

Composants photoniques



Chapitre 3 : DELs / LEDs

Diodes Electroluminescentes

LEDS

1. Jonction p – n

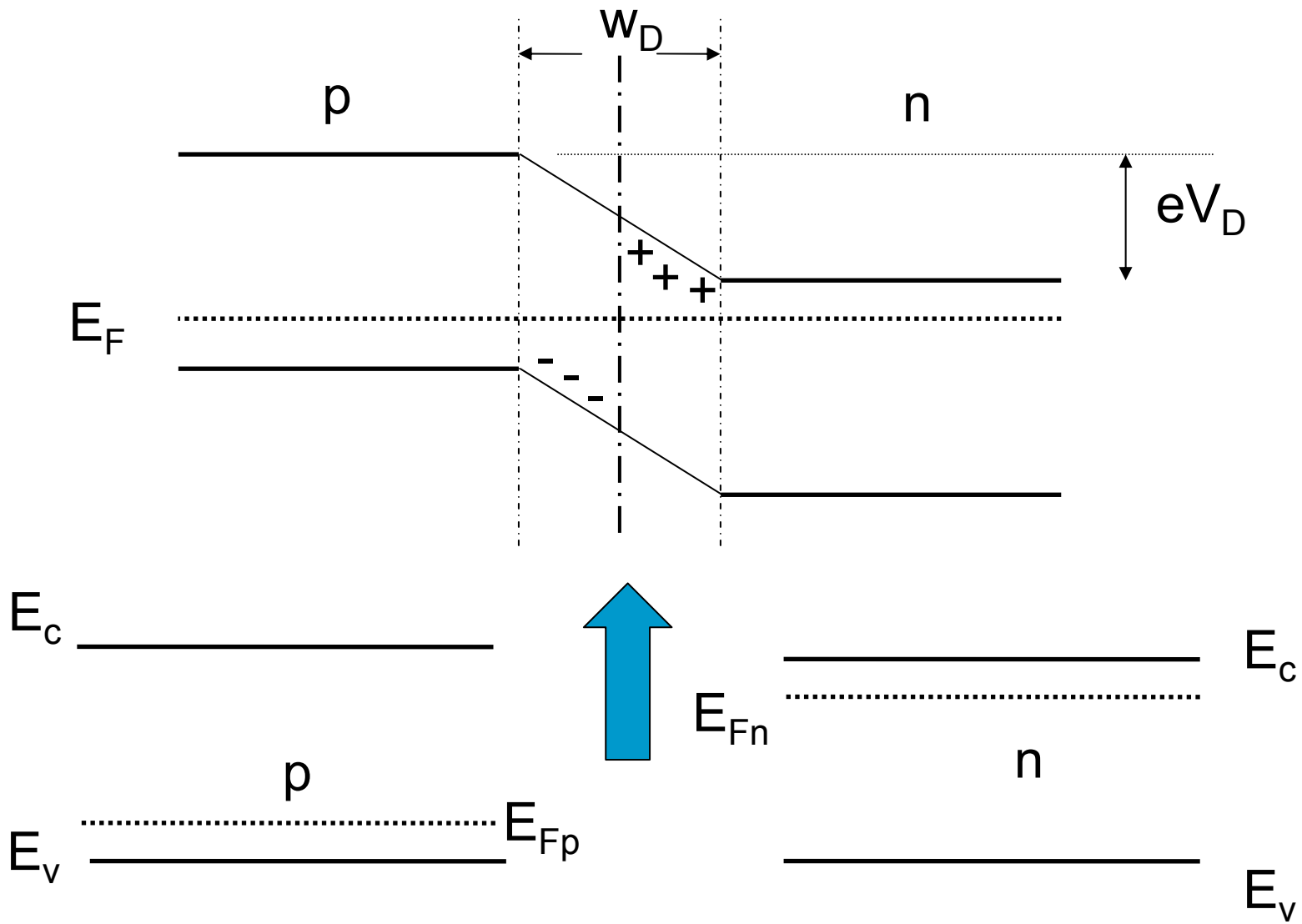
Jonction p – n

- Un semiconducteur (sc) non-intentionnellement dopé est dit intrinsèque. Le niveau de Fermi est alors au milieu du gap.
- Lorsqu'on dope le sc avec un donneur il y a des e^- en excès. Le niveau de Fermi se rapproche de la bande de conduction.
- Lorsqu'on dope le sc avec un accepteur il y a des h en excès. Le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence.

Jonction p – n

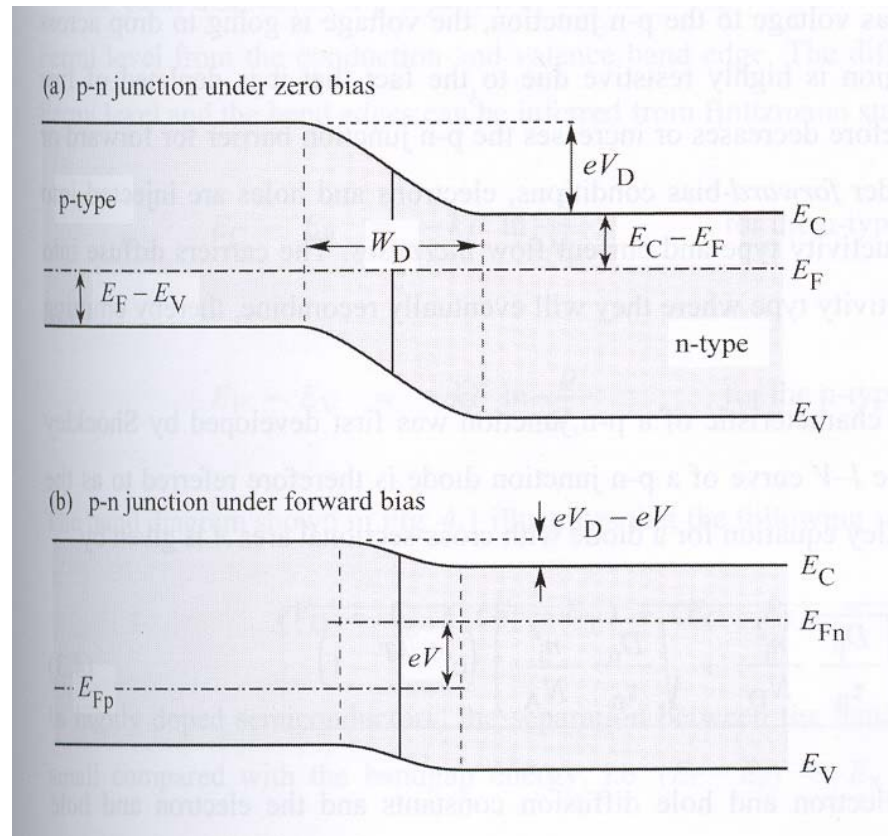
- Lorsqu'on forme une jonction entre un sc n et un sc p, les porteurs de charges se redistribuent de façon à égaliser les niveaux de Fermi à l'équilibre. Des e^- de la zone n diffusent vers la zone p, et réciproquement, des h diffusent de la zone p vers la zone n.
- Il s'établit progressivement un champ électrique qui tend à s'opposer au mouvement des charges. Potentiel de diffusion : V_D
- Les e^- (h) laissent derrière eux des atomes ionisés, cad des ions chargés + (-). Il y a formation d'une zone qui ne contient aucune charge libre : zone déplétée, zone de déplétion, zone de charge d'espace.

Jonction p – n





Jonction p – n

- Lorsqu'on applique une ddp $V > 0$ au pôle +, on polarise la jonction en direct. On rompt l'équilibre en abaissant la barrière de potentiel. Des e^- et des h entrent dans la zone déplétée.



Jonction p – n

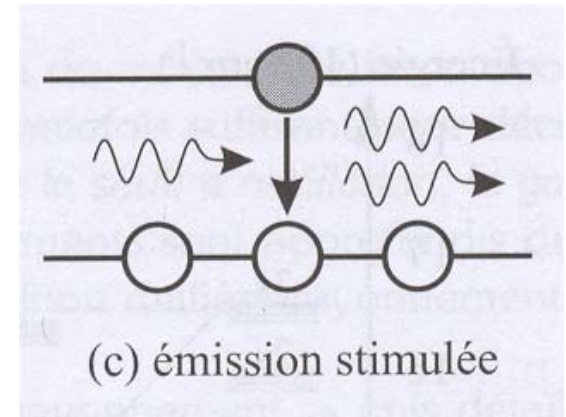
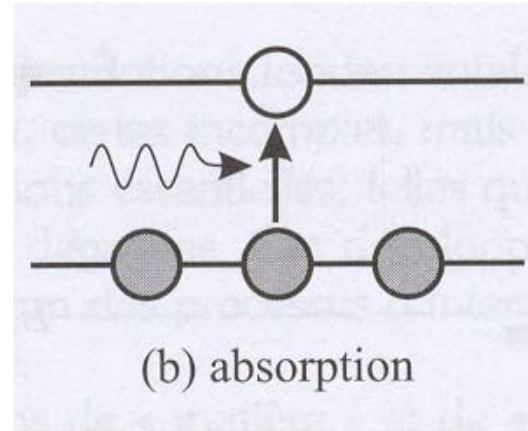
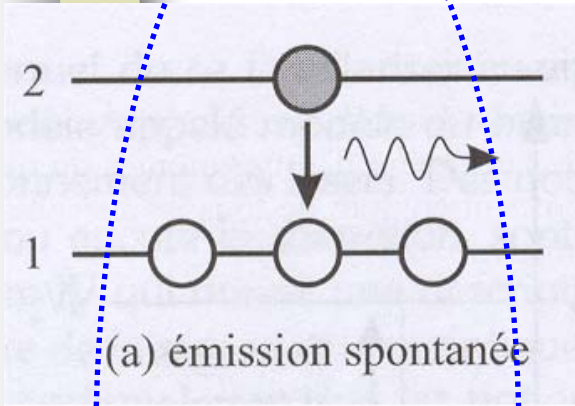
- Le système essaie de revenir vers son état d'équilibre par recombinaisons d' e^- et h dans la zone de jonction.
- Plus V  et plus on s'éloigne de l'équilibre, donc plus il y a de recombinaisons pour revenir vers l'équilibre....
- Si tout va bien : recombinaisons radiatives
 LED

LEDS



2. Rappel : Recombinaisons

Recombinaisons radiatives



LEDs

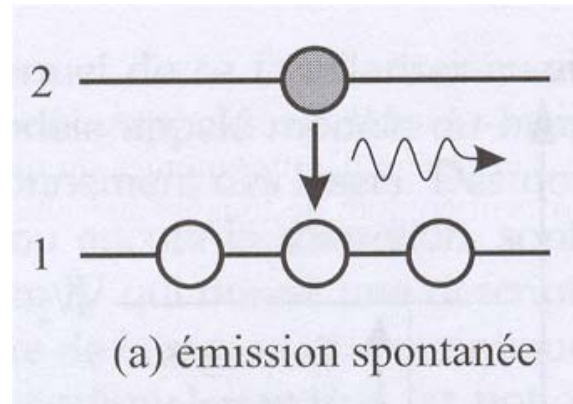


Photodétecteurs



Lasers

Emission spontanée



- L'émission spontanée ne requiert pas la présence préalable d'un champ électromagnétique (de photons).
- L'émission spontanée est un phénomène désordonné, aléatoire. En particulier, toutes les directions d'émission et de propagation sont équiprobables.

Recombinaisons spontanées dans les semiconducteurs

- Recombinaisons non-radiatives « SRH » :
 - Taux de recombinaisons : $R_{\text{SRH}} = A n$
 - durée de vie : τ_{SRH}
- Recombinaisons radiatives :
 - Taux de recombinaisons : $R_{\text{rad}} = B n^2$
 - durée de vie : τ_{rad}
- Recombinaisons non-radiatives « Auger » :
 - Taux de recombinaisons : $R_{\text{Auger}} = C n^3$
 - durée de vie : τ_{Auger}

Recombinaisons spontanées dans les semiconducteurs

- L'ensemble des recombinaisons spontanées est régi par:
- $R = R_{\text{SRH}} + R_{\text{rad}} + R_{\text{Auger}} = An + Bn^2 + Cn^3$.
- Durée de vie des porteurs: τ

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{SRH}}} + \frac{1}{\tau_{\text{rad}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Auger}}}$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{non-rad}}} + \frac{1}{\tau_{\text{rad}}}$$

Recombinaisons spontanées dans les semiconducteurs

- Recombinaisons non-radiatives « SRH » :
 - Dépend de la qualité du matériau, des hétérostructures **élaboration**
- Recombinaisons radiatives :
 - Propriété intrinsèque **choix du semiconducteur
dessin de la structure**
- Recombinaisons non-radiatives « Auger » :
 - Dépend de la structure de bandes **bandgap engineering**

Emission spontanée dans les semiconducteurs

- Pour augmenter les performances d'une LED on va chercher à favoriser l'émission spontanée au niveau de la jonction :
 - Favoriser la « rupture d'équilibre »
 - Favoriser le « recouvrement » $e^- - h$

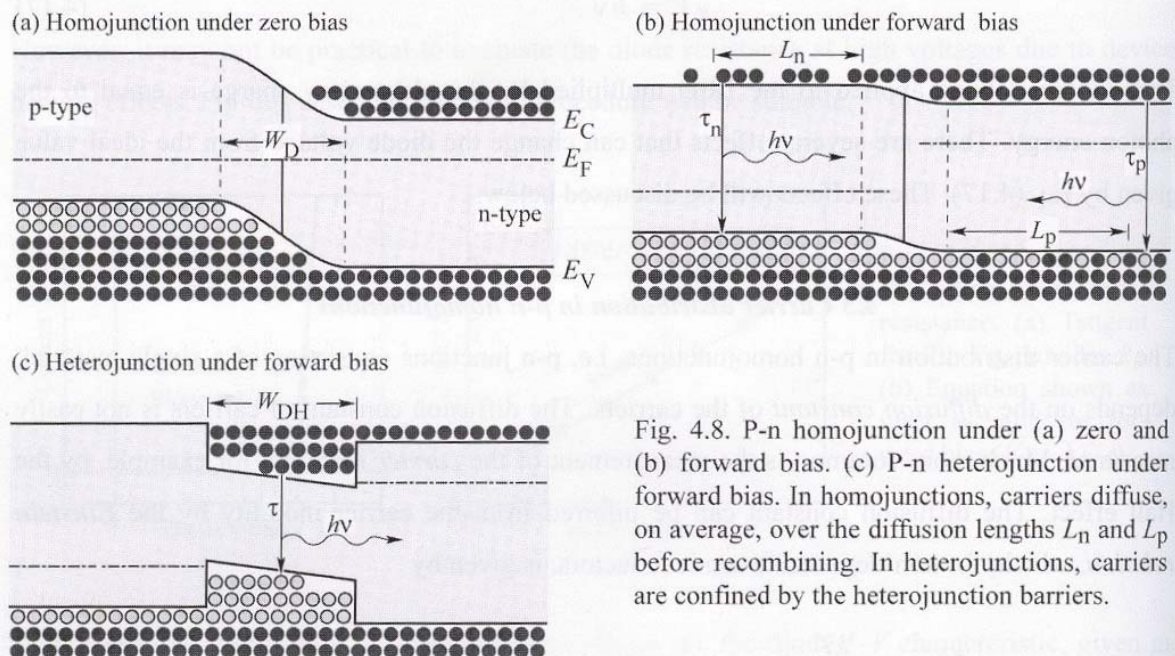


Fig. 4.8. P-n homojunction under (a) zero and (b) forward bias. (c) P-n heterojunction under forward bias. In homojunctions, carriers diffuse, on average, over the diffusion lengths L_n and L_p before recombining. In heterojunctions, carriers are confined by the heterojunction barriers.

LEDS



3. Rendements

Rendement quantique interne

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\text{nbre de photons émis dans la zone active / s}}{\text{nbre d'électrons injectés dans la zone active / s}}$$

$$\eta_{\text{int}} = \frac{P_{\text{int}} / h\nu}{I / e}$$

Avec :

- P_{int} = puissance lumineuse émise par zone active
- $h\nu$ = énergie du photon (de la transition)
- I = courant injecté
- e = charge électron

Rendement quantique interne

$$\eta_{\text{int}} = \frac{R_{\text{rad}}}{R_{\text{rad}} + R_{\text{non-rad}}} = \frac{1/\tau_{\text{rad}}}{1/\tau_{\text{rad}} + 1/\tau_{\text{non-rad}}}$$

ou encore :

$$\eta_{\text{int}} = \frac{1}{1 + \tau_{\text{rad}}/\tau_{\text{non-rad}}}$$



Rendement d'extraction

- Les photons émis par la zone active sont émis de façon aléatoire dans la zone de jonction (émission spontanée).
- Ces photons se propagent dans la LED et peuvent :
 - être re-absorbés : band-gap engineering
 - se réfléchir aux interfaces (en particulier semiconducteur/air)
 - être émis : extraction
- L'extraction des photons est une sévère limitation à la performance des LEDs (cf. exemple plus loin)

Rendement d'extraction

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{\text{nbre de photons sortant de la LED} / \text{s}}{\text{nbre de photons émis par la zone active} / \text{s}}$$

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{P / h\nu}{P_{\text{int}} / h\nu} = \frac{P}{P_{\text{int}}}$$

Rendement quantique externe

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{nbre de photons sortant de la LED} / \text{s}}{\text{nbre d'électrons injectés ds la zone active} / \text{s}}$$

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{P / hv}{I / e} = \eta_{\text{int}} \times \eta_{\text{extraction}}$$

Rendement à la prise

$$\eta = \frac{\text{puissance émise par la LED}}{\text{puissance d'alimentation}} = \text{wall-plug efficiency (WPE)}$$

$$\eta = \frac{P}{IV}$$

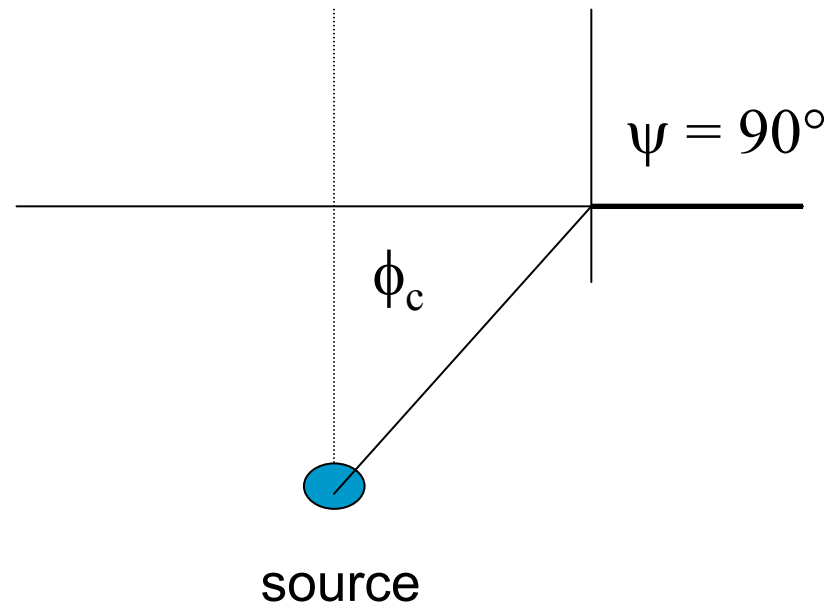
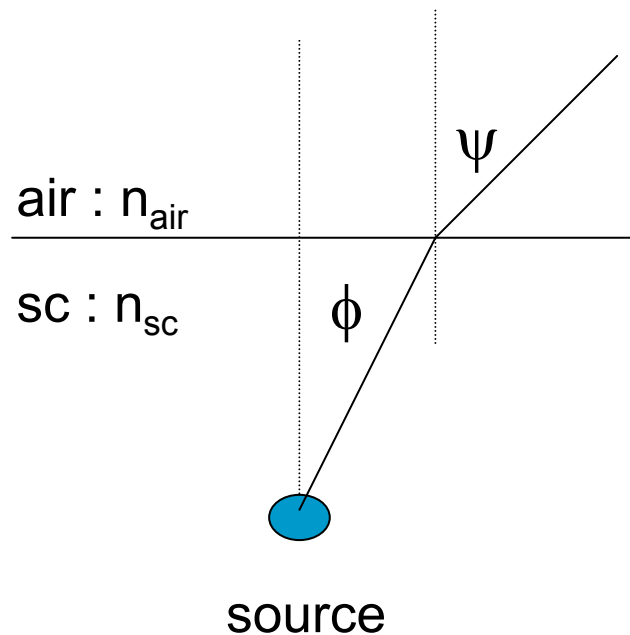
LEDS



4. Rendement d'extraction

Cône d'extraction

- Le rayonnement émis par la zone active va devoir traverser l'interface semiconducteur – air pour être utile....
- Un photon émis ds le cône d'angle $< \phi_c$ va sortir, alors que pour $\phi \geq \phi_c$ il va y avoir réflexion totale.



Cône d'extraction

- Loi de Snell – Descartes :

$$\mathbf{n}_{\text{sc}} \sin \phi = \mathbf{n}_{\text{air}} \sin \psi$$

- Pour l'angle critique ϕ_c : $\psi = 90^\circ$

$$\sin \phi_c = \frac{\mathbf{n}_{\text{air}}}{\mathbf{n}_{\text{sc}}} \times \sin 90 = \frac{\mathbf{n}_{\text{air}}}{\mathbf{n}_{\text{sc}}}$$

- Donc :

$$\phi_c = \arcsin \frac{\mathbf{n}_{\text{air}}}{\mathbf{n}_{\text{sc}}}$$

Probabilité d'échappement des photons

- Considérons une source émettrice ponctuelle.
- Les photons émis dans le cône d'extraction, cad avec $\phi < \phi_c$, sortent du sc, les autres sont totalement réfléchis.
- Tous les photons émis dans ce cône sortent par une calotte sphérique de surface A .

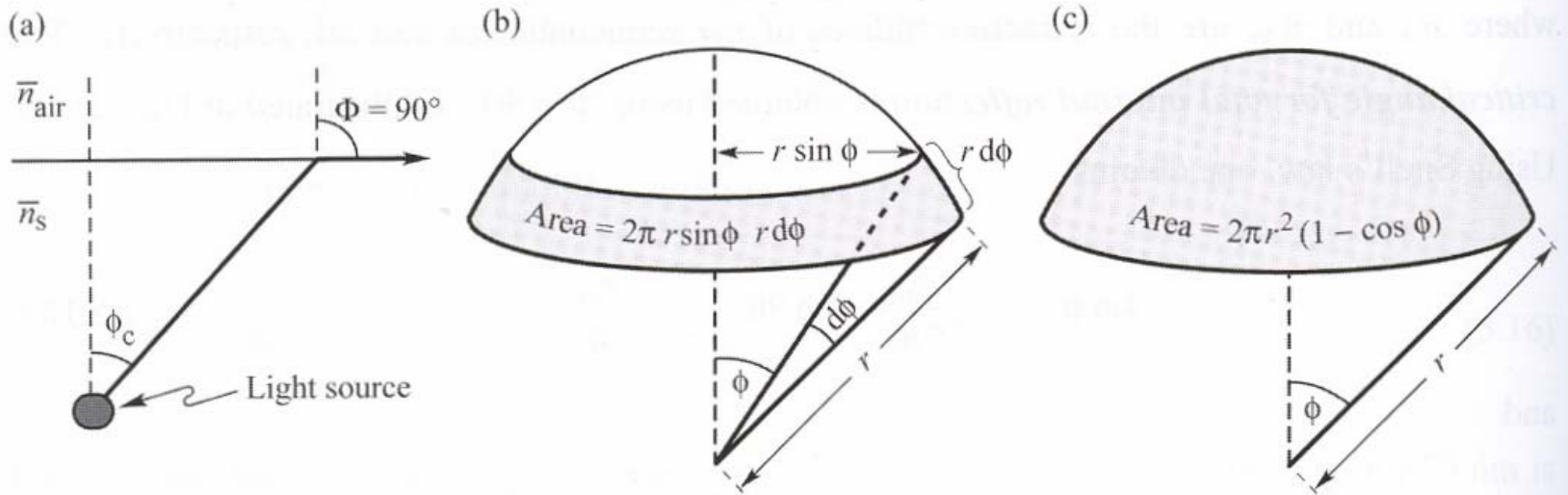


Fig. 5.3. (a) Definition of the escape cone by the critical angle ϕ_c . (b) Area element dA . (c) Area of calotte-shaped section of the sphere defined by radius r and angle ϕ_c .

Probabilité d'échappement des photons

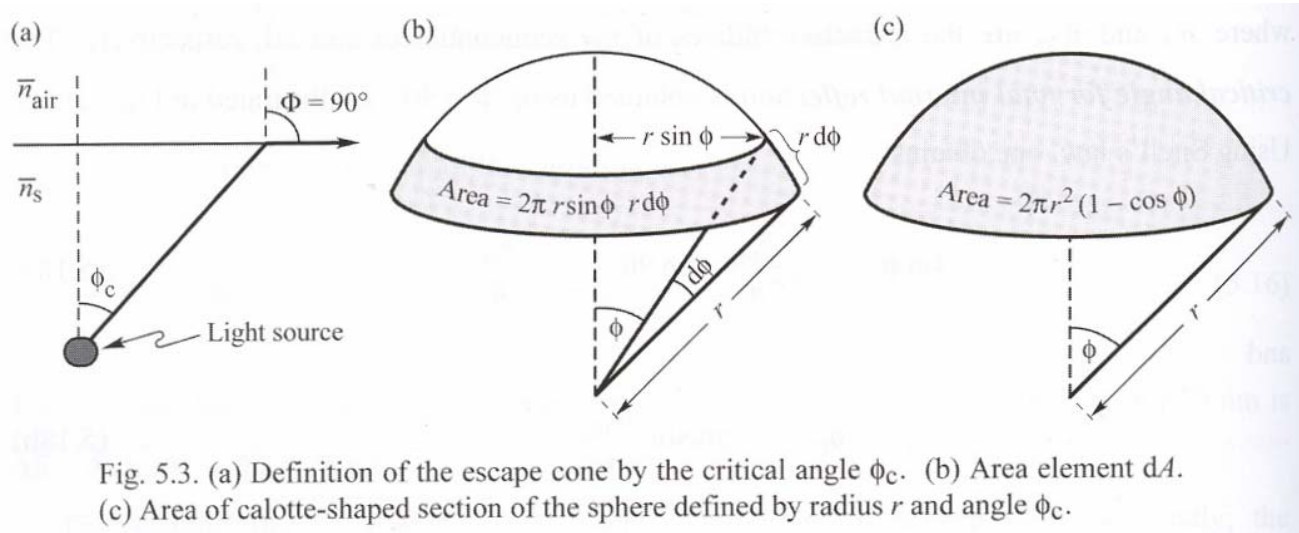


Fig. 5.3. (a) Definition of the escape cone by the critical angle ϕ_c . (b) Area element dA . (c) Area of calotte-shaped section of the sphere defined by radius r and angle ϕ_c .

$$A = \int dA = \int_{\phi=0}^{\phi=\phi_c} 2\pi \cdot r \sin \phi \cdot r \cdot d\phi = 2\pi r^2 (1 - \cos \phi_c)$$

Emission spontanée = émission équiprobable dans toutes les directions de l'espace = surface totale d'émission = $4\pi r^2$.

Probabilité d'échappement des photons

$$P_{\text{extrait}} = P_{\text{source}} \times \frac{2\pi r^2 (1 - \cos \phi_c)}{4\pi r^2}$$

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{P_{\text{extrait}}}{P_{\text{source}}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \phi_c)$$

avec :

$$\phi_c = \arcsin \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{sc}}}$$

Probabilité d'échappement des photons

$$\arcsin x = x + \frac{1}{2} \frac{x^3}{3} + \dots + \frac{(2r)!}{2^{2r} (r!)^2} \frac{x^{2r+1}}{2r+1} + \dots \approx x$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots \approx 1 - \frac{x^2}{2}$$

donc:

$$\phi_c \approx \frac{n_{air}}{n_{sc}} \quad \text{et} \quad \cos \phi_c \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{n_{air}}{n_{sc}} \right)^2$$

Probabilité d'échappement des photons

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \phi_c) \approx \frac{1}{4} \frac{n_{\text{air}}^2}{n_{\text{sc}}^2}$$

- Exemples :
 - GaAs : $n_{\text{sc}} \sim 3.5 \Rightarrow \eta_{\text{extraction}} \sim 2 \% !!$
 - GaN : $n_{\text{sc}} \sim 2.5 \Rightarrow \eta_{\text{extraction}} \sim 4 \% !!$
- Si on utilise un sc « nu » le rendement d'extraction est toujours très faible.
- Il faut alors adapter la géométrie du composant, l'encapsuler, etc.. pour augmenter $\eta_{\text{extraction}}$.

LEDS



5. Amélioration du rendement d'extraction

Encapsulation avec dôme epoxy

$$\eta_{\text{extraction}} \approx \frac{1}{4} \frac{n_{\text{air}}^2}{n_{\text{sc}}^2} \Rightarrow \eta_{\text{extraction}} \uparrow \text{si } n_{\text{air}} \uparrow$$

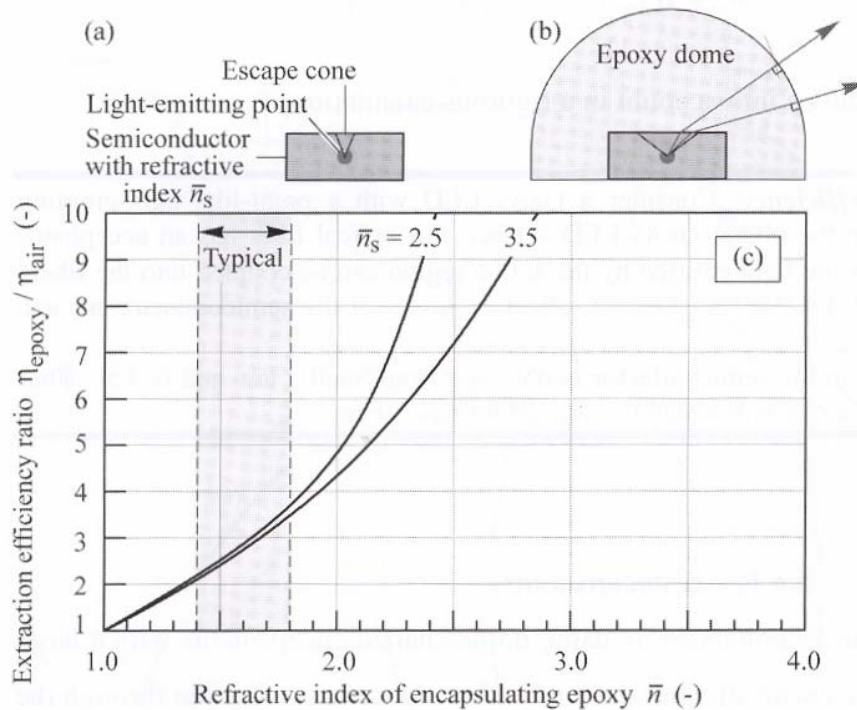
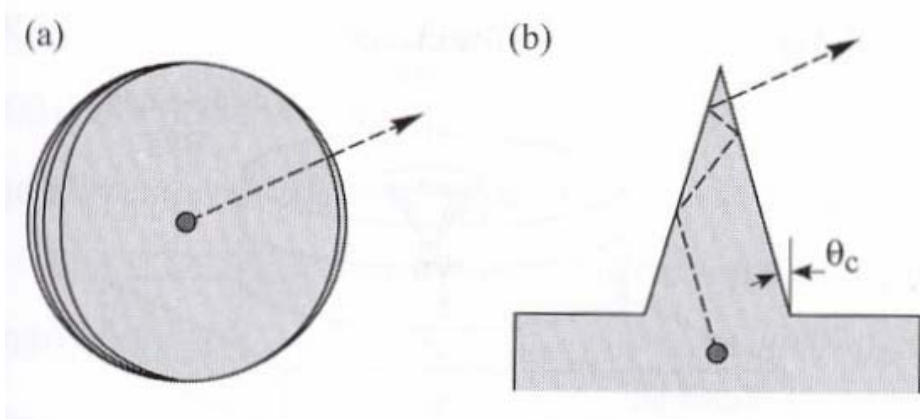
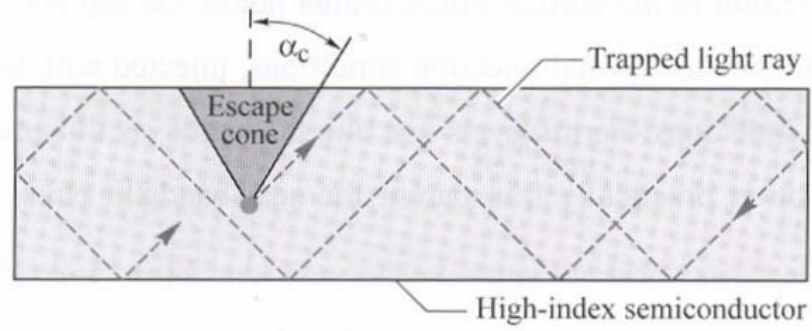
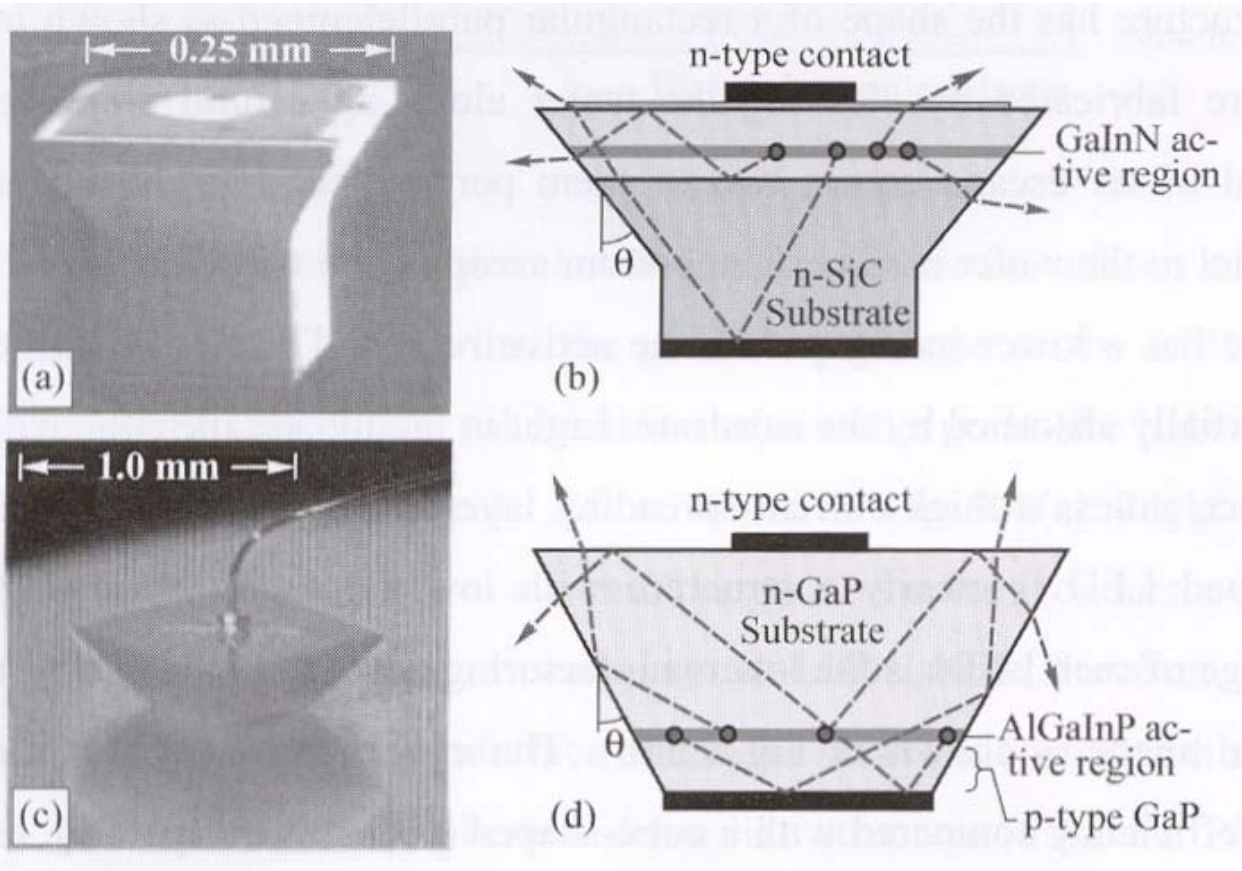


Fig. 5.6. LED (a) without and (b) with dome-shaped epoxy encapsulant. A larger escape angle is obtained for the LED with an epoxy dome. (c) Calculated ratio of light extraction efficiency emitted through the top surface of a planar LED with and without an epoxy dome. The refractive indices of typical epoxies range between 1.4 and 1.8 (adapted from Nuese *et al.*, 1969).

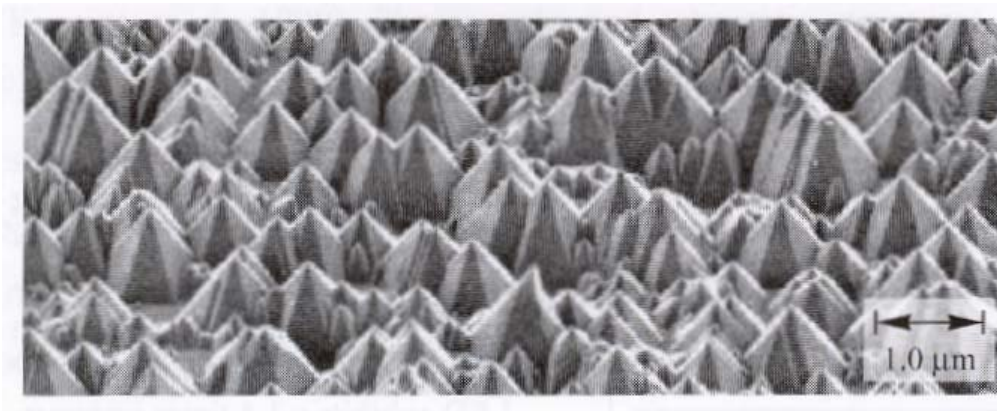
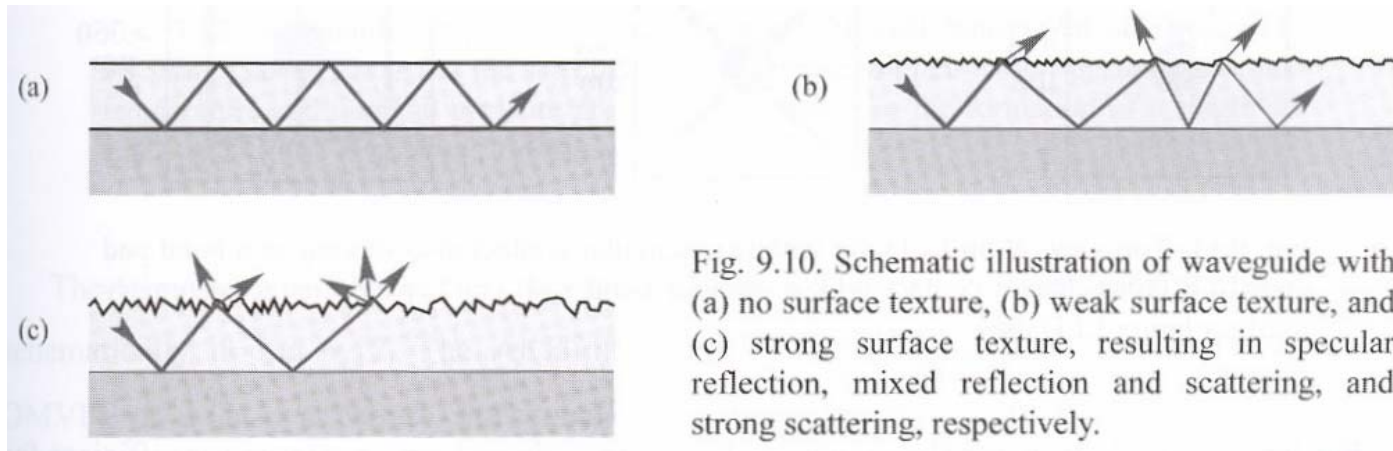
Forme de la LED



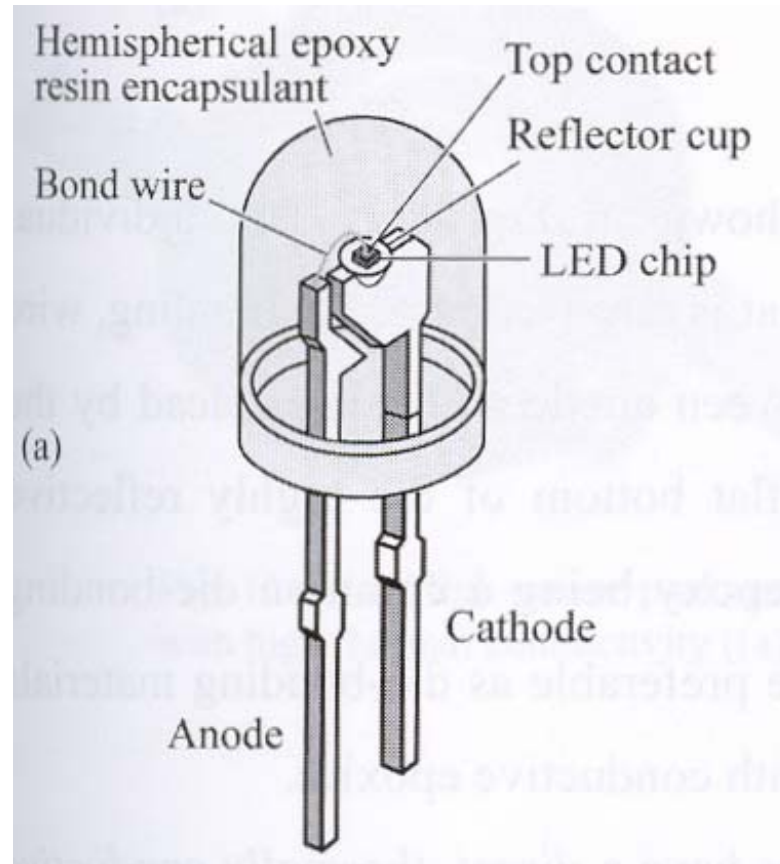
Forme de la LED



Texturation de la surface



Packaging



LEDS

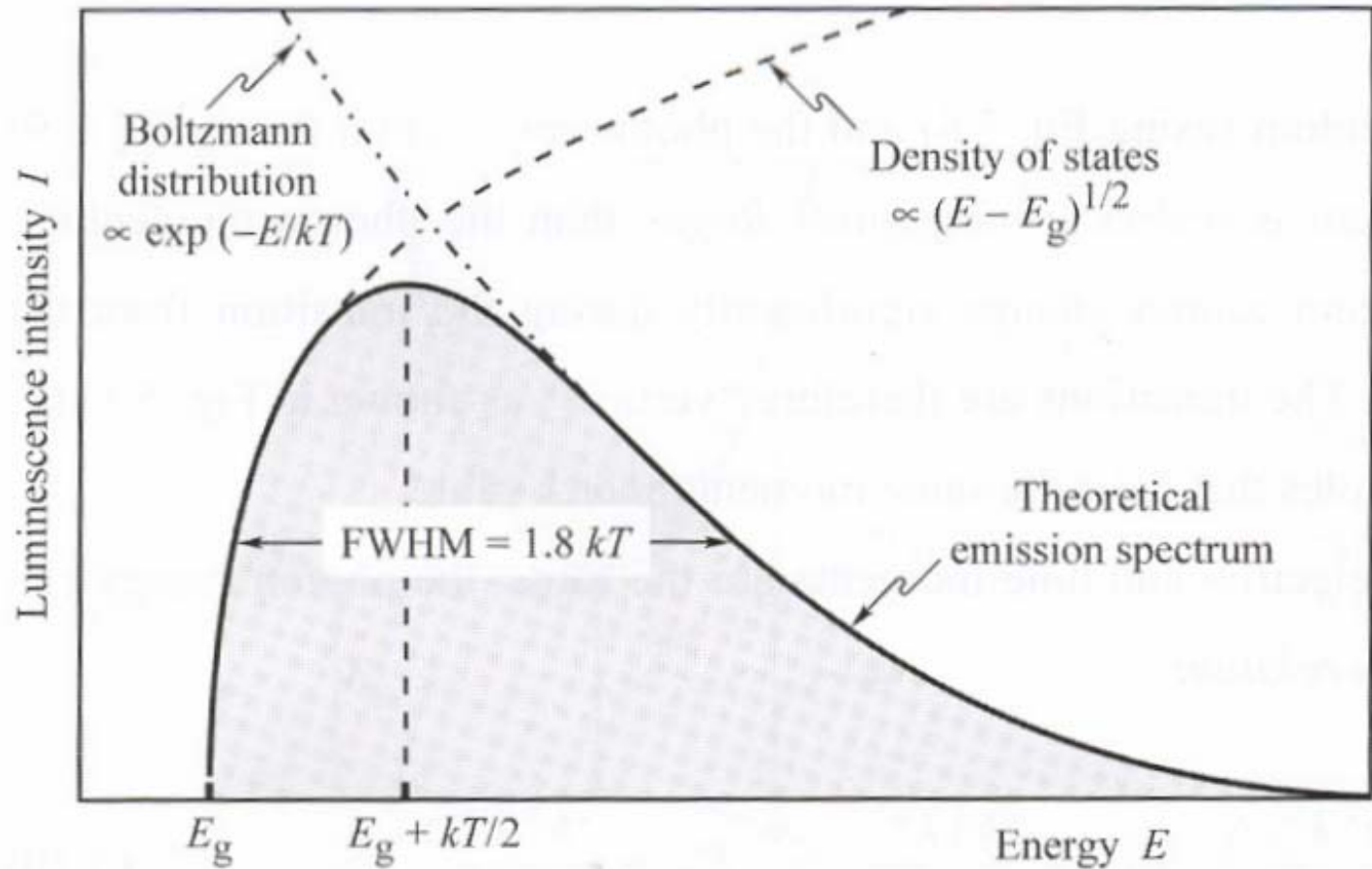


6. Spectre d'émission

Spectre d'émission

- Le spectre émis dépend du gap du sc émetteur et de la température de fonctionnement du composant.
- En prenant en compte la densité d'états et le distribution des porteurs on montre que le spectre d'émission a les propriétés suivantes :
 - largeur à mi-hauteur : $\text{FWHM} = 1.8 \text{ kT}$
 - maximum d'émission : $E = E_g + \frac{1}{2} \text{ kT}$

Spectre d'émission



Spectre d'émission

$$\text{FWHM} = \Delta(h\nu) = 1.8kT$$

$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{h\nu(\text{eV})} \Leftrightarrow h\nu = \frac{1.24}{\lambda}$$

$$d(h\nu) = -\frac{1.24}{\lambda^2} d\lambda$$

$$d\lambda = -\frac{\lambda^2}{1.24} d(h\nu)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{1.24} \Delta(h\nu)$$

$$\Delta\lambda = 1.45 \lambda^2 kT$$

Spectre d'émission

$$\Delta\lambda = 1.45 \lambda^2 kT$$

Plus la longueur d'onde émise est grande, plus le spectre émis est large :

- $\lambda = 450 \text{ nm} \Rightarrow \Delta\lambda = 8 \text{ nm}$
- $\lambda = 650 \text{ nm} \Rightarrow \Delta\lambda = 18 \text{ nm}$
- $\lambda = 1.3 \text{ }\mu\text{m} \Rightarrow \Delta\lambda = 64 \text{ nm}$

N.B.: cette largeur du spectre émis reste inférieure à la perception « monochromatique » de l'œil humain.

Ex: « rouge » ~ 630 – 730 nm