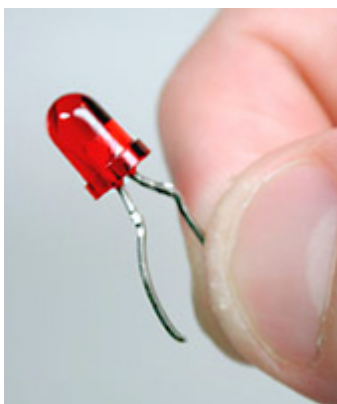


### Άσκηση 3

#### Η φωτο-εκπέμπουσα δίοδος (Light Emitting Diode)



#### ***Εισαγωγή***

Στην προηγούμενη εργαστηριακή άσκηση μελετήσαμε την δίοδο ανόρθωσης ένα στοιχείο που σχεδιάστηκε για να λειτουργεί ως μονόδρομος αγωγός. Είδαμε ότι μια από τις κύριες λειτουργίες της δίοδου ανόρθωσης είναι η ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η αγωγή του ρεύματος προς την μια κατεύθυνση δεν είναι η μοναδική λειτουργία που μπορεί να εκτελέσει μια δίοδος. Τα χαρακτηριστικά μιας δίοδου μπορούν να βελτιωθούν και να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές πέρα της ανόρθωσης. Στην εργαστηριακή αυτή άσκηση θα μελετήσουμε την φωτοεκπέμπουσα δίοδο γνωστή ως Light Emitting Diode (L.E.D.).

#### ***Θεωρία***

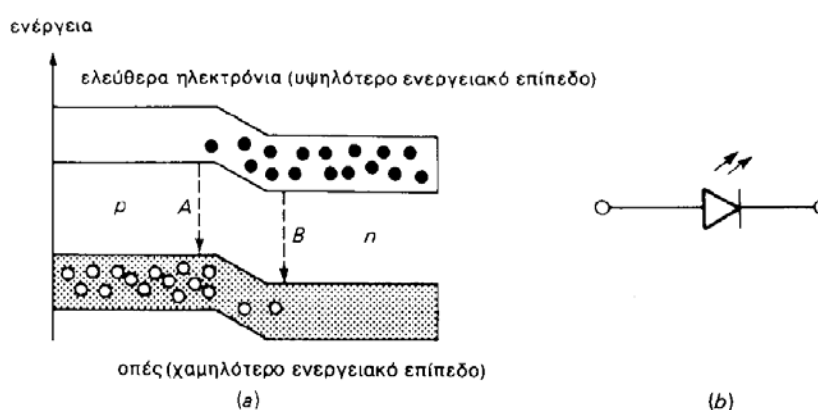
Η Οπτοηλεκτρονική είναι ο κλάδος της Φυσικής που συνδυάζει τις επιστήμες της Οπτικής και της Ηλεκτρονικής. Πολλά από τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην Οπτοηλεκτρονική βασίζονται στην τεχνολογία της επαφής pn. Ένα από τα στοιχεία που χρησιμοποιείται ευρύτατα είναι φωτοεκπέμπουσα δίοδος γνωστή ως LED. Τα LED είναι μια από τις τέσσερις βασικές πηγές μη σύμφωνου φωτός που χρησιμοποιούνται σήμερα, οι άλλες είναι οι λάμπες πυρακτώσεως, λάμπες εκκένωσης αερίου και λάμπες ηλεκτροφωταύγειας. Τα LED εμφανίστηκαν το 1968.

Χρησιμοποιώντας υλικά όπως το γάλλιο, φώσφορο, αρσενικό, πυρίτιο μπορούν να κατασκευαστούν δίοδοι LED που εκπέμπουν στο κόκκινο, πράσινο, κίτρινο, μπλε, πορτοκαλί και υπέρυθρο χρώμα. Στον πίνακα 1 περιέχονται LED διαφόρων υλικών και επίσης αναγράφεται η φασματική περιοχή εκπομπή τους.

ΥΛΙΚΟ	ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ (nm)	ΧΡΩΜΑ
GaAs:Si	950	IR
GaAs:Zn	900	IR
GaP	690	ΚΟΚΚΙΝΟ
GaAsP	660	ΚΟΚΚΙΝΟ
GaP	590	ΚΙΤΡΙΝΟ
GaP	565	ΠΡΑΣΙΝΟ

**Πίνακας 1:** Φάσμα εκπομπής LED διαφορετικών ημιαγωγικών κρυστάλλων

Ποιος είναι όμως ο μηχανισμός παραγωγής φωτεινής ακτινοβολίας ενός LED; Είδαμε στην εργαστηριακή άσκηση 2 ότι όταν μια διόδος πολώνεται ορθά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές που είναι κοντά στην επαφή αλληλοεξουδετερώνονται όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 1. Καθώς λοιπόν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια γίνονται ηλεκτρόνια σθένους δηλαδή εκτελούν την μετάβαση από μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη (ελεύθερα ηλεκτρόνια) προς μια χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη (ηλεκτρόνια σθένους) απελευθερώνουν ενέργεια. Στις διόδους ανόρθωσης η απελευθερωμένη ενέργεια έχει την μορφή θερμότητας ενώ στα LED έχει την μορφή φωτεινής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 1:** (α) Ενεργειακά επίπεδα επαφής pn και (β) κυκλωματικό σύμβολο LED  
(«Βασική Ηλεκτρονική» Malvino 4<sup>η</sup> έκδοση)

Ακτινοβολία λόγω επανασύνδεσης έχει παρατηρηθεί σε μια ευρεία περιοχή αποδόσεων στους περισσότερους από εκείνους τους ημιαγωγούς από τους οποίους μπορούν να κατασκευαστούν επαφές τύπου pn. Οι κατασκευαστές συνήθως προσδιορίζουν την κβαντική απόδοση του LED η οποία συνδέει το φως εξόδου με το ρεύμα της διόδου,

$$n = \frac{\text{εκπεμπόμενο φως σε φωτόνια}}{\text{ρεύμα διόδου σε ηλεκτρόνια}} \quad (1)$$

Η ενέργεια του κάθε φωτονίου δίνεται από την σχέση

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck και είναι ίση με  $6.63 \times 10^{-34}$  J sec. Η φωτεινή ισχύς  $P$  δίνεται μέσω της (2) από

$$\frac{P}{E} = \frac{P\lambda}{hc} \quad (3)$$

Από σχέση (1) παρατηρούμε ότι η κβαντική απόδοση του LED δίνεται ως προς το ρεύμα διόδου ( $I$ ) σε ηλεκτρόνια, ποσότητα που εκφράζεται από τον λόγο  $I/e$ .

Επομένως η κβαντική απόδοση μπορεί να εκφραστεί από την σχέση

$$n = \frac{P\lambda e}{Ihc} \quad (4)$$

όπου ( $e$ ) είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου ( $1.6 \times 10^{-19}$  Cb) και  $c$  η ταχύτητα του φωτός ( $3 \times 10^8$  m / sec). Κάνοντας τις αντικαταστάσεις των σταθερών στην (4) προκύπτει ότι η κβαντική απόδοση του LED είναι ίση με

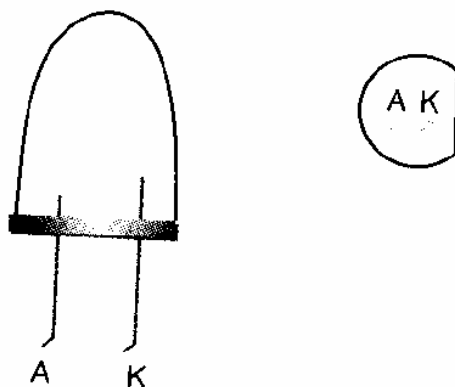
$$n = 0.857 \left( \frac{P\lambda}{I} \right) \quad (5)$$

Στην (5) το μήκος κύματος  $\lambda$  εκφράζεται σε  $\mu\text{m}$ .

Το μήκος κύματος που εκπέμπει το LED εξαρτάται από το είδος του κρυστάλλου και την κατασκευή της ένωσης pn. Η παραγωγή συνεχής ακτινοβολίας θα προκύψει μετά από πόλωση που θα δίνει κατάλληλη ενέργεια διέγερσης (μεγαλύτερη από το φράγμα δυναμικού) και επανασύνδεσης. Η κβαντική άντληση δηλαδή η διαρκής επαναφορά των αποδιεγερμένων ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας της ένωσης pn γίνεται

από την πηγή πόλωσης της διόδου. Έτσι λοιπόν τροφοδοτείται με ηλεκτρόνια η ζώνη αγωγιμότητας και συνεχώς αναπληρώνονται οι απώλειες των ηλεκτρονίων, συντηρούμενης έτσι της απαιτούμενης μεταφοράς των φορτίων.

Στο σχήμα 2 απεικονίζεται η δομή ενός LED. Στο πλάι του πλαστικού περιβλήματος υπάρχει ένα επίπεδο που δηλώνει την κάθοδο. Πολλές φορές βέβαια ο ακροδέκτης με το μικρότερο μήκος είναι αυτός που αντιστοιχεί στην κάθοδο.



Σχήμα 2: Δομή LED (« Οπτοηλεκτρονική» Α. Αλεξανδρής)

Τα LED έχουν μεγάλο χρόνο ζωής και ο μόνος κίνδυνος να καταστραφούν είναι να πολωθούν ανάστροφα. Ένα LED μπορεί να αντέξει 3 μέχρι 11 Volts ανάστροφης πόλωσης.

Τα χαρακτηριστικά του LED είναι τα παρακάτω:

(α) **Το χρώμα:** (βλέπε πίνακα 1)

(β) **Το ηλεκτρικό χαρακτηριστικό:** Αναφέρετε στην τάση πόλωσης και το ρεύμα της επαφής pn. Οι τιμές των δυο αυτών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών αλλάζουν ανάλογα με το υλικό του LED. Η τάση πόλωσης παίρνει τιμές συνήθως από 1.5 έως 3 V και το ρεύμα είναι γύρω στα 20 mA. Στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του LED περιλαμβάνεται και η ανάστροφη τάση που μπορεί να εφαρμοστεί στα άκρα του πριν καταστραφεί. Συνήθης τιμές ανάστροφης πόλωσης που αντέχει το LED είναι της τάξης από 3 μέχρι 11 V.

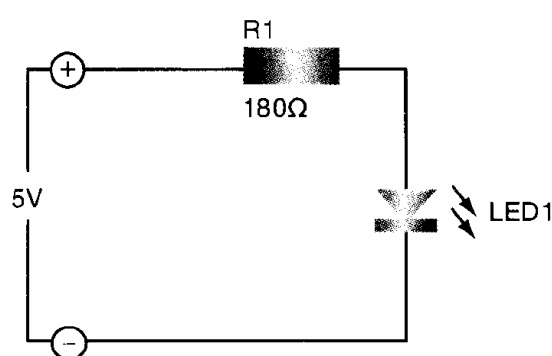
(γ) **Η θερμοκρασία**

(δ) **Η ισχύς που καταναλώνει:** Όσο αυξάνει η θερμοκρασία του LED τόσο μικραίνει η κατανάλωση.

Στο κυκλωματικό σύμβολο του LED τα βέλη δηλώνουν ότι η δίοδος αυτή εκπέμπει οπτική ακτινοβολία. Οι δίοδοι έχουν αντικαταστήσει τους λαμπτήρες πυρακτώσεως σε πολλές εφαρμογές μια και παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

1. Χαμηλή τάση λειτουργίας
2. Μεγάλη διάρκεια ζωής (~ 100.000 ώρες)
3. Γρήγορη διακοπτική λειτουργία (γρήγορη απόκριση)

Στο σχήμα 3 απεικονίζεται μια τυπική συνδεσμολογία LED.



*Σχήμα 3:* Τυπικό κύκλωμα LED (« Οπτοηλεκτρονική» Α. Αλεξανδρή)

Η πτώση τάσης (τάση αγωγιμότητας) στα άκρα του LED είναι ανάλογη με τον κρύσταλλο κατασκευής. Στον πίνακα 2 απεικονίζονται οι ορθές πολώσεις κατωφλίου που απαιτούν LED διαφορετικών κρυστάλλων.

ΧΡΩΜΑ	ΟΡΘΗ ΠΟΛΩΣΗ (V)	ΤΥΠΟΣ
Υπέρυθρο	1.2...1.5	GaAs
Κόκκινο	1.4...1.8	GaAsP
Κίτρινο	2.0...2.5	GaAsP
Πράσινο	2.0...2.8	GaP

*Πίνακας 2*

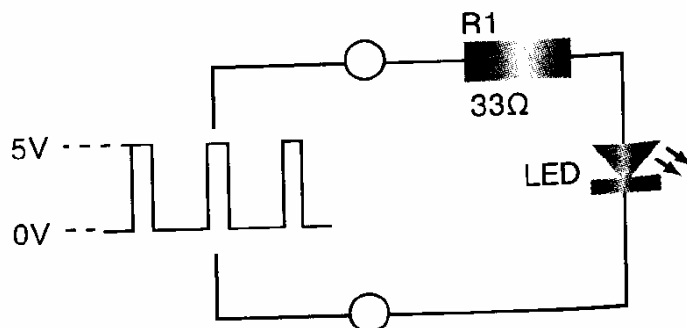
Από πίνακα 2 καταλαβαίνουμε ότι όλα τα LED δεν λειτουργούν εφαρμόζοντας την ίδια τάση στα άκρα τους. Αν η εφαρμοσμένη τάση είναι μικρότερη από την τάση αγωγιμότητας τότε το LED δεν ανάβει ενώ αν είναι μεγαλύτερη λειτουργεί κανονικά. Επίσης στο σχήμα 3 η αντίσταση R καθορίζει το ρεύμα που θα διαπεράσει το LED.

Έτσι για παράδειγμα αν ένα LED έχει μια τάση αγωγιμότητας ίση με 2 V τότε το ρεύμα που την διαρρέει (βλέπε σχήμα 3) δίνεται από την σχέση

$$I_{LED} = \frac{5-2}{R_1} \quad (6)$$

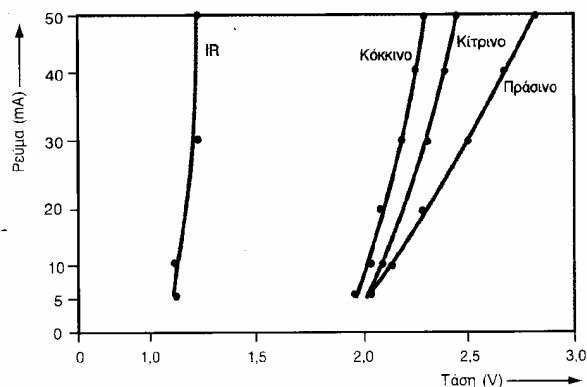
Αν τώρα το ρεύμα που χρειάζεται το LED για να λειτουργήσει είναι 20 mA από την σχέση (6) επιλέγουμε την  $R_1$  έτσι ώστε να ρυθμίσουμε το ρεύμα του LED να γίνει ίσο με αυτή την τιμή. Λύνοντας την (6) προκύπτει ότι η επιλεγόμενη αντίσταση πρέπει να είναι ίση με  $R = 150 \Omega$ .

Το LED μπορεί να λειτουργήσει και σε παλμική μορφή. Στην περίπτωση αυτή ένα LED δεν λειτουργεί με σταθερό συνεχές ρεύμα αλλά με σύντομους παλμούς ρεύματος. Η πόλωση βέβαια του LED **δεν πρέπει να πάρει τιμή μικρότερη από 0 V** για να μην καταστραφεί (βλέπε σχήμα 4). Αν τώρα η συχνότητα των παλμών είναι μεγαλύτερη από 24 Hz το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται το φως του LED συνεχώς αναμμένο.



*Σχήμα 4:* Παλμική λειτουργία LED (« Οπτοηλεκτρονική» Α. Αλεξανδρής)

Τέλος αν θέλουμε να γνωρίσουμε ακριβώς την συμπεριφορά ενός LED χρειάζεται να σχεδιάσουμε την χαρακτηριστική του δηλαδή την γραφική παράσταση του ρεύματος που διαρρέει το LED ως προς την τάση στα άκρα του. Αν όλα είναι φυσιολογικά τότε η γραφική παράσταση που προκύπτει είναι της μορφής που απεικονίζεται στο σχήμα 5.



**Σχήμα 5:** Χαρακτηριστική Ρεύματος – Τάσης για διαφορετικού τύπου LED  
(« Οπτοηλεκτρονική» Α. Αλεξανδρής)

## Πείραμα

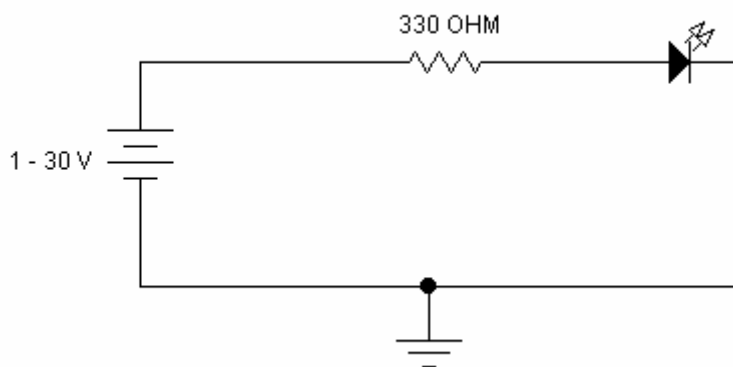
Σκοπός της άσκησης είναι να μελετήσετε την δίοδο LED και τα ηλεκτρικά της μεγέθη.

Αντικειμενικοί στόχοι του πειράματος είναι η κατασκευή του κυκλώματος, η καταγραφή και αξιολόγηση των μετρήσεων και η πλήρης κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του LED.

Τα στοιχεία που θα χρησιμοποιήσετε είναι τα ακόλουθα:

- (α) DC τροφοδοτικό
- (β) Βολτόμετρο
- (γ) LEDs (κόκκινο, πράσινο, κίτρινο)
- (δ) Ωμική αντίσταση  $R = 330 \Omega$

Το κύκλωμα που πρέπει να υλοποιήσετε είναι το παρακάτω



**Σχήμα 6**

### **Εκτέλεση Εργασίας**

1. Ρυθμίστε το dc τροφοδοτικό στην χαμηλότερη τάση ( 1Volt)
2. Υλοποιήστε το κύκλωμα του σχήματος 6 (αρχικά χρησιμοποιώντας το κόκκινο LED)
3. Ρυθμίστε το τροφοδοτικό έτσι ώστε το ρεύμα που διαρρέει το LED να είναι ίσο με 1 mA. Το ρεύμα στα άκρα του LED υπολογίζετε μέσω της σχέσης  $I_D = \frac{V_{dc} - V_{LED}}{R}$ , όπου  $V_{dc}$  είναι η τάση του τροφοδοτικού και  $V_{LED}$  είναι η τάση στα άκρα του LED.
4. Μεταβάλλετε την τάση του τροφοδοτικού ώστε να λάβετε διαδοχικά τα ρεύματα που δίνονται και κάθε φορά μετράτε την τάση  $V_{LED}$  στα άκρα του LED.

$$I_f = 1,2,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25 \text{ mA}$$

5. Με τις τιμές τάσης  $V_{LED}$  και του ρεύματος  $I_f$  χαράζετε την χαρακτηριστική καμπύλη της ορθής πόλωσης της διόδου.
6. Αλλάζετε τώρα την πολικότητα του τροφοδοτικού και μεταβάλλετε την τάση από 1 – 20 V (ανάστροφη πόλωση). Τι παρατηρείτε; Ανάβει το LED και γιατί;
7. Κάντε τις ίδιες μετρήσεις διαδοχικά για το πράσινο, και το κίτρινο LED ( Βήματα 3 – 6).
8. Σημειώστε τα ρεύματα και τις τάσεις που τα διάφορα LED αρχίζουν και φωτίζουν.

### **Επαναληπτικές Ερωτήσεις**

1. Γιατί μια διόδος LED ακτινοβολεί;
2. Αναφέρατε τρία πλεονεκτήματα των διόδων LED, απέναντι στις λυχνίες πυρακτώσεως
3. Εάν το ενεργειακό χάσμα ενός ημιαγωγού είναι 3.2 eV πόσο είναι το μήκος κύματος που εκπέμπεται από ένα LED κατασκευασμένο από αυτό το υλικό;