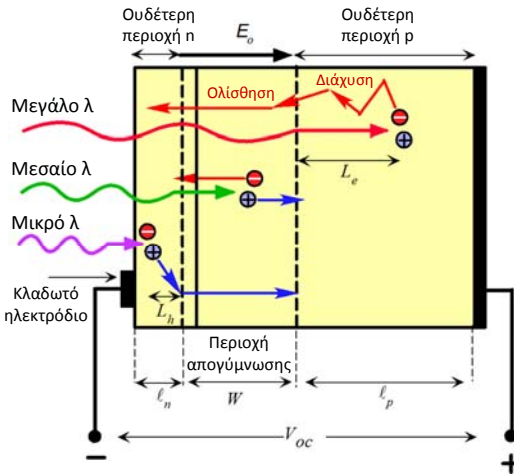
Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

4

Αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

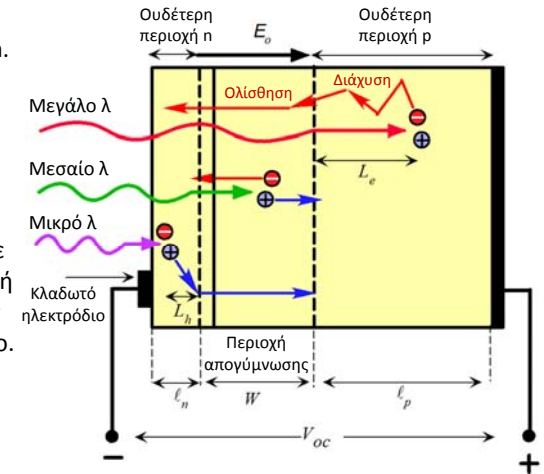
Απορρόφηση και δημιουργία ΖΗΟ

- Ακτινοβολία **μεγάλου λ** διεισδύει βαθύτερα στην περιοχή p.
- Τα ηλεκτρόνια των ΖΗΟ διαχέονται στην περιοχή p μέχρι να φτάσουν στην περιοχή απογύμνωσης όπου ολισθαίνουν εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή n.
- Μόνο ΖΗΟ που βρίσκονται σε απόσταση L_e από την περιοχή απογύμνωσης συνεισφέρουν στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο.
- Για το λόγο αυτό επιλέγουμε την περιοχή αυτή να είναι τύπου p ($L_e > L_h$).

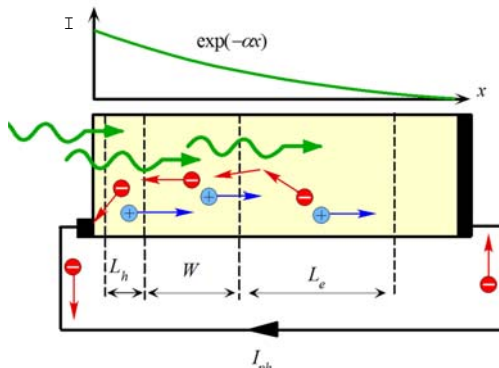


Απορρόφηση και δημιουργία ΖΗΟ

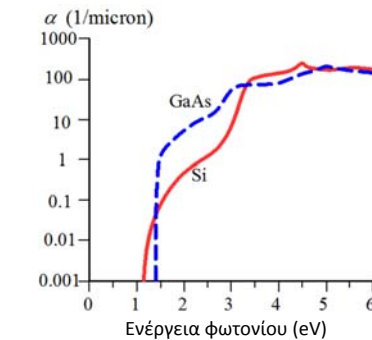
- Ακτινοβολία **μικρού λ** διεγείρει ΖΗΟ στην περιοχή n.
- Οι οπές διαχέονται μέχρι την περιοχή απογύμνωσης και ολισθαίνουν λόγω του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή p.
- Μόνο ΖΗΟ που βρίσκονται σε απόσταση L_h από την περιοχή απογύμνωσης συνεισφέρουν στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο.
- Συνολικά τα ΖΗΟ που συνεισφέρουν στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο βρίσκονται στην περιοχή $L_h + W + L_e$



Εξάρτηση της απορρόφησης από το μήκος κύματος



Η ένταση του φωτός φθίνει εκθετικά εντός της διάταξης. Το ρεύμα που δημιουργείται αν βραχυκυκλώσουμε τα δύο άκρα ονομάζεται **φωτορεύμα** I_{ph}

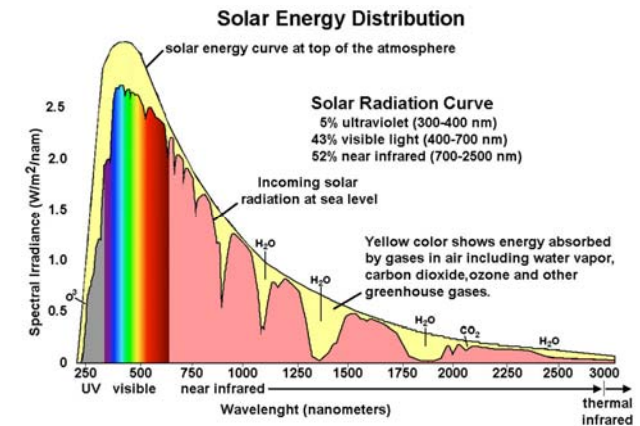


Ο συντελεστής απορρόφησης α δείχνει πόσο βαθιά μπορεί να διεισδύσει το φως στο υλικό πριν απορροφηθεί και εξαρτάται από το μήκος κύματος λ .

$$\gamma\text{πενθύμιση: } E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

Περιορισμοί στην απόδοση

- Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει ενεργειακό διάκενο $E_g = 1.1\text{eV}$ που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος $\approx 1100\text{nm}$.
- Ακτινοβολία με μήκος κύματος $\lambda > 1100\text{nm}$ δεν δημιουργεί ΖΗΟ (αντιστοιχεί σε ποσοστό 25%).



Περιορισμοί στην απόδοση

- Ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος απορροφάται κοντά στην επιφάνεια και χάνεται λόγω επανασύνδεσης (επιφάνειες και διεπαφές περιέχουν ατέλειες που δρουν ως κέντρα επανασύνδεσης). Οι απώλειες λόγω επανασύνδεσης κοντά στην επιφάνεια αντιστοιχούν στο 40% των ΖΗΟ.
- Η αντιανακλαστική επιστρωση δεν είναι τέλεια και μειώνει τον αριθμό των απορροφώμενων φωτονίων σε 80-90%.
- Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έχει συγκεκριμένους περιορισμούς (αναλύονται παρακάτω).

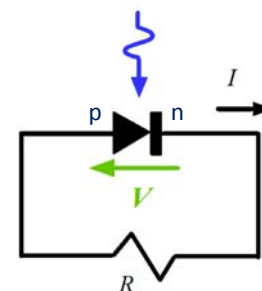
- Η απόδοση ενός ηλιακού κυττάρου ορίζεται ως

$$\eta_{pv} = \frac{P_{\text{ηλεκτρική}}}{P_{\text{ακτινοβολίας}}}$$

και φτάνει μέχρι $\approx 25\%$.

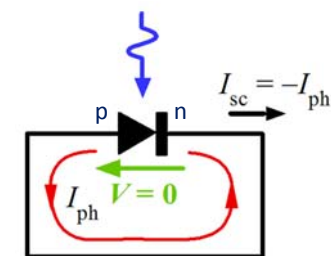
Ρεύμα βραχυκύκλωσης

Η φορά του ρεύματος



Θεωρούμε θετικό το ρεύμα με φορά $p \rightarrow n$

Ρεύμα βραχυκύκλωσης



Το μοναδικό ρεύμα στη διάταξη είναι αυτό που δημιουργείται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία:

$$I_{sc} = -I_{ph} = -KI$$

I : Ένταση ακτινοβολίας (W/m^2).

K : Σταθερά που εξαρτάται από τη διάταξη.

Ρεύμα σε ωμικό φορτίο

- Εμφανίζεται τάση στα άκρα της επαφής p-n.
- Η τάση αυτή μειώνει το εσωτερικό δυναμικό V_0 και οδηγεί σε διάχυση φορέων όπως σε μια κανονική δίοδο.
- Εμφανίζεται ρεύμα ορθής πόλωσης που δίνεται από την εξίσωση Shockley:

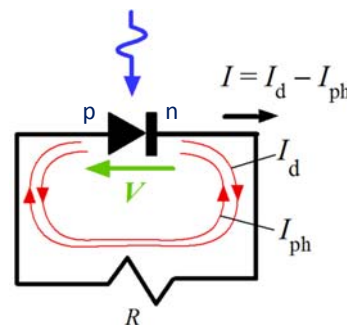
$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{eV}{\eta kT}} - 1 \right)$$

I_0 : Ανάστροφο ρεύμα κορεσμού

η : Συντελεστής ποιότητας

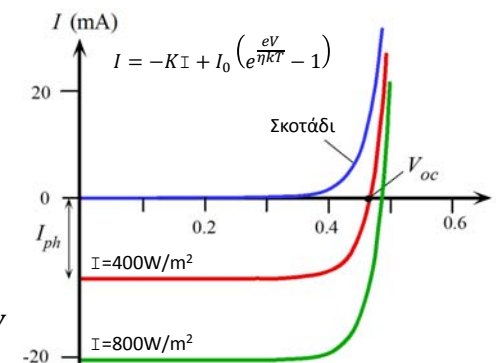
- Το ολικό ρεύμα είναι:

$$I = -I_{ph} + I_0 \left(e^{\frac{eV}{\eta kT}} - 1 \right)$$



Χαρακτηριστική I-V

- Για θετικό ρεύμα απαιτείται εξωτερική πόλωση
- Η λειτουργία του ηλιακού κυττάρου γίνεται πάντα στην αρνητική περιοχή ρεύματος.
- Η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} είναι το σημείο όπου η χαρακτηριστική τέμνει τον άξονα V (δηλαδή όταν $I = 0$).
- Τυπικές τιμές $V_{oc} \approx 0.5 - 0.7V$



Σημείο λειτουργίας

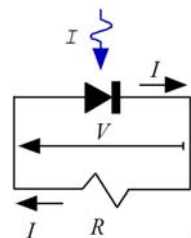
- Όταν το ηλιακό κύτταρο συνδεθεί με ωμική αντίσταση, το ίδιο ρεύμα I διαρρέει την αντίσταση:

$$I = -\frac{V}{R} \quad (1)$$

- Το ρεύμα πρέπει να ικανοποιεί και την χαρακτηριστική του ηλιακού κυττάρου

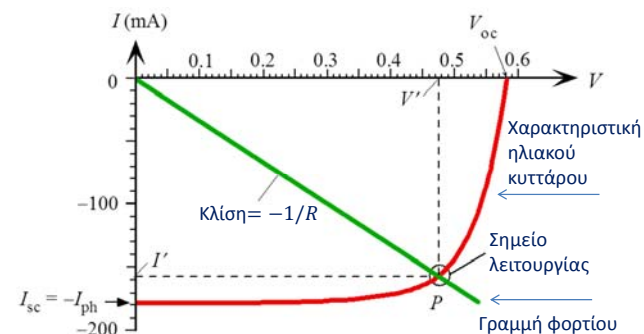
$$I = -I_{ph} + I_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

- Σύστημα δύο μη γραμμικών εξισώσεων με δύο αγνώστους που δεν λύνεται αναλυτικά, παρά μόνο με αριθμητικές τεχνικές.



Σημείο λειτουργίας

Γραφική επίλυση



Το σημείο (V', I') ικανοποιεί και τις δύο εξισώσεις και ονομάζεται **σημείο λειτουργίας** της διάταξης. Στο σημείο λειτουργίας ισχύει ότι

- $V' < V_{oc}$
- $I < I_{sc}$ κατ' απόλυτη τιμή.

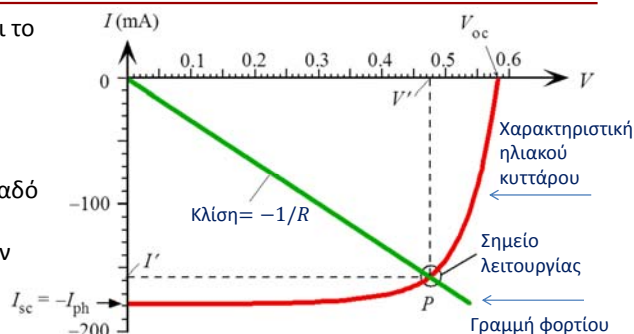
Παράγοντας πλήρωσης

- Η ισχύς που παρέχει το ηλιακό κύτταρο στο σημείο λειτουργίας είναι:

$$P_{out} = I'V'$$

- Αντιστοιχεί στο εμβαδό της ορθογώνιας περιοχής μεταξύ των αξόνων και των διακεκομένων γραμμών.

- Για κάποιες τιμές I_m, V_m το εμβαδό μεγιστοποιείται (μεταβάλλοντας την R ή την ένταση της ακτινοβολίας).



- Ορίζουμε τον **παράγοντα πλήρωσης**:

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

- Δείχνει πόσο κοντά βρίσκεται η καμπύλη I-V στο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο (ιδανικό). Τυπικές τιμές: 70-85%

Σύνοψη

Ρεύμα βραχυκύκλωσης

$$I_{sc} = -I_{ph} = -KI$$

Ολικό ρεύμα

$$I = -I_{ph} + I_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

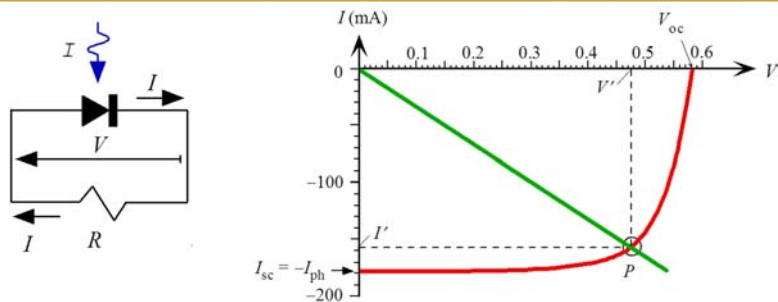
Παράγοντας πλήρωσης

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

Παράδειγμα #1 (Ηλιακό κύτταρο οδηγεί αντίσταση)

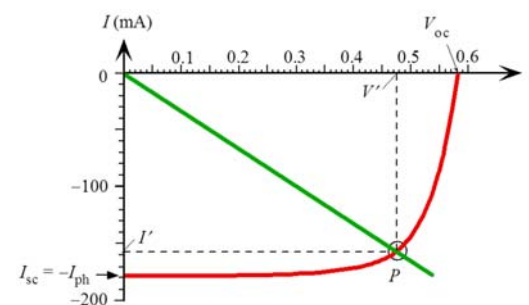
Ηλιακό κύτταρο οδηγεί αντίσταση $R=3\Omega$. Οι χαρακτηριστικές δίνονται στο παρακάτω σχήμα. Η επιφάνεια του κυττάρου είναι $A=3cm \times 3cm$ και ακτινοβολείται με ένταση $I=700W/m^2$.

- Βρείτε το σημείο λειτουργίας της διάταξης.
- Πόση είναι η ισχύς που αποδίδεται στην αντίσταση ;
- Πόση είναι η απόδοση του ηλιακού κυττάρου ;
- Ποιος είναι ο παράγοντας πλήρωσης ;



Παράδειγμα #1

- Βρείτε το σημείο λειτουργίας της διάταξης.



Από τη χαρακτηριστική βλέπουμε ότι το σημείο λειτουργίας είναι:

$$I' = 157mA$$

$$V' = 0.475V$$

Παράδειγμα #1

- Πόση είναι η ισχύς που αποδίδεται στην αντίσταση ;

$$P_{out} = I'V' =$$

$$157mA \times 0.475V =$$

$$74.6mW$$

Παράδειγμα #1

- Πόση είναι η απόδοση του ηλιακού κυττάρου ;

Η απόδοση ορίζεται ως:

$$\eta_{pv} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{IA}$$

Η επιφάνεια είναι:

$$A = (3cm)^2 = 9cm^2 = 9 \times 10^{-4}m^2$$

Η εισερχόμενη ηλιακή ισχύς είναι:

$$P_{in} = IA =$$

$$700 \frac{W}{m^2} \times 9 \times 10^{-4}m^2 =$$

$$0.63W$$

Η απόδοση είναι:

$$\eta_{pv} = \frac{P_{out}}{P_{in}} =$$

$$\frac{74.6mW}{630mW} = 0.118 = 11.8\%$$

Παράδειγμα #1

d. Ποιος είναι ο παράγοντας πλήρωσης ;

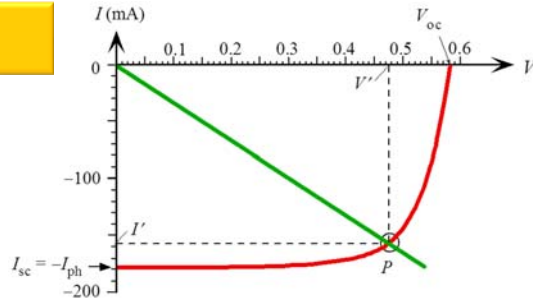
Ο παράγοντας πλήρωσης ορίζεται ως:

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

όπου I_m, V_m είναι οι τιμές που μεγιστοποιούν την αποδιδόμενη ισχύ P_{out}

Παρατηρούμε ότι το σημείο P ορίζει περίπου το ορθογώνιο με το μέγιστο εμβαδό:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \approx \frac{I' V'}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{out}}{I_{sc} V_{oc}}$$



Από την χαρακτηριστική βρίσκουμε ότι:

$$I_{sc} = 178 \text{ mA} \quad V_{oc} = 0.53 \text{ V}$$

$$FF = \frac{P_{out}}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{74.6 \text{ mW}}{178 \text{ mA} \times 0.58 \text{ V}} = 0.72 = 72\%$$

Παράδειγμα #2 (Τάση ανοιχτού κυκλώματος και ρεύμα βραχυκύκλωσης)

Ένα ηλιακό κύτταρο που ακτινοβολείται με ένταση $I=700 \text{ W/m}^2$ έχει ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc}=150 \text{ mA}$ και τάση ανοικτού κυκλώματος $V_{oc}=0.53 \text{ V}$.

Ποιο είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτού κυκλώματος αν η ένταση της ακτινοβολίας διπλασιαστεί ; Υποθέστε συντελεστή ποιότητας $\eta=1.5$ (τυπική τιμή για πολλές επαφές pn).

Παράδειγμα #2

Η γενική σχέση ρεύματος τάσης είναι στο ηλιακό κύτταρο:

$$I = -I_{ph} + I_0 \left(e^{\frac{eV}{\eta kT}} - 1 \right)$$

Υποθέτοντας $V \gg \frac{\eta kT}{e}$ η σχέση γράφεται:

$$I = -I_{ph} + I_0 e^{\frac{eV}{\eta kT}}$$

Για $I = 0$ η παραπάνω σχέση δίνει την τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc}

$$0 = -I_{ph} + I_0 e^{\frac{eV_{oc}}{\eta kT}} \Rightarrow$$

$$I_0 e^{\frac{eV_{oc}}{\eta kT}} = I_{ph} \Rightarrow$$

$$\frac{eV_{oc}}{\eta kT} = \ln \frac{I_{ph}}{I_0} \Rightarrow$$

$$\frac{eV_{oc}}{\eta kT} = \ln \frac{I_{ph}}{I_0} \Rightarrow$$

$$V_{oc} = \frac{\eta kT}{e} \ln \frac{I_{ph}}{I_0}$$

Το φωτορεύμα I_{ph} εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας

$$I_{ph} = KI$$

Αντικαθιστώντας:

$$V_{oc} = \frac{\eta kT}{e} \ln \frac{KI}{I_0}$$

Παράδειγμα #2

Αν έχουμε δύο διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας I_1 και I_2 οι αντίστοιχες τάσεις ανοικτού κυκλώματος είναι:

$$V_{oc1} = \frac{\eta kT}{e} \ln \frac{KI_1}{I_0}$$

$$V_{oc2} = \frac{\eta kT}{e} \ln \frac{KI_2}{I_0}$$

Η διαφορά τους είναι:

$$V_{oc2} - V_{oc1} = \frac{\eta kT}{e} \ln \frac{KI_2}{I_0} - \frac{\eta kT}{e} \ln \frac{KI_1}{I_0} =$$

$$\frac{\eta kT}{e} \left(\ln \frac{KI_2}{I_0} - \ln \frac{KI_1}{I_0} \right) =$$

$$\frac{\eta kT}{e} \ln \frac{KI_2}{KI_1} =$$

$$\frac{\eta kT}{e} \ln \frac{I_2}{I_1}$$

Όμως η δεύτερη ένταση είναι διπλάσια από την πρώτη:

$$I_2 = 2I_1$$

Η διαφορά γίνεται:

$$V_{oc2} - V_{oc1} = \frac{\eta kT}{e} \ln 2$$

Παράδειγμα #2

Χρειαζόμαστε:

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$V_{oc2} - V_{oc1} = \frac{\eta k T}{e} \ln 2 =$$

$$\frac{1.5 \left(8.62 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \right) (300\text{K})}{e} \ln 2 =$$

$$0.027\text{V}$$

Η ποσοστιαία διαφορά είναι:

$$\frac{V_{oc2} - V_{oc1}}{V_{oc1}} =$$

$$\frac{0.027\text{V}}{0.53\text{V}} = 0.05 = 5\%$$

Ο διπλασιασμός της έντασης της ακτινοβολίας **αυξάνει μόνο 5% την τάση ανοικτού κυκλώματος.**

Η ποσοστιαία διαφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:

$$\frac{I_{sc2} - I_{sc1}}{I_{sc1}} = \frac{-I_{ph2} - (-I_{ph1})}{-I_{ph1}} =$$

$$\frac{K I_2 - K I_1}{K I_1} = \frac{I_2 - I_1}{I_1}$$

Επειδή $I_2 = 2 I_1$ η διαφορά γίνεται

$$\frac{I_{sc2} - I_{sc1}}{I_{sc1}} = \frac{2 I_1 - I_1}{I_1} = 1$$
$$= 100\%$$

Ο διπλασιασμός της έντασης της ακτινοβολίας **διπλασιάζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης.**