



# ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

## Μάθημα 6ο Φωτοπηγές Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι LED

Αρ. Τσίπουρας, Phd  
Email: [aris@di.uoa.gr](mailto:aris@di.uoa.gr)



# Περιεχόμενα

- Παραγωγή φωτός
- Απαιτούμενα χαρακτηριστικά φωτοπηγών
- Λειτουργία LED



# Εκπομπή φωτός - Φωταύγεια

**Luminescence** = εκπομπή φωτός ως αποτέλεσμα ηλεκτρονικής διέγερσης

<b>Photoluminescence:</b>	optical excitation
<b>Catholuminescence:</b>	excitation by electron irradiation
<b>Electroluminescence:</b>	excitation by current



# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΠΗΓΩΝ

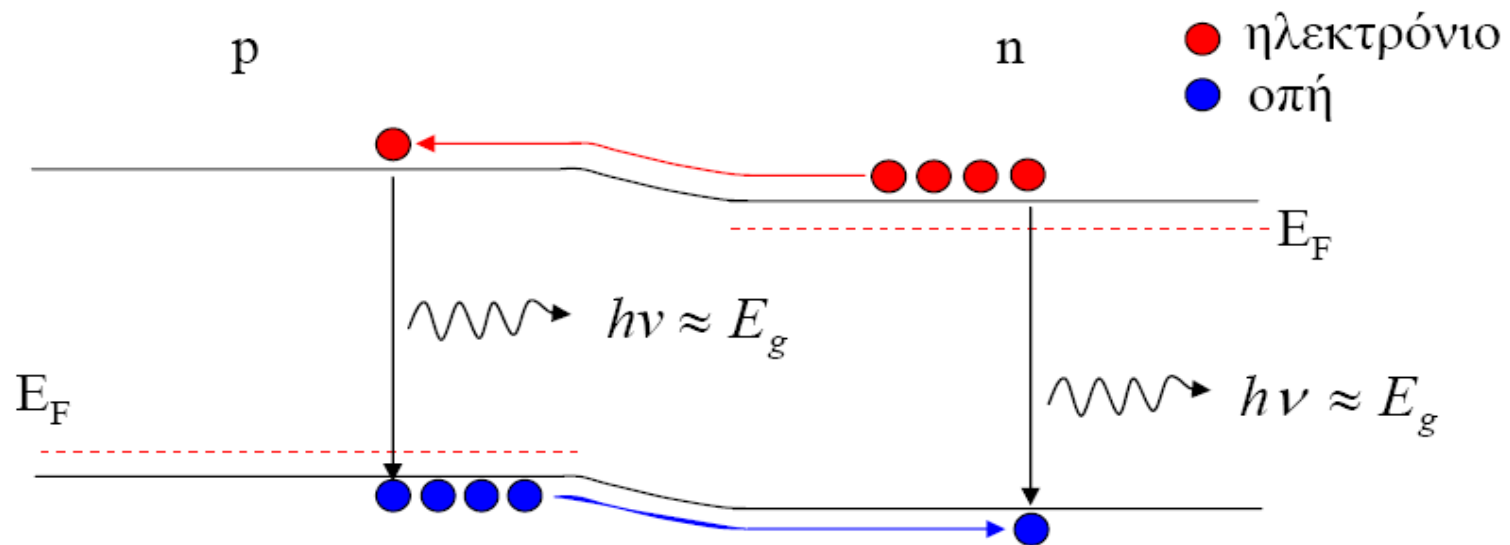
Οι φωτοπηγές που χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα (τάση ή ρεύμα) σε οπτικό και πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Εκπομπή ακτινοβολίας στην περιοχή όπου η οπτική ίνα παρουσιάζει τη μικρότερη απορρόφηση και διασπορά
- Χρήση απλού τρόπου διαμόρφωσης
- Γραμμική Μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε οπτικό σήμα και σύζευξη με την οπτική ίνα με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο
- Μονοχρωματικότητα
- Έλεγχος του εκπεμπόμενου μήκους κύματος της πηγής με την επιβολή μιας τάσης ή ενός ρεύματος
- Χαμηλό κόστος



# Δίοδος εκπομπής φωτός LED I

- Διάταξη που εκπέμπει φως αυθόρμητα λόγω έγχυσης των

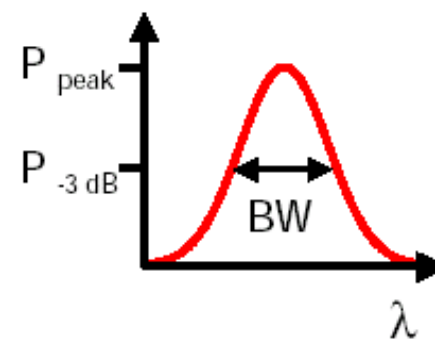
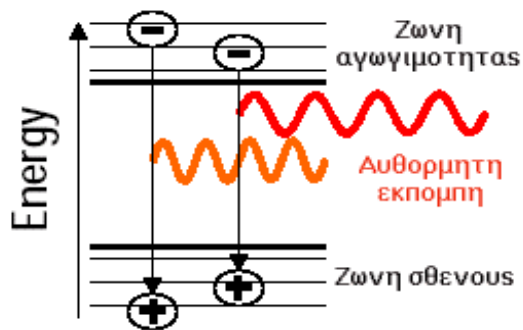
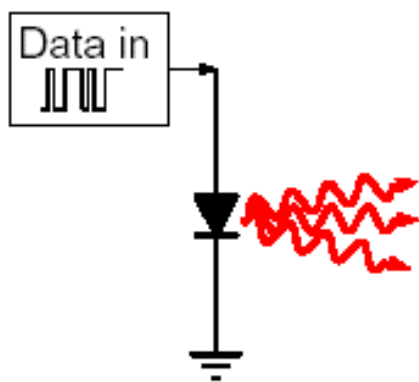
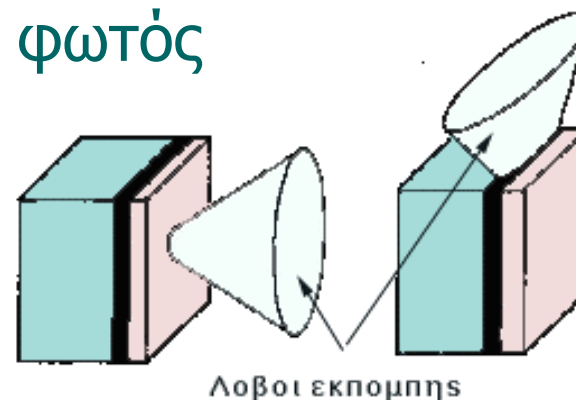
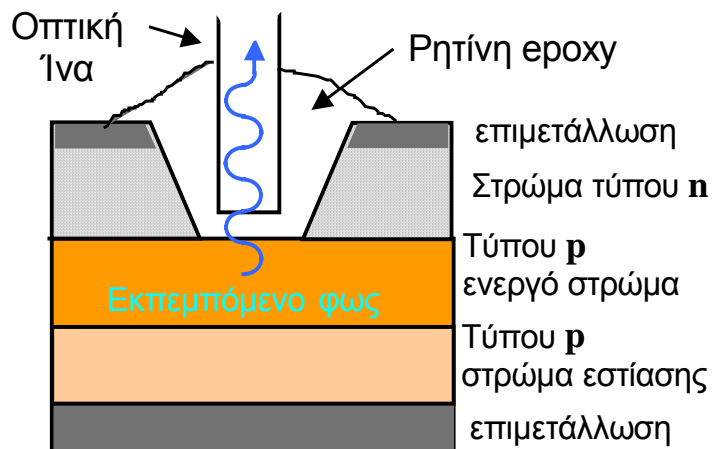


- έγχυση των φορέων μειονότητας μέσω της επαφής p-n οδηγεί στην ακτινοβόλα επανασύνδεση (electroluminescence) των ηλεκτρονίων (ΖΑ) με οπές (ΖΣ).
- το επικρατές μήκος κύματος εκπομπής προσδιορίζεται από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού που χρησιμοποιείται στο LED.



# Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι LED II

- ✓ Διέγερση – με ορθή πόλωση
- ✓ Αυθόρμητη Εκπομπή
- ✓ Εκπομπή φωτός





## Εσωτερική κβαντική απόδοση

- Ικανότητα μετατροπής ζευγών ηλεκτρονίων-οπών σε φωτόνια :

ισχύς του φωτός

ρεύμα στην επαφή

$$\eta_{\text{int}} = \left( \frac{P_{LED, \text{int}}}{h\nu} \right) / \left( \frac{I_{LED}}{e} \right) \quad \text{πραγματική απόδοση}$$

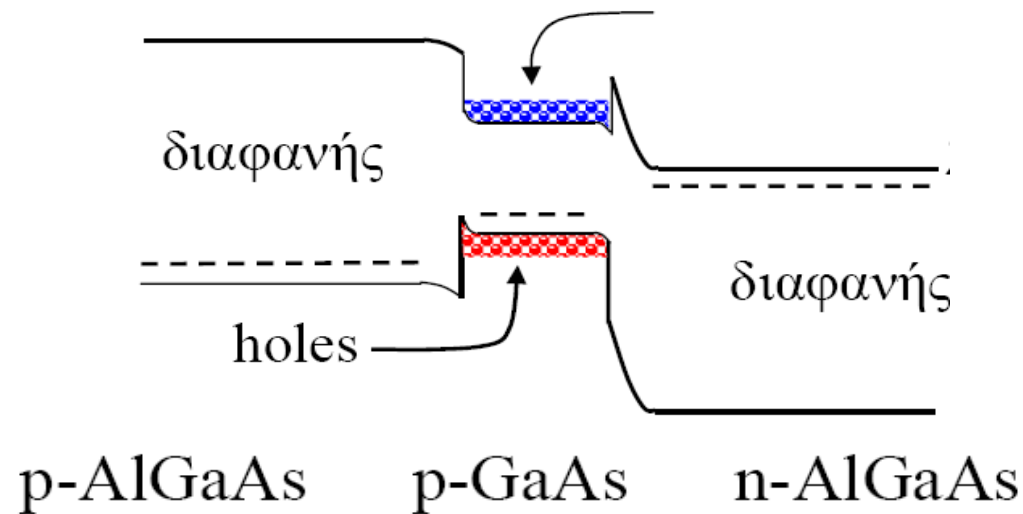
- Για μεγαλύτερη απόδοση: θα πρέπει όλοι οι φορείς μειονότητας που εκχύνονται μέσω επαφής p-n να επανασυνδέονται
- Αν  $\eta_{\text{ext}}$  το ποσοστό των φωτονίων που βγαίνουν από τη διάταξη:

$$P_e = \eta_{\text{ext}} P_{\text{int}}$$



## Βελτίωση $n_{int}$

- Το  $n_{int}$  μπορεί να αυξηθεί με τον χωρικό περιορισμό των ηλεκτρονίων και οπών σε μία σχετικά μικρή ζώνη (active region). Αυτό επιτυγχάνεται με το **LED ετεροδομής**. Επιπλέον, τα παραγόμενα φωτόνια δεν κινδυνεύουν από επαναπορρόφηση, γεγονός που αυξάνει την συνολική απόδοση της διάταξης



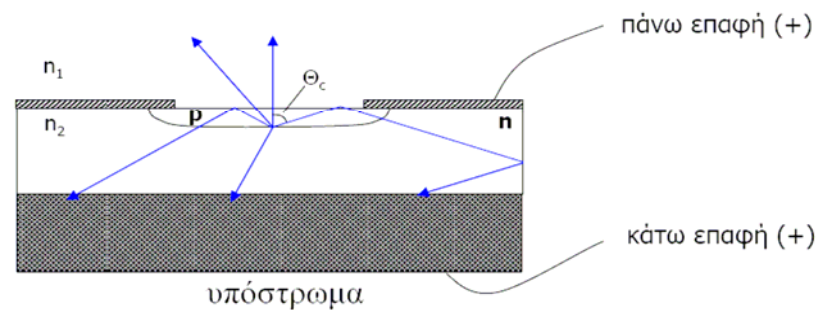
- Τελικά αυτό που μας ενδιαφέρει είναι το ποσοστό των φωτονίων που βγαίνουν από τη διάταξη  $n_{ext}$  :

$$P_e = n_{ext} P_{int}$$





# Εξωτερική κβαντική απόδοση



- Η εξωτερική κβαντική απόδοση  $\eta_{\text{ext}}$  μετράει τον αριθμό των φωτονίων που τελικά διαφεύγουν από τη δομή της διόδου LED
  - $\eta_{\text{ext}} = n^{-1}(n+1)^{-2}$  (τυπικές τιμές 1.4%)
  - Μηχανισμοί απώλειας που επηρεάζουν την εξωτερική κβαντική απόδοση:
    - (1) απορρόφηση μέσα στο LED
    - (2) απώλειες Fresnel: ένα μέρος του φωτός ανακλάται πίσω, συντελεστής ανάκλασης:  $R = \{(n_2 - n_1) / (n_2 + n_1)\}$
    - (3) απώλειες ολικής ανάκλασης: όλο το φως ανακλάται πίσω όταν  $\theta > \theta_c$  με  $\theta_c = \sin^{-1}(n_1/n_2)$  κρίσιμη γωνιά
- [π.χ.  $\theta_c = 17^\circ$  για διεπιφάνεια GaP/αέρα με  $n_2 = 3.45$ ,  $n_1 = 1$ ]

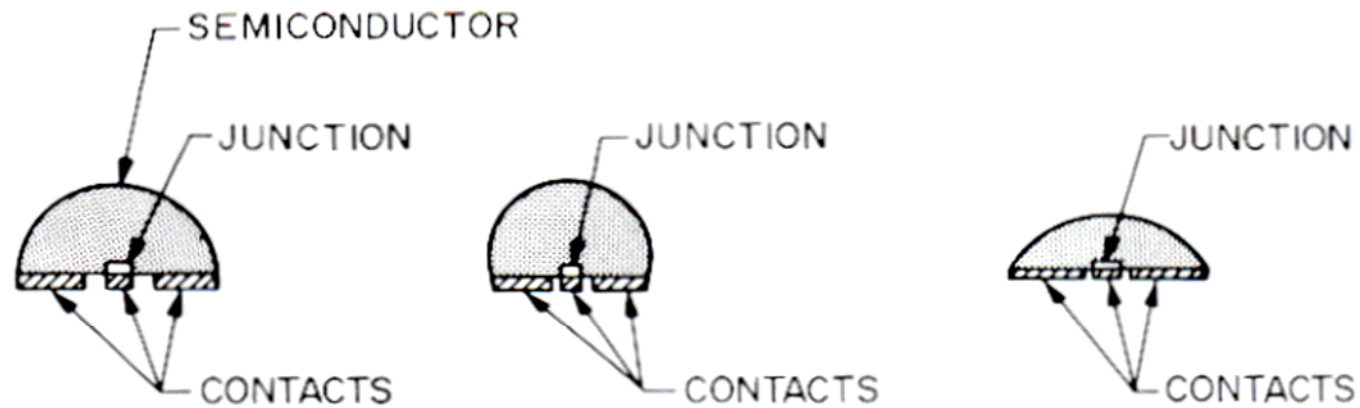


# Ολική κβαντική απόδοση

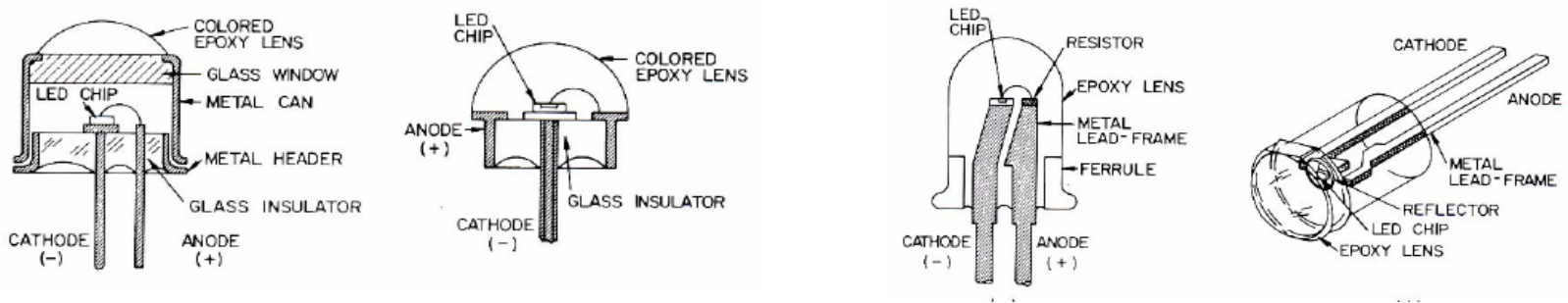
- Μια σημαντική παράμετρος αξιολόγησης μιας LED είναι το ποσοστό της προσφερόμενης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{elec}$  που μετατρέπεται τελικά σε εκπεμπόμενη ακτινοβολία  $P_e$ :  $\eta_{tot} = P_e / P_{elec}$
- $\eta_{tot} = \eta_{ext} \eta_{int} (h\nu / qV_0)$ , Όπου  $P_{elec} = V_0 I$
- Άλλη σημαντική παράμετρος αξιολόγησης μιας LED είναι η αποκρισιμότητα – Responsivity  $R$ :
- $R = P_e / I$
- Εύκολα μπορεί να αποδειχτεί ότι:
- $R = \eta_{ext} \eta_{int} (h\nu / q)$  (τυπικές τιμές 0.01 W/A)



# Βελτίωση $\eta_{ext}$

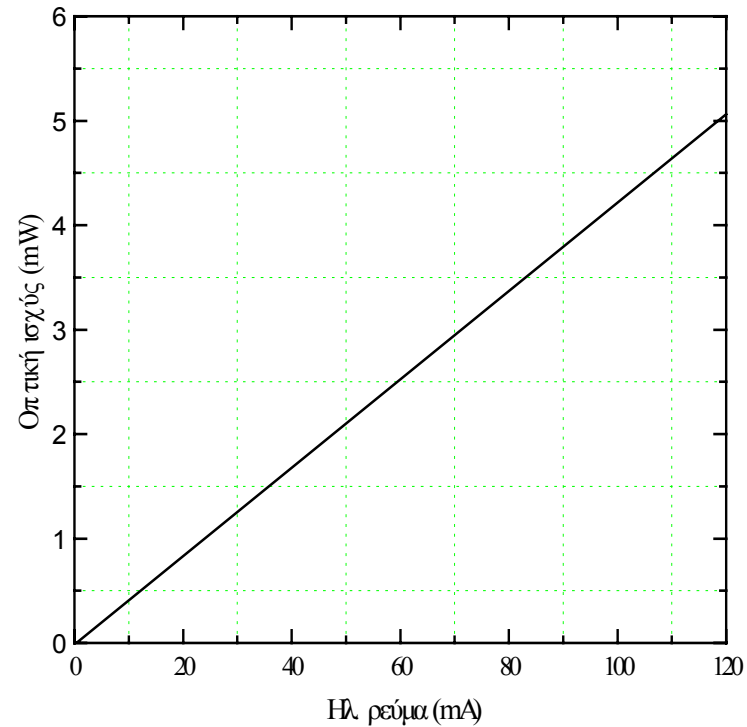


- αλλάζοντας την γεωμετρία του LED μπορούμε να έχουμε επιθυμητή γωνιακή κατανομή του εκπεμπόμενου φωτός





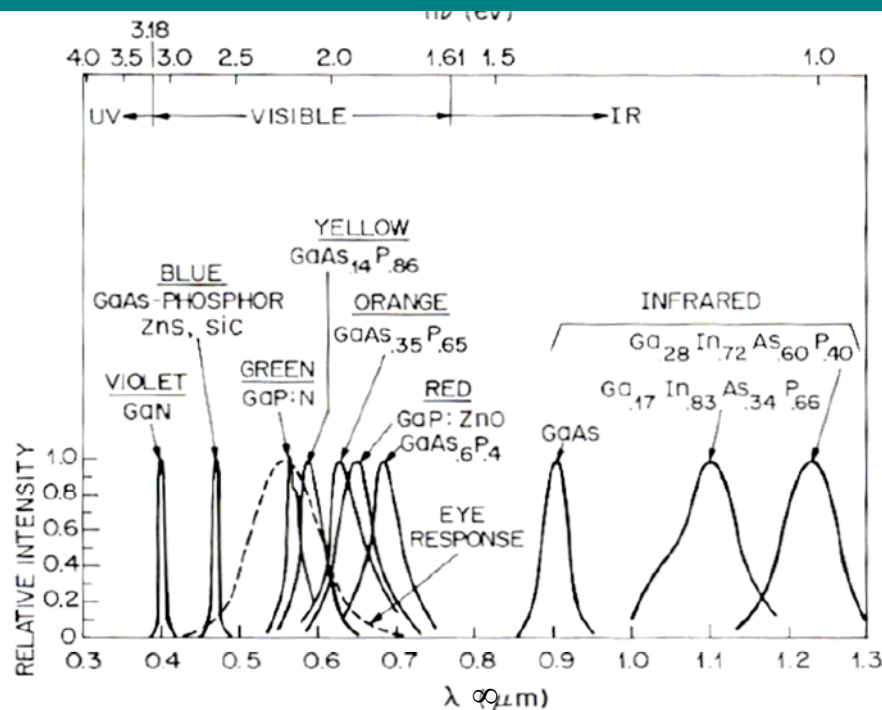
# Λειτουργία LED



- Η χαρακτηριστική P-I εξαρτάται από τη θερμοκρασία:  $T \uparrow P_e \downarrow$
- Στην πράξη για τιμές μεγαλύτερες από 60 mA παύει να είναι γραμμική



# Το φάσμα των LED



- Το φάσμα εκπομπής προσδιορίζεται από την ανηγμένη πυκνότητα καταστάσεων στις Ζώνες αγωγιμότητας και σθένους και την θερμική κατανομή φορέων (κατανομή Fermi-Dirac) κοντά στο ενεργειακό χάσμα

$$R_{\text{spont}}(\omega) = \int_{E_c} A(E_1, E_2) f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)] \rho_{cv} dE_2$$

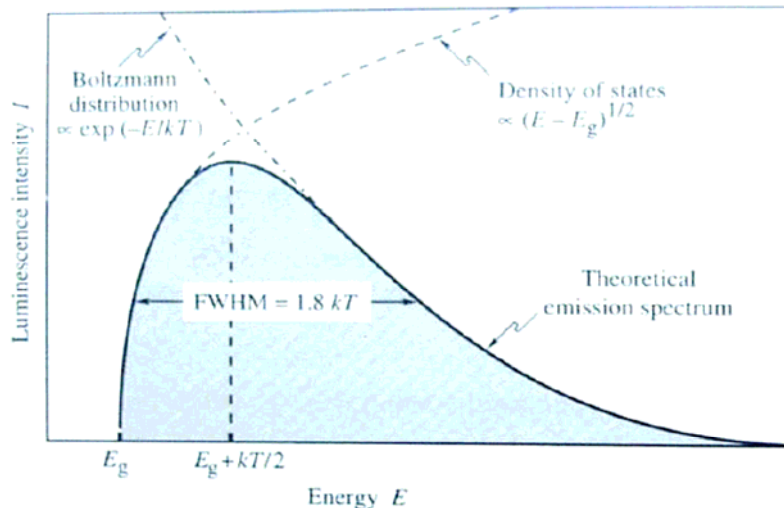
$$R_{\text{spont}}(\omega) = A_0 (h\nu - E_g)^{1/2} \exp[-(h\nu - E_g) / K_B T]$$

$$R_{\text{spont}}(\nu) : \text{μεγιστοποιείται όταν } \nu = \nu_0 = (E_g + K_B T / 2) / h$$



# Εύρος γραμμής των LED δλ

- Εύρος γραμμής (linewidth) δλ: το εύρος των μηκών κύματος εκπομπής γύρω από  $\lambda_0 = c_0/v_0$
- Αποδεικνύεται ότι: 
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \Delta\nu$$
- Όπου  $\Delta\nu$  είναι το FWHM: 
$$\Delta\nu = 1.8K_B T / h$$
- Τυπικές τιμές για GaAs LED  $\Delta\nu = 10-12$  THz



Θεωρητικό φάσμα εκπομπής LED



# Δυναμική συμπεριφορά των LED I

- Οι φορείς εγχέονται και επανασυνδέονται στο ενεργό layer της επαφής κατά ζεύγη
- Άρα είναι αρκετό να θεωρήσουμε τις σχέσεις που συνδέουν τον ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης ενός φορέα (rate equation):

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} \quad I = I_b + I_m \exp(i\omega_m t)$$

- Η λύση της παραπάνω είναι:

$$N = N_b + N_m \exp(i\omega_m t)$$



## Δυναμική συμπεριφορά των LED II

- Με :  $N_b = \tau_c I_b / qV$        $N_m(\omega_m) = \frac{\tau_c I_m / qV}{1 + i\omega_m \tau_c}$

- ΣΥΝΕΠΩΣ:  $H(\omega_m) = \frac{N_m(\omega_m)}{N_m(0)} = \frac{1}{1 + i\omega_m \tau_c}$

- Οπτικό εύρος ζώνης:

$$|H(\omega_m)| = \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad f_{3dB} = \sqrt{3}(2\pi\tau_c)^{-1}$$

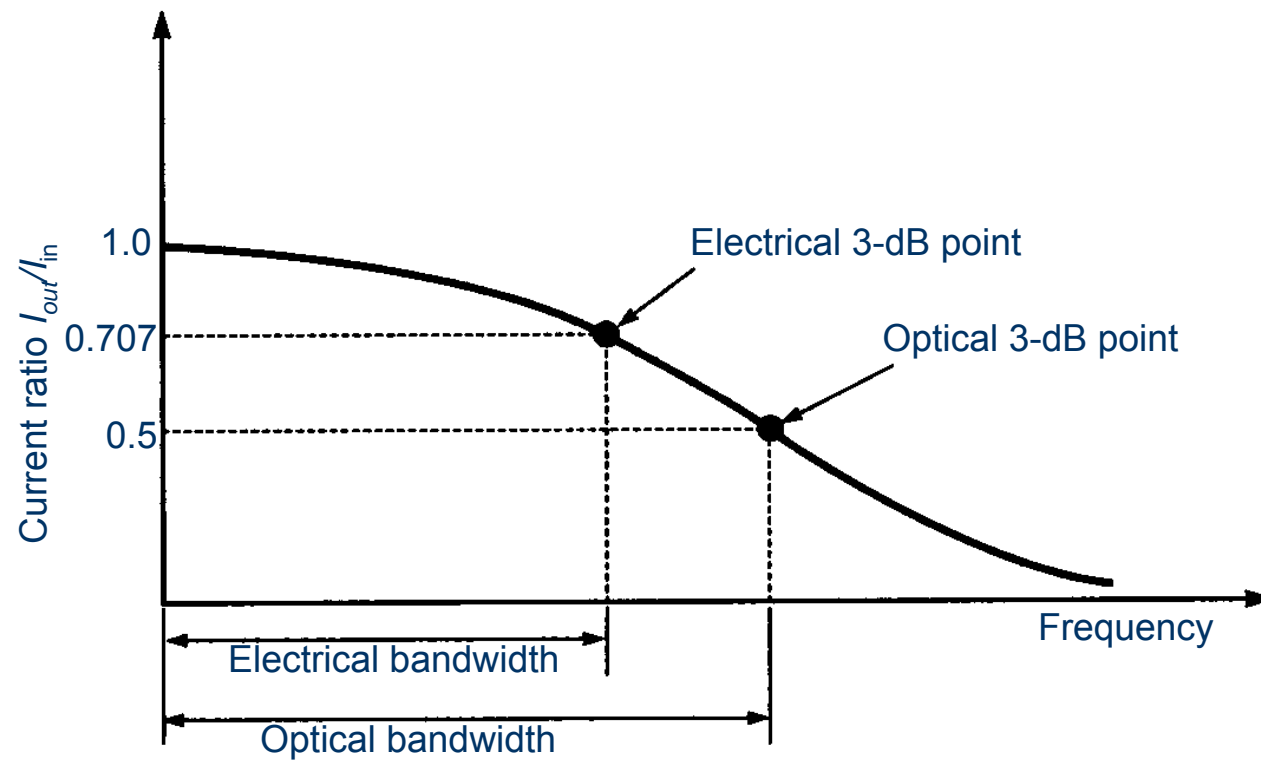
- Τυπικές τιμές για In GaAsP LED:  $\tau_c = 1-10\text{ns}$





# LED Bandwidth

Συνεπώς:  $\Delta f \sim 100 \text{ MHz}$





# Υλικά και εφαρμογές LED

- **GaAs/AlGaAs:** Εκπέμπουν στο υπέρυθρο και χρησιμοποιούνται σε τηλεχειριστήρια και ως πηγές σε δίκτυα LAN (local area communication network)
- **AlGaAs/AlGaAs:** Εκπέμπουν στο κόκκινο και λόγω της μεγάλης φωτεινότητάς τους χρησιμοποιούνται σε φώτα φρένων και φωτεινούς σηματοδότες
- **GaP, GaAsP και GaP:N, GaAsP:N:** Συστήματα ημιαγωγών για εκπομπή στο κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο και πράσινο. Χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή φωτεινότητα, όπως σε φλας αυτοκινήτων (indicator lights). Επίσης χρησιμοποιούνται στα φωτεινά πλήκτρα των τηλεφώνων
- **GaN, GaInN:** Εκπέμπουν στο πράσινο και στο μπλέ. Έχουν μεγάλη φωτεινότητα και χρησιμοποιούνται συνήθως σε φωτεινούς σηματοδότες
- **GaInP:** Εκπέμπουν στο κόκκινο. Χρησιμοποιούνται ως laser pointers και σε DVD players.
- **AlGaInP:** Εκπέμπουν στο πορτοκαλί και στο κίτρινο. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σήμανσης. Το αλουμίνιο προστίθεται για να μειωθεί το μήκος κύματος εκπομπής

