

Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθούν ορισμένα βασικά στοιχεία της **Οπτικοηλεκτρονικής**, δηλαδή της επιστήμης που μελετά διατάξεις και λειτουργίες της ηλεκτρονικής σε συνδυασμό με οπτικές διατάξεις και λειτουργίες. Στο τέλος του κεφαλαίου, ο μαθητής πρέπει να:

- Έχει κατανοήσει τους μηχανισμούς της φωτοεκπομπής και του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.
- Γνωρίζει την κατασκευή της διόδου φωτοεκπομπής (LED).
- Αντιλαμβάνεται τη χρήση φωτοφωρατών όπως η φωτοαντίσταση η φωτοδίοδος (λήψης), το φωτοτρανζίστορ και άλλες φωτοδιατάξεις

# 6

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

## 6.1 Φωτοπηγές

### 6.1.1 Φωτοεκπομπή

Μπορεί να δοθεί ένας ορισμός για το φως ως εξής :

**Φως είναι το είδος της ενέργειας ,το οποίο διεγείρει το μάτι του ανθρώπου με συνέπεια να βλέπουμε τα διάφορα αντικείμενα.**

Όπως είναι γνωστό από την φυσική, το φως είναι ορατή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ( σύμφωνα με την θεωρία του Maxwell) του οποίου το φάσμα καταλαμβάνει μια περιοχή ανάμεσα στην υπέρυθρη ορατό και την υπεριώδη ακτινοβολία. Οι συχνότητες και στα μήκη κύματος δίδονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ακτινοβολία	Συχνότητα (f)	Μήκος κύματος (λ)
Υπέρυθρη	$10^{11} - 3,85 \text{ THz}$	0,1cm – 790 nm
Ορατή	385 – 789 THz	790 – 390 nm
Υπεριώδης	$789 \text{ THz} - 10^{17} \text{ THz}$	390 – 0,5 nm (5 Å)
	$1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$	1 Å (Angstrom) = $10^{-10} \text{ m}$

*Πίνακας 6.1.1.*

Μεταξύ της συχνότητας (f) και του μήκους κύματος (λ) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ισχύει η σχέση ;

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad 6.1.1$$

όπου  $c =$  ταχύτητα του φωτός =  $3 \times 10^8 \text{ m/sec}$

Σε κάθε ένα μήκος κύματος του ορατού φάσματος, αντιστοιχεί και ένα "χρώμα". Αυτά τα χρώματα είναι τα κύρια και αποτελούν τα γνωστά **χρώματα της "ίριδος"**, τα οποία δίδονται στο παρακάτω σχήμα (μονάδες μήκους κύματος σε Å, συχνότητας σε Hz):



Η σημερινή τεχνολογία με τις μεθόδους μείξης των χρωμάτων, έχει δημιουργήσει χιλιάδες ή και εκατομμύρια χρωμάτων.

Επειδή η έκφραση της οπτικής ακτινοβολίας σε συχνότητα δίνεται από πολύ μεγάλους αριθμούς, όπως φαίνεται πιο πάνω, χρησιμοποιείται συνήθως η έκφραση σε μήκος κύματος.

Η ακτινοβολία, είτε είναι υπεριώδης, ή ορατή, ή υπέρυθρη αποτελείται από **φωτόνια**, δηλαδή απειροελάχιστα "**πακέτα**" φωτεινής ενέργειας (ονομάζονται και κβάντα φωτός), τα οποία έχουν δυσπρόστατη μορφή, δηλ. είναι και υλικά σωματίδια αλλά έχουν και κυματική συμπεριφορά.

Τα φωτόνια έχουν ενέργεια:

$$E_{\varphi} = h \cdot f$$

6.1.2

όπου  $h = 6,62 \times 10^{-34}$  J sec που καλείται σταθερά του Planck,

$f$  = συχνότητα του φωτός σε Hz.

Η εκπομπή φωτός ή **φωτοεκπομπή** γίνεται από τα υλικά σώματα κάτω από συνθήκες όπως:

Α) Λόγω της **υψηλής θερμοκρασίας** που ευρίσκονται όπως ο ήλιος ( $6000^{\circ}$  C), το φωτοβολταϊκό τόξο ( $3000^{\circ}$  C), διάπυρα σώματα όπως οι λαμπτήρες πυράκτωσης ( $\approx 2000 - 2500^{\circ}$  C), κ.α. Οι φωτεινές αυτές πηγές καλούνται **θερμές πηγές φωτός**.

Β) Λόγω **ηλεκτρικών εκκενώσεων** που αναπτύσσονται εντός των αερίων ή ατμών. Οι φωτεινές πηγές ονομάζονται και **ψυχρές πηγές φωτός**. Η απαιτούμενη ενέργεια για την φωτοεκπομπή λαμβάνεται από ηλεκτρικά πεδία. Τέτοιου είδους πηγές είναι οι σωλήνες διαφημίσεως ευγενών αερίων (νέον, κρυπτό κ.λπ.) ή οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου (Hg), νατρίου (Na) υδρογόνου ( $H_2$ ) κ.λπ.

Γ) Λόγω **φθορισμού, φωσφορισμού, χημικών αντιδράσεων** και άλλων φαινομένων. Οι φωτεινές πηγές αυτές είναι **ψυχρές** και η φωτοβολία τους οφείλεται σε απορρόφηση φωτονίων ή πρόσπτωση ηλεκτρονίων μεγαλύτερης ενέργειας. Στον φθορισμό η δευτερογενής ακτινοβολία διαρκεί όσο και η πρωτογενής ενώ στον φωσφορισμό η ενέργεια αποδίδεται αργότερα και για μακρύ χρονικό διάστημα.

Φωτοβόλες ιδιότητες έχουν και μερικά είδη του ζωικού βασιλείου όπως οι πυγολαμπίδες, μερικά είδη ιχθύων, το πλαγκτόν κ.α.

### Παράδειγμα 6.1.1

Ποια είναι η συχνότητα και η ενέργεια φωτονίου που έχει μήκος κύματος  $\lambda = 100 \text{ \AA}$ . Δίδονται  $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$

$$\text{Ταχύτητα φωτός} = c = 3 \times 10^8 \text{ m / sec}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule.}$$

#### Λύση

Η συχνότητα του φωτονίου δίδεται από την σχέση (6.1.2):

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10^2 \times 10^{-10} \text{ m}} = 3 \times 10^{-16} \text{ sec}^{-1} = 3 \times 10^{16} \text{ Hz}$$

Η συχνότητα αυτή ανήκει στην υπεριώδη ακτινοβολία.

Η ενέργεια του φωτονίου δίδεται από την σχέση (6.2) και είναι :

$$E_{\varphi} = h f = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J sec} \times 3 \times 10^{16} \text{ Hz} = 19,86 \times 10^{-18} \text{ Joule}$$

$$\Rightarrow E_{\varphi} = \frac{19,86 \times 10^{-19}}{1,6 \times 10^{-19}} = 124,1 \text{ eV}$$

### Παράδειγμα 6.1.2

Πόσο είναι το μήκος κύματος φωτονίου, που η ενέργεια του είναι  $E_{\varphi} = 4,13 \text{ eV}$ ;

#### Λύση

Η σχέση (6.1.2) γράφεται:

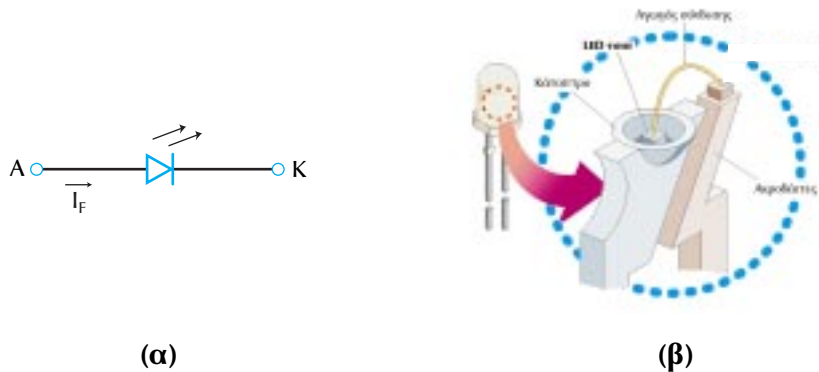
$$E_{\varphi} = h \cdot f \Rightarrow f = \frac{E_{\varphi}}{h} = \frac{4,13 \text{ eV}}{6,62 \times 10^{-34} \text{ J sec}} = \frac{4,13 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,62 \times 10^{-34} \text{ J sec}} = 10^{15} \text{ Hz}$$

Η συχνότητα αυτή ανήκει στην υπεριώδη ακτινοβολία.

## 6.1.2. Δίοδος Φωτοεκπομπής, Λέντ (LED )

Όταν μία δίοδος πολώνεται ορθά, τότε απελευθερώνεται ενέργεια. Κοντά στην περιοχή "απογύμνωσης" γίνεται επανασύνδεση οπών και ηλεκτρονίων και συνεπώς εκλύεται ενέργεια. Στις διόδους ανόρθωσης η

ενέργεια εκλύεται υπό μορφή θερμότητας ενώ στις **διόδους φωτοεκπομπής LED (Light Emitting Diodes)** η ενέργεια εκλύεται υπό μορφή φωτός. Αυτό οφείλεται στο υλικό κατασκευής τους.



**Σχήμα 6.1.3** LED. (α) Σύμβολο, (β) Κατασκευή

Το χρώμα της εκπεμπόμενης φωτεινής ακτινοβολίας μπορεί να είναι κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, μπλε. Τα LED μπορούν να εκπέμπουν και στο υπέρυθρο. Η περιοχή του φάσματος στο οποίο εκπέμπουν τα LED εξαρτάται από το υλικό κατασκευής των το είδος και τη συγκέντρωση των προσμίξεων. Η ένταση του φωτός που εκπέμπουν είναι ανάλογη του ρεύματος ορθής φοράς της διόδου ( $I_F$ ). Τα είδη των ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται για τις διόδους LED είναι GaAsP (Αρσενικό -Φωσφορούχο Γάλλιο, κόκκινο ή πορτοκαλί), GaP (Φωσφορούχο-Γάλλιο, πορτοκαλί ή πράσινο), GaAs (Αρσενικούχο-Γάλλιο, υπέρυθρο), GaAlAs ( Αλουμίνιο- Αρσενικούχο Γάλλιο, λαμπρό κόκκινο), πρόσφατα SiC (Καρβίδιο του Πυριτίου, μπλε) ή πρόσφατα GaN (Αζωτούχο-Γάλλιο, μπλε).

Στο σχήμα 6.1.3 φαίνεται το σύμβολο της διόδου φωτοεκπομπής LED όπου τα βέλη δείχνουν την εκπομπή φωτός.

Οι κατασκευαστές των LED ή Led δίνουν μερικά ή όλα από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- A. Υλικό κατασκευής
- B. Χρώμα φωτός
- Γ. Μήκος κύματος ( $\lambda$ )
- Δ. Μισή γωνία φωτεινής δέσμης ( $\theta$ )

Ε. Τάση ορθής πόλωσης ( $V_F$ ) σε ορθό ρεύμα  $I_F$  ή ορθό μέγιστο  $I_{FMAX}$ .

Στ. Μέγιστο ορθό ρεύμα  $I_{Fmax}$

Ζ. Φωτεινή ή σχετική φωτεινή ένταση

Η. Μέγιστη ισχύς  $P_{MAX}$ .

Στον κάτωθι πίνακα δίδονται διάφοροι τύποι διόδων LED και τα χαρακτηριστικά των όπως δίδονται από του κατασκευαστές (Siemens, Toshiba, Helwett Packard, Philips, Motorola, Telefunken κ.α.)

Τύπος	Υλικό	Χρώμα	Μήκος Κύματος (λ, nm)	Μισή Γωνία (θ°)	Ορθή Τάση ( $V_F$ , V)	Φωτεινή Ένταση (mcd)
YR14P	GaP	Κίτρινο	590	110	2,8/10mA	1/10mA
H 313-6	GaAlAs	Κόκκινο	650	60	2,2/10mA	5/10mA
Q 313-5	GaAsP	Πορτοκ.	610	40	2,8/10mA	
TIL 221	GaAsP	Κόκκινο	640-700	50	1,5/0,1mA 1,6/20mA	0,2/4mA 1/20mA
LG3341J	GaP	Πράσινο	570	40	2,0/ 10 mA	4-32/ 10mA
HLMP 1620	Ga AsP	Κίτρινο	585	60	2,5 /4mA 5/10mA	4,5V 13mA
LU5351J	GaP	Κίτρινο/ Πράσινο	635/565	50	2/10mA	4-32/ 10mA
LB5410	SiC	Μπλε	480	35	3,7/20mA	6/20mA
MLED92	GaAs	Υπέρυθρο	900	110	1,5/100mA	

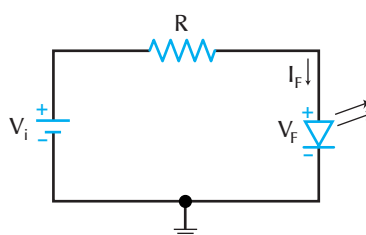
**Πίνακας 6.1.2.** Χαρακτηριστικές τιμές διόδων LED.

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα η κανονική τάση λειτουργίας μιας διόδου LED είναι κατά μέσο όρο  $V_F \approx 2$  V. Η τιμή αυξάνεται όταν μεταβαίνουμε από το υπέρυθρο (1,5V) προς το μπλε (3,7V) και το



κανονικό ρεύμα λειτουργίας για αρκετά ικανοποιητική φωτεινή ένταση εκπομπής είναι μεταξύ 10 και 20 mA. Το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας, για τις περισσότερες διόδους LED, είναι  $I_{FMAX} \approx 50$  mA. Συνεπώς η μέγιστη ισχύς θα είναι  $P_{MAX} \approx 100$  mW. Όλα αυτά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό κυκλώματος με LED για να μην καταστραφεί.

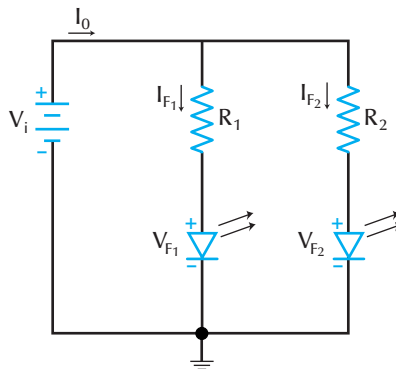
Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι προστασίας των ενδεικτικών λυχνιών όταν είναι συνδεδεμένες σε ηλεκτρονικό κύκλωμα. Μία μέθοδος συνίσταται στην εν σειρά σύνδεση μιας αντίστασης R κατάλληλης τιμής, έτσι ώστε να διέρχεται από το LED ρεύμα μικρότερο από το μέγιστο (Σχήμα 6.1.4 σχέση 6.1.3):



Σχήμα 6.1.4 Κύκλωμα συνδεσμολογίας LED

$$I_F = \frac{V_i - V_F}{R} \quad 6.1.3$$

Για σύνδεση δύο διόδων LED εν παραλλήλω θα έχουμε το παρακάτω κύκλωμα:



Σχήμα 6.1.5 Σύνδεση 2 LED εν παραλλήλω

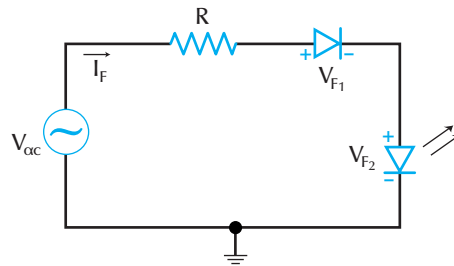
$$I_{F1} = \frac{V_i - V_{F1}}{R_1}, \quad I_0 = I_{F1} + I_{F2}, \quad I_{F2} = \frac{V_i - V_{F2}}{R_2} \quad 6.1.4$$



Όταν η πηγή τάσης εισόδου είναι εναλλασσόμενου ρεύματος η διάδος φωτοεκπομπής προστατεύεται με σύνδεση εν σειρά μιας διόδου PN και αντίστασης R όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.6

$$I_F = \frac{V_{ac} - (V_{F1} + V_{F2})}{R}$$

6.1.5



**Σχήμα 6.1.6** Σύνδεση LED με πηγή εναλλασσόμενης τάσης

### Παράδειγμα 6.1.3

Στο κύκλωμα του κυκλώματος 6.1.4 είναι :  $V_i = 14\text{ V}$ ,  $R = 600\ \Omega$ . Να ευρεθεί το ρεύμα που διαρρέει την diόδο, όταν η τάση ορθής φοράς είναι  $V_F = 2\text{ V}$ .

### Λύση

Το ρεύμα ορθής φοράς της diόδου είναι :

$$I_F = \frac{V_i - V_F}{R} = \frac{14\text{V} - 2\text{V}}{600\ \Omega} = \frac{12\text{V}}{600\ \Omega} = 20\text{ mA}$$

### Παράδειγμα 6.1.4

Αν στο παραπάνω παράδειγμα η ελάχιστη τιμή του ορθού ρεύματος μιας diόδου LED, για φωτεινή ένδειξη είναι  $I_{Fmin} = 5\text{ mA}$  και η μέγιστη για να μην καταστραφεί είναι  $I_{Fmax} = 50\text{ mA}$ , να ευρεθούν τα όρια διακύμανσης της αντίστασης R για ασφαλή λειτουργία.

### Λύση

Από την σχέση (6.1.3) έχουμε για την αντίσταση R :

$$R = \frac{V_i - V_F}{I_F}$$

Οπότε η ελάχιστη τιμή της αντίστασης είναι;

$$R_{\min} = \frac{V_i - V_F}{I_{F \max}} = \frac{14V - 2V}{50 \text{ mA}} = \frac{12V}{50 \text{ mA}} = 240\Omega$$

Από την ίδια εξίσωση , η μέγιστη αντίσταση θα είναι :

$$R_{\max} = \frac{V_i - V_F}{I_{F \min}} = \frac{14V - 2V}{5 \text{ mA}} = \frac{12V}{5 \text{ mA}} = 2400\Omega$$

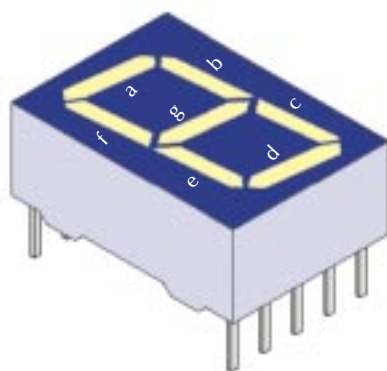
Άρα η αντίσταση R κυμαίνεται στα εξής όρια: **240 Ω < R < 2400 Ω**

Η δίοδος LED χρησιμοποιείται σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές σαν ενδεικτική λυχνία λειτουργίας ή βλάβης. Μια πράσινη LED δείχνει συνήθως ομαλή λειτουργία της συσκευής, ενώ μια κόκκινη δείχνει συνήθως βλάβη ή απλώς λειτουργία της συσκευής. Οι υπέρυθρες LED χρησιμοποιούνται συχνά για έλεγχο ηλεκτρονικών συσκευών από μακριά όπως είναι το τηλεχειριστήριο της τηλεόρασης, βίντεο ή ηχητικού συστήματος. Μια δίχρωμη LED συνήθως δείχνει με κάθε χρώμα τις διαφορετικές καταστάσεις ενός σημείου ελέγχου της συσκευής όπως μικρότερο ή μεγαλύτερο ρεύμα ή τάση κ.λ.π.

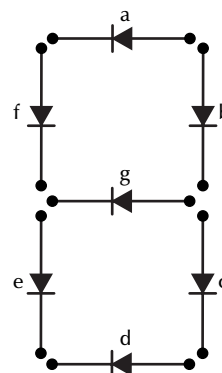
Οι δίοδοι φωτοεκπομπής χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις χαμηλής τάσης και ισχύος και έχουν το πλεονέκτημα έναντι των λυχνιών πυράκτωσης ότι η διάρκεια ομαλής λειτουργίας τους είναι πάρα πολύ μεγάλη (10.000 – 100.000 ώρες) . Π.χ. με ρεύμα 2– 10 mA και τάση 1,5 – 2,5 V, δηλαδή ισχύ μόλις  $P = 3 - 25 \text{ mW}$  υπάρχει σχεδόν η ίδια φωτεινή ένδειξη που θα έδινε μια λυχνία πυράκτωσης με ισχύ

$$P = 6 \text{ V} \times 150 \text{ mA} = 900 \text{ mW}$$

Μια χρήσιμη εφαρμογή των LED είναι η απεικόνιση των δεκαδικών αριθμών 0 –9 σε μια μικρή οθόνη ή ντισπλέϊ (display) που αποτελείται από 7 φωτιζόμενα με LED τμήματα (7 segment display) όπως δείχνει το σχήμα 6.1.7.



(α)

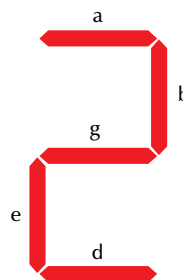


(β)

Σχήμα 6.1.7 Απεικονιστής επτά τμημάτων

Τα 7 LED έχουν κοινή άνοδο και 7 διακεκριμένες καθόδους (a,b,c,d,e,f,g). Η κοινή άνοδος συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής τροφοδοσίας, που είναι συνήθως +5 V , ενώ οι κάθοδοι συνδέονται μέσω 7 αντιστάσεων και 7 διακοπών με την γη. Σε αυτή την περίπτωση ο απεικονιστής ονομάζεται **κοινής ανόδου**. Σε περίπτωση που η κάθοδος είναι κοινή και οι άνοδοι συνδέονται μέσω 7 αντιστάσεων και 7 διακοπών με τα +5 V, ο απεικονιστής ονομάζεται **κοινής καθόδου**. Οι αντιστάσεις χρησιμοποιούνται για να προστατευθούν οι δίοδοι από μεγάλα ρεύματα που περιορίζονται συνήθως σε 20 –25 mA. Η τιμή των αντιστάσεων εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας και το ρεύμα που πρόκειται να διέλθει από την δίοδο φωτοεκπομπής. Πρέπει να επισημανθεί ότι πέραν των επτά LED υπάρχει συνήθως και ένα ακόμα για την υποδιαστολή, διαχωρισμό των ακεραίων από τα δεκαδικά ψηφία.

Διοχετεύοντας ρεύμα σε δύο έως 7 δίοδους θα φωτισθούν τα αντίστοιχα τμήματα ώστε να προκύψουν οι αριθμοί 0–9. Έτσι, αν διέλθει ρεύμα από τις φωτοδίοδους a,b,g,e,d θα προκύψει ο αριθμός 2, εμφανιζόμενος με την μορφή:



Μπορούν, επίσης με κατάλληλους συνδιασμούς να απεικονισθούν και κεφαλαία γράμματα ή λατινικοί χαρακτήρες όπως A, B, C,D, E, F,B,C κ.α.

Η απεικόνιση αυτή των δεκαδικών αριθμών χρησιμοποιείται για τις ενδείξεις των ηλεκτρικών μεγεθών σε ψηφιακά όργανα μέτρησης ,όπως αμπερόμετρο, βολτόμετρο, συχνόμετρο κ.λ.π.

Αν συνδυασθούν 2, 3 ή 4 απεικονιστές 7-τμημάτων υπάρχει η δυνατότητα να μετρηθούν ηλεκτρικές ποσότητες εκφρασμένες με 2 ή 3 ή 4 ψηφία (digits). Περισσότερα στοιχεία για τον ενδείκτη 7 τμημάτων θα δοθούν στο μάθημα της **Β΄ Τάξης " Ψηφιακά Ηλεκτρονικά"**.

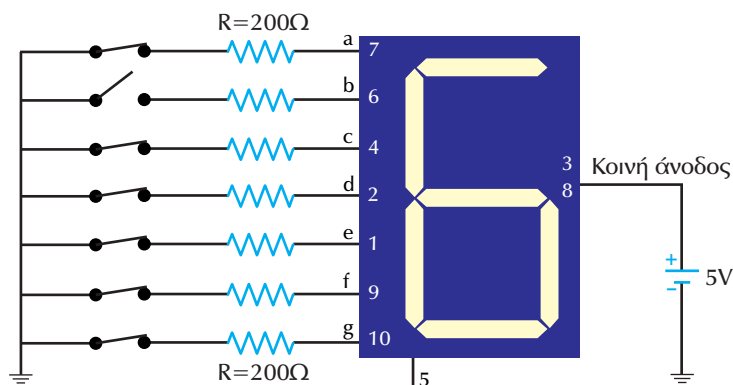
### Παράδειγμα 6.1.5

Να σχεδιασθεί κύκλωμα ενδείκτη 7 τμημάτων το οποίο θα απεικονίζει τον αριθμό 6. Η τιμή της τάσης τροφοδοσίας είναι 5 V και το μέγιστο ρεύμα των LED είναι  $I_{Fmax} = 25 \text{ mA}$ .

### Λύση

Για να σχηματισθεί ο αριθμός 6 θα πρέπει να φωτισθούν τα τμήματα a, f, g, c, d, e, δηλαδή θα πρέπει να κλείσουν τα κυκλώματα των αντίστοιχων LED μέσω των διακοπών και αντιστάσεων όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.7 Οι τιμές των αντιστάσεων προστασίας θα υπολογισθούν με βάση την τιμή της τάσης τροφοδοσίας και το μέγιστο ρεύμα:

$$R = \frac{V_F}{I_{Fmax}} = \frac{5V}{25 \text{ mA}} = 200\Omega$$



Σχήμα 6.1.8 Απεικόνιση του δεκαδικού αριθμού 6

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται απεικονιστές ή ενδείκτες 7 τμημάτων με τα χαρακτηριστικά τους.

Τύπος	Χρώμα	Ορθή Τάση $V_F$ (V)	Μέγιστη Ανάστρ. Τάση $V_R$ , (V)	Φωτεινή Ένταση mcd / mA	Μήλος Κύματος $\lambda$ (nm)
TLR312	Κόκκινο	2 V /15mA	3	0,11/5mA	700
TDS515	Πράσινο	2,4 / 20mA	6	2,8–5,6 /10mA	565
HDSP3903	Έντονο Κόκκινο	2,6–3,5 / 100mA	3	4,8/ 20mA	635

*Πίνακας 6.1.3 Ενδείκτες 7 τμημάτων*

## 6.2 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Στα κεφάλαια 2 και 3 αναφέρθηκε ότι για την απομάκρυνση ηλεκτρονίων από μέταλλα ή ημιαγωγούς, απαιτείται να δοθεί αρκετή ενέργεια ώστε να ελευθερωθούν τα ηλεκτρόνια αυτά έξω από το υλικό. Η ενέργεια αυτή μπορεί να είναι διαφόρων μορφών όπως:

- A. Ηλεκτρική ενέργεια
- B. Θερμική ενέργεια
- Γ. Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια
- Δ. Χημική ενέργεια.

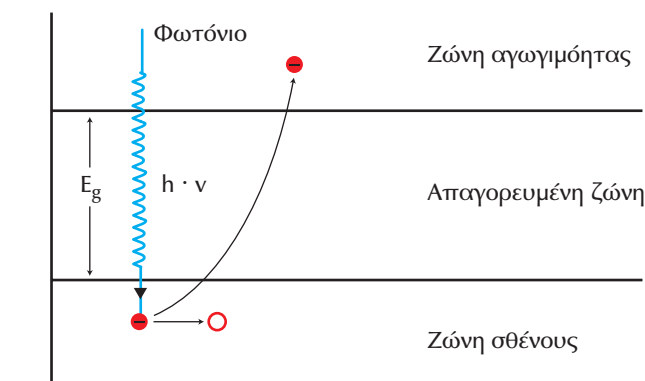
Η ενότητα αυτή, αναφέρεται στην μεταβολή της αγωγιμότητας των υλικών, όταν προσπίπτει φως στην επιφάνεια αυτών. Η δράση αυτή οφείλεται στο **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**.

Για το ορατό φως τα φωτόνια έχουν ενέργεια 1,6 eV – 3,3 eV και αρκετά μεγαλύτερη για το υπεριώδες. Η ενέργεια που απαιτείται για να φύγει ένα ηλεκτρόνιο από τους ομοιοπολικούς δεσμούς που τα συγκρατούν με τα άτομα του καθαρού ημιαγωγού είναι 0,72eV για το γερμάνιο (Ge) και 1,12 eV για το πυρίτιο (Si).

Επομένως η ενέργεια που έχουν τα φωτόνια στο ορατό και το υπεριώδες φως καθώς και σε τμήμα του υπερύθρου, είναι αρκετή για να αποσπάσει τα ηλεκτρόνια από την δεσμούς σθένους. Έτσι, με την πρόσπτωση των φωτονίων, τα ηλεκτρόνια σθένους του ημιαγωγού απορρο-

φούν ενέργεια και μεταπηδούν από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας, υπερπηδώντας την απαγορευμένη ζώνη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών που συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας των ελευθέρων φορέων και συνεπώς την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας των ημιαγωγών, δηλαδή την ελάττωση της ειδικής αντίστασης αυτών.

Η μεταπήδηση αυτή των ηλεκτρονίων, με την απορρόφηση των φωτονίων, φαίνεται στο σχήμα 6.2.1



**Σχήμα 6.2.1** Το Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Το παραπάνω γεγονός, λόγω της αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας μας επιτρέπει να κατασκευάσουμε ειδικές διατάξεις των οποίων η αγωγιμότητα αυξάνεται ή ελαττώνεται ανάλογα με την ένταση του προσπίπτοντος στη επιφάνεια τους φωτός και ονομάζονται, γενικά, φωτοδιατάξεις.

### 6.3 Φωτοφωρατές, Φωτοδιατάξεις

Οι φωτοφωρατές χρησιμοποιούνται πάρα πολύ σε οπτικοηλεκτρονικές εφαρμογές όπως π.χ. για την ανίχνευση κωδικών αριθμών σε προϊόντα (bar codes), στους σαρωτές εικόνων (scanners), για ανίχνευση φλόγας (fire detection), σε συναγερμούς, σε προσαρμοστικά (interfaces) συσκευών, έλεγχο από μακριά (telecontrol) τηλεόρασης, βίντεο, ηχητικών

συστημάτων κ.λ.π. Οι φωτοδιατάξεις διακρίνονται σε φωτοκυψέλες, φωτοδιόδους, φωτοτρανζίστορ, φωτοαντιστάσεις, οπτικούς συζεύκτες (optocouplers), οπτικούς διακόπτες κ.λπ.

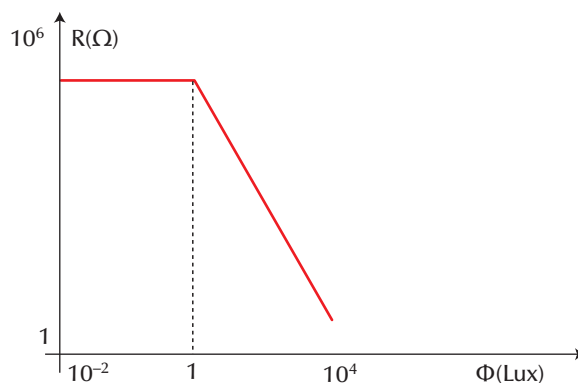
Οι φωτοδιατάξεις κατασκευάζονται με πλαστικό ή μεταλλικό περίβλημα. Στην μια πλευρά υπάρχει «παράθυρο», από γυαλί ή πλαστικό, για να εισέρχεται το φως. Στις παρακάτω παραγράφους θα εξετασθούν μερικές μόνο φωτοδιατάξεις.

### 6.3.1 Φωτοαντιστάσεις

Οι φωτοαντιστάσεις είναι αντιστάσεις οι οποίες κατασκευάζονται από ειδικούς ημιαγωγούς όπως σελήνιο (Se), θειούχο κάδμιο (CdS), ενώσεις του μολύβδου και θείου κ.α. Στις φωτοαντιστάσεις ελαττώνεται η αντίσταση των, όταν στην επιφάνεια των προσπέσει φως κατάλληλου μήκους κύματος.

#### Οι φωτοαντιστάσεις ονομάζονται και LDR (Light Dependent Resistors)

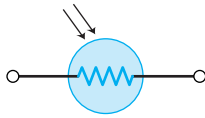
Η αρχική τιμή της αντίστασης των είναι αρκετά μεγάλη (ΜΩ) και μειώνεται με την ένταση του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3.1.



**Σχήμα 6.3.1** Μεταβολή της αντίστασης με την ένταση φωτεινής ακτινοβολίας

Το σύμβολο της φωτοαντίστασης είναι:





**Σχήμα 6.3.2** Φωτοαντίσταση

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των φωτοαντιστάσεων είναι:

A. Η τιμή της αντίστασης όταν δεν φωτίζεται (τιμή σκότους).

B. Τα όρια μεταβολής της αντίστασης, όταν φωτίζεται.

Γ. Ο χρόνος που απαιτείται για να λάβει η αντίσταση την τελική τιμή της.

Δ. Η μέγιστη τάση που εφαρμόζεται στην φωτοαντίσταση.

E. Η Χωρητικότητα της.

Μια κοινή φωτοαντίσταση του εμπορίου είναι της εταιρείας RCA 4442 και χρησιμοποιείται κυρίως για διακόπτες On –Off.

### 6.3.2. Φωτοдиодοι

Οι φωτοдиодοι είναι επαφές PN στις οποίες εφαρμόζεται ανάστροφη πόλωση. Υπό ανάστροφη πόλωση υπάρχει ένα πολύ μικρό ρεύμα που διαρρέει την διόδο, βλέπε κεφ. 3, και για τη συγκεκριμένη περίπτωση καλείται ρεύμα σκότους (dark current),  $I_D$ . Όταν προσπέσει φως δημιουργούνται φορείς (οπές και ηλεκτρόνια) μέσα στην περιοχή απογύμνωσης και το ανάστροφο ρεύμα αυξάνει. Το επιπλέον ρεύμα καλείται ρεύμα υπό φωτισμό (light current) ή φωτόρευμα (Photocurrent) και συμβολίζεται με  $I_p$  ή  $I_\lambda$

**Το φωτόρευμα είναι ανάλογο της έντασης του προσπίπτοντος φωτός.**

Τα χαρακτηριστικά των φωτοдиодων που προσδιορίζονται από τους κατασκευαστές είναι:

A. Γωνία φωτεινής δέσμης.

B. Ρεύμα σκότους ( $I_D$ )

Γ. Μέγιστο μήκος κύματος ( $\lambda_{max}$ )

Δ. Ευαισθησία ρεύματος ( $\mu A/Lux$  ή  $\mu A / \text{κηρίο}$  ή  $A/W$ ) ή Φωτόρευμα ( $I_p$ ,  $I_\lambda$ )

E. Χωρητικότητα (C)

ΣΤ. Μέγιστη ανάστροφη τάση ( $V_{Rmax}$ )

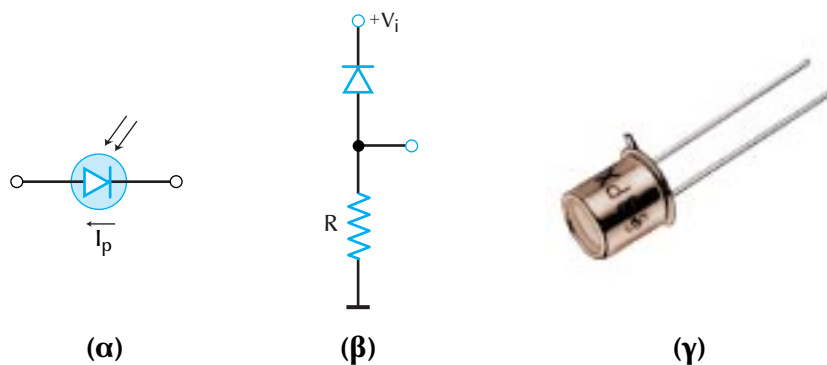
Μέγιστη ευαισθησία παρουσιάζουν οι φωτοдиодοι στο εγγύς υπέρυθρο φως (850nm–950nm).

Στον πίνακα 6.3.1 δίδονται τα χαρακτηριστικά ορισμένων φωτοδιόδων του εμπορίου.

Τύπος	Μισή Γωνία °	Ρεύμα σκότους nA	Ευαισθ. Ρεύματος μA	Μέγιστο Μήκος Κύματος	Μέγιστη ανάστρ. τάση	Χωρητι- κότητα PF
SFH 205	60	2/10V	2,5/ 0,5mW/cm <sup>2</sup>	950	32 V	72 / 0V
BPX61	55	2/10V	70nA/ Lux	850	32 V	72/ 0V
TPS708	30	10pA/ 10 V	1,5/ 0,1mW/cm <sup>2</sup>	850	20 V	50 /10V

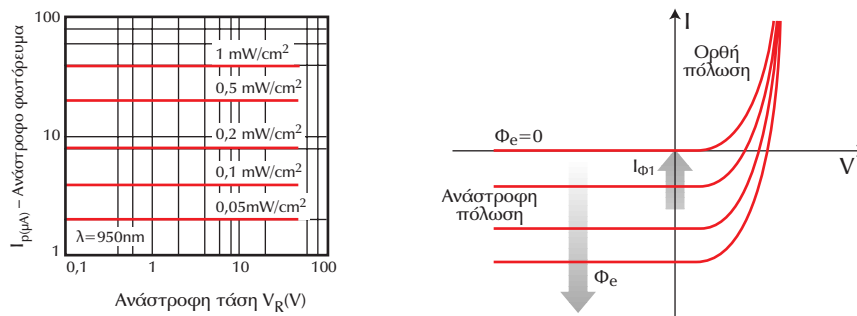
**Πίνακας 6.3.1.** Χαρακτηριστικά φωτοδιόδων

Παρακάτω δίνεται το σύμβολο της φωτοδιόδου και η σύνδεση της με το κύκλωμα συνεχούς ρεύματος. Στο ίδιο κύκλωμα παρουσιάζεται φωτογραφία φωτοδιόδου όπου διακρίνεται το «παράθυρο» στο εμπρόσθιο τμήμα της.



**Σχήμα 6.3.3** (α) Σύμβολο, (β) Σύνδεση σε κύκλωμα, (γ) Εικόνα

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη τάσεως -ρεύματος της φωτοδιόδου BPW20, για διάφορες τιμές φωτεινής ακτινοβολίας.

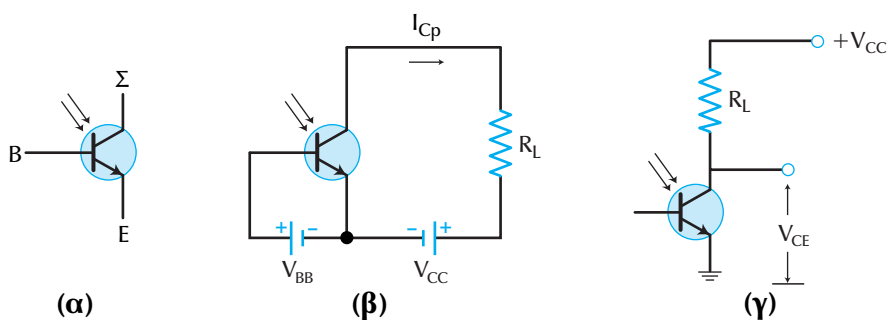


**Σχήμα 6.3.4** Καμπύλες τάσης – ρεύματος, σε ανάστροφη πόλωση, της φωτοδιόδου BPW20

### 6.3.3 Φωτοτρανζίστορ

Το **φωτοτρανζίστορ** είναι αντίστοιχο σε κατασκευή και λειτουργία με το τρανζίστορ επαφής. Έχει ένα «παράθυρο» που του δίνει την δυνατότητα να φωτίζεται η επαφή βάσης-συλλέκτη. Το φωτόρρευμα της διόδου συλλέκτη ενισχύεται και έτσι το φωτοτρανζίστορ έχει 100–500 φορές μεγαλύτερη φωτοευαισθησία από την φωτοδιόδο και ουσιαστικά αντιστοιχεί με μία φωτοδιόδο και ένα ενισχυτή ρεύματος.

Για τους παραπάνω λόγους, το φωτοτρανζίστορ μπορεί να λειτουργήσει με ή και χωρίς να υπάρχει πόλωση στην βάση. Στο σχήμα 6.3.5 δίδονται και οι δύο τρόποι σύνδεσης φωτοτρανζίστορ σε κύκλωμα, καθώς και το σύμβολο του.



**Σχήμα 6.3.5** Φωτοτρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (α) Σύμβολο, (β) Με πόλωση στην βάση, (γ) Χωρίς πόλωση

Χωρίς φωτισμό υπάρχει ένα μικρό ρεύμα διαρροής από τον συλλέκτη στον εκπομπό ( $I_{cbo}$ ). Το ρεύμα συλλέκτη δίνεται στην εξίσωση 6.3.1, όταν υπάρχει πόλωση στην βάση και στην εξίσωση 6.3.2, όταν δεν υπάρχει.

$$I_{cp} = \beta I_b + (\beta + 1) I_{cbo} \quad 6.3.1$$

$$I_{cp} = (\beta + 1) I_{cbo} , ( I_b = 0) \quad 6.3.2$$

Το  $I_{cbo}$  είναι το ανάστροφο ρεύμα βάσεως συλλέκτη, και  $\beta$  είναι η ενίσχυση ρεύματος βάσης -συλλέκτη.

Με τον φωτισμό, το ανάστροφο ρεύμα  $I_{cbo}$  αυξάνει χάρις το φωτόρρευμα της διόδου συλλέκτη. Έστω ότι η αύξηση αυτή του ρεύματος είναι  $I_p$ . Τότε το ρεύμα του συλλέκτη θα είναι :

$$I_{cp} = (\beta + 1) ( I_{cbo} + I_p ) \quad 6.3.4$$

για την περίπτωση χωρίς πόλωση της βάσης που είναι και η συνηθέστερη και οικονομικότερη.

Οι διάφοροι τύποι φωτοτρανζίστορ είναι ευαίσθητοι άλλοι στην ορατή ακτινοβολία, άλλοι στην υπέρυθρη και άλλοι στην υπεριώδη και στις ακτίνες X.

Στον παρακάτω πίνακα δίδονται ορισμένοι τύποι φωτοτρανζίστορ με τα χαρακτηριστικά τους.

Τύπος	Ρεύμα σκότους $I_D / V_{CE}$	Μήκος Κύματος Μεγ. (nm)	Μισή Γωνία °	Μεγιστη ΤάσηCE $V_{CEO}$ (V)	Φωτόρρευμα CE (mA)	Κέρδος Ρεύματος $I_{PCE} / I_{PCB}$
BPY62	5nA/35V	850	8	50	11/1000Lux	420–670
BPX43	20nA/ 25V	880	15	50	15/1000Lux	430–640
BP103	5nA/ 35V	850	55	50	1,8/1000 Lux	530–800
TPS601	10nA/30V	850	20	40	4mA/ 1mW/cm <sup>2</sup>	Ανοικτή Βάση

**Πίνακας 6.3.2** Φωτοτρανζίστορ

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του φωτοτρανζίστορ ομοιάζουν με τις καμπύλες του τρανζίστορ επαφής και δίνουν το φωτόρρευμα,  $I_p$ , συναρτήσει της τάσης συλλέκτη-εκπομπού με παράμετρο το φωτισμό σε Lux.

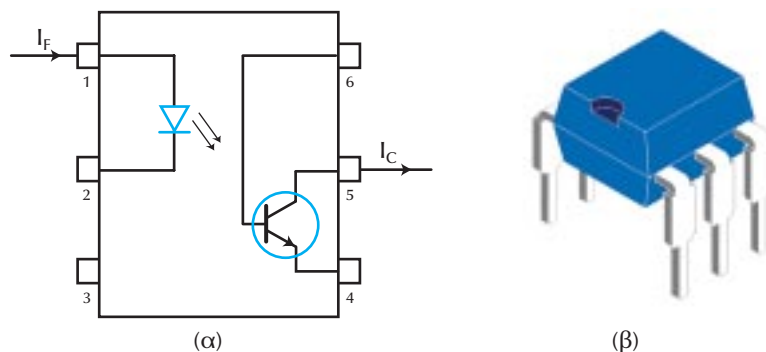
## 6.4 Άλλες Φωτοδιατάξεις

Υπάρχουν και άλλες φωτοδιατάξεις εκτός αυτών που αναφέρθηκαν που χρησιμοποιούνται είτε ως αισθητήρες, είτε για έλεγχο από μακριά, ή για ηλεκτρική απομόνωση κυκλωμάτων όπου υπάρχει όμως οπτική σύνδεση.

Τέτοιες οπτικοηλεκτρονικές διατάξεις ή φωτοδιατάξεις είναι τα φωτοθυρίстор, φωτοdiac, φωτοtriac, η δίοδος Laser, η φωτοκυψέλη, ο οπτικός αισθητήρας, οπτικός διακόπτης και τέλος ο οπτικός συζεύκτης (optocoupler).

Ο οπτικός συζεύκτης ή οπτοκάπλερ (optocoupler) υπάρχει στο εμπόριο σε μορφή όμοια με εκείνη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, δηλ. με 6 ή 8 ποδαράκια (pins), και αποτελείται από ένα υπέρυθρο LED και ένα φωτοτρανζίστορ. Το φωτοτρανζίστορ μπορεί να έχει ακροδέκτη βάσης για εφαρμογή πόλωσης ή να μην έχει.

Τέτοια optocoupler κυκλοφορούν στο εμπόριο από διάφορες εταιρείες όπως τα CNY13, 4N25 –28, 6N135–136 κ.α. Στο σχήμα 6.4.1 φαίνεται το 4N25 με τους ακροδέκτες του και τις φωτοδιατάξεις του.



**Σχήμα 6.4.1** Οπτικοσυζευκτης 4N 25 (α) Εσωτερικό κύκλωμα, (β) Εικόνα

Με την χρησιμοποίηση στο κύκλωμα ενός optocoupler απομονώνεται ηλεκτρικά η είσοδος και η έξοδος του κυκλώματος και υπάρχει μόνο οπτική σύνδεση. Η λειτουργία του είναι η ακόλουθη:

Η δίοδος φωτοεκπομπής (LED) πολώνεται ορθά (ακροδέκτες 1,2) και το κατευθείαν ρεύμα  $I_F$  μετατρέπεται σε υπέρυθρη ακτινοβολία από το LED που εκπέμπεται και λαμβάνεται από το φωτοτρανζίστορ (ακροδέκτες 4,5,6). Η ακτινοβολία αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα και φεύγει από τον συλλέκτη ως  $I_C$  (ακροδέκτης 5).

Το ρεύμα αυτό εξόδου είναι ενισχυμένο σε σχέση με το ρεύμα εισόδου και ο λόγος  $I_c/I_F$  (ονομάζεται και λόγος μεταφοράς ρεύματος, CTR) μπορεί να φθάσει τιμές μέχρι και 1000.

Οι οπτικοί συζεύκτες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην σύγχρονη μικροηλεκτρονική, θα περιγραφούν και θα αναλυθούν περισσότερο στην Β' και Γ' Τάξη.

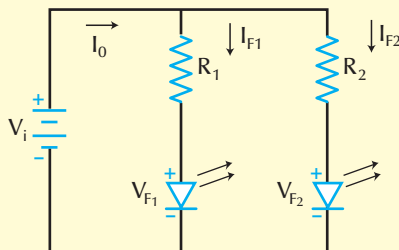
## Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η 6

- Η εκπομπή φωτός ή **φωτοεκπομπή** γίνεται κάτω από ειδικές συνθήκες όπως: υψηλής θερμοκρασίας, ηλεκτρικών εκκενώσεων, φθορισμού, φωσφορισμού, χημικών αντιδράσεων, κ.λ.π.
- **Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** είναι το φαινόμενο κατά το οποίο εκπέμπονται ηλεκτρόνια από την επιφάνεια ενός υλικού ή μεταβάλλεται η αγωγιμότητα του όταν στην επιφάνεια του προσπέσει φως, με κατάλληλη ενέργεια φωτονίων.
- Η απορρόφηση φωτονίων προσδίδει ενέργεια στα ηλεκτρόνια ενός ημιαγωγού για να μεταπηδήσουν από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές με αποτέλεσμα να αυξηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα του.
- Η **δίοδος φωτοεκπομπής (LED)** είναι μια ειδική δίοδος που κατασκευάζεται από ειδικούς ημιαγωγούς όπως GaAsP, GaP, GaAs, SiC και εκπέμπει φωτεινή ενέργεια (ορατή, υπέρυθη) όταν διαρρέεται από ρεύμα ορθής πόλωσης.
- Η **ένταση του φωτός** που εκπέμπει ένα **LED** είναι ανάλογη του ρεύματος που το διαρρέει και η συνήθης ορθή τάση που απαιτείται είναι περίπου 2V.
- Η δίοδος LED χρησιμοποιείται για **απεικόνιση** αριθμών σε ειδικά κυκλώματα που καλούνται **ενδείκτες 7 τμημάτων** και αποτελούνται από 7 LED με κοινή άνοδο ή κάθοδο.
- Η **φωτοαντίσταση** είναι ένας φωτοφωρατής που η τιμή της μειώνεται όταν στην επιφάνεια της προσπέσει φως.
- Η **φωτοδίοδος** είναι μια δίοδος η οποία πολώνεται ανάστροφα και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα όταν φωτίζεται η επιφάνεια της.

- Το **φωτοτρανζίστορ** ομοιάζει με το τρανζίστορ επαφής. Όταν φωτιστεί η επιφάνεια του εμφανίζει στον συλλέκτη του ενισχυμένο το **φωτόρρευμα** που δημιουργείται. Το φωτόρρευμα είναι ανάλογο της έντασης του φωτός.
- Σε ένα φωτοτρανζίστορ, δεν είναι απαραίτητη η πόλωση της βάσης του.
- Ο συνδυασμός μιας διόδου φωτοεκπομπής (LED) και ενός φωτοτρανζίστορ αποτελεί μία πολύ χρήσιμη φωτοδιάταξη που ονομάζεται **οπτικοσυζεύκτης (optocoupler)**. Ο optocoupler χρησιμοποιείται για να απομονώνει ηλεκτρικά την έξοδο και είσοδο δύο κυκλωμάτων.

## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ 6

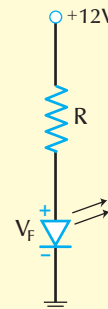
- 6.1. Αναφέρετε μεθόδους φωτοεκπομπής.
- 6.2. Τι είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο;
- 6.3. Πόση ενέργεια περιέχει ένα φωτόνιο;
- 6.4. Πως οι διόδοι LED εκπέμπουν φως;
- 6.5. Σχεδιάστε κύκλωμα, με ενδείκτη (display) 7 τμημάτων, το οποίο να απεικονίζει τον αριθμό 9.
- 6.6. Ποια είναι η διαφορά της φωτοδίοδου από μια δίοδο επαφής PN;
- 6.7. Δίδεται το κάτωθι κύκλωμα που αποτελείται από δύο διόδους φωτοεκπομπής (LED) και είναι :  $V_i = 12\text{ V}$ ,  $V_{F1} = V_{F2} = 1,6\text{V}$ ,  $R_1 =$



$5,2\text{ K}\Omega$ ,  $R_2 = 10,4\text{ K}\Omega$ .

Να υπολογισθεί το ολικό ρεύμα του κυκλώματος καθώς και τα ρεύματα των LED.

- 6.8. Αν η δίοδος LED του σχήματος έχει πτώση τάσης  $2,5\text{V}$ , να ευρεθεί το ρεύμα που την διαρρέει ( $R = 950\ \Omega$ ).



- 6.9. Όταν μια LED εκπέμπει σε μήκος κύματος  $\lambda = 5650\ \text{\AA}$ , τι είναι η φωτεινή ακτινοβολία;

- A. Ορατή  
B. Υπέρυθρη  
Γ. Υπεριώδης.

- 6.10. Να ευρεθούν από τον πίνακα 6.1.2 οι τύποι και τα χαρακτηριστικά των κόκκινων LED.
- 6.11. Από τον πίνακα 6.3.1 να ευρεθούν τα χαρακτηριστικά της φωτοδίοδου με την μικρότερη χωρητικότητα.