

## II. Diode électroluminescente (DEL)

### Introduction :

Les constructeurs proposent une large gamme de diodes électroluminescentes, dont l'utilisation va de la simple LED (Light emitting Diode) de signalisation jusqu'aux LED d'émission utilisés en télécommunication

Les LED sont considérées comme une technologie d'avenir dans le domaine de l'éclairage général. Elles pourraient représenter 75 % du marché de l'éclairage à la future. Elles sont aussi utilisées dans la construction des [écrans plats](#) de télévision : pour le [rétroéclairage](#) des [écrans à cristaux liquides](#).

### Diode électroluminescente

#### 1. le principe d'une diode électroluminescente

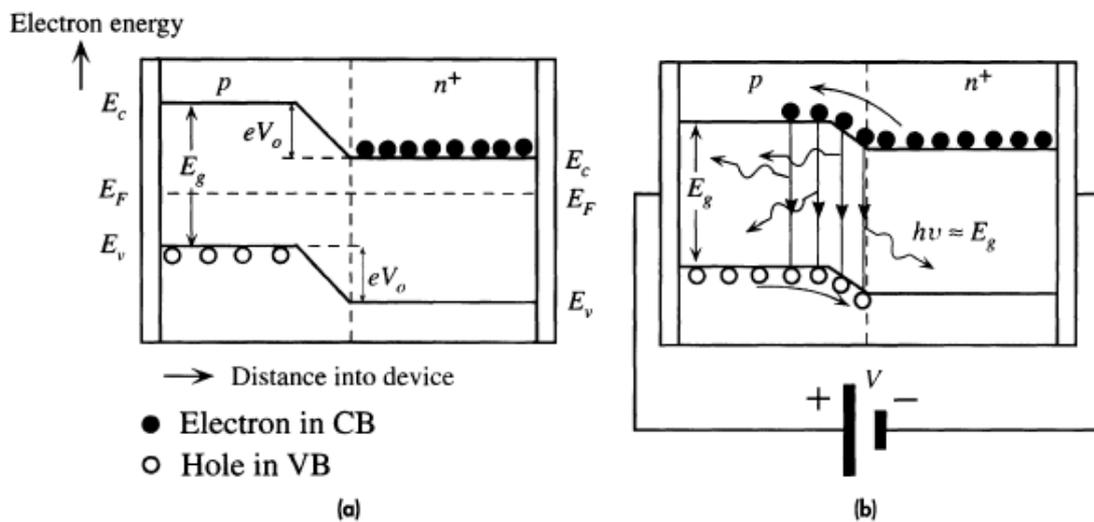
Une diode électroluminescente est un dispositif optoélectronique capable d'émettre de la [lumière](#) lorsqu'il est parcouru par un [courant électrique](#). Ce dispositif est basé sur une jonction pn polarisée en direct. Le semiconducteur utilisé est un semiconducteur à gap direct. La recombinaison d'un pair électron - trou donne une **émission d'un photon**. Un exemple d'une diode électroluminescente est GaAs. L'énergie du photon émis ( $h\nu$ ) approximativement égale l'énergie du gap  $E_g$ .

$$\lambda(nm) = \frac{hc}{E_g(eV)} = \frac{1240}{E_g(eV)}$$

La figure II.1 montre le diagramme des bandes d'énergie d'une jonction  $pn^+$ , dans laquelle la zone **n** est plus dopée que la zone **p**.

A l'équilibre thermodynamique (hors tension) le niveau de Fermi est aligné au long de la jonction pn. La zone de déplétion est étendue principalement dans la zone p.

Comme dans le cas d'une jonction pn classique, il y aura une barrière potentielle  $V_0$  entre  $E_c$  dans la zone n et  $E_c$  dans la zone p. L'énergie potentielle  $eV_0$  stop la diffusion des électrons de la zone n vers la zone p.



**Figure I.1 Diagramme des bandes d'énergie dans une jonction pn<sup>+</sup> :**  
**a : à l'équilibre thermodynamique.**  
**b : Polarisation direct, recombinaison autour de la jonction et à travers la**  
**longueur de diffusion des électron dans la zone p donne une émission des photons.**

La polarisation directe de la jonction pn avec une tension V réduit la barrière potentielle à  $V_0 - V$ , ce qui permet aux électrons de diffuser de la zone n<sup>+</sup> et injecter dans la zone p comme il est montré dans la figure I.1.b. Les trous aussi sont injectés dans la zone n mais avec un taux faible dû à la faible concentration du dopage p. La recombinaison des électrons injectés à travers la zone de déplétion et à travers le volume étendu à une longueur  $L_e$  dans la zone p donne une émission du photon. Les photons émis ont des directions arbitraires.

La structure du LED doit être d'une façon que les photons émis peuvent être échappés du composant sans avoir réabsorbés par le semi-conducteur. Cette condition peut être assurée par diminution de la largeur de la zone p ou bien par l'utilisation d'une hétérostructure.

Un des plus simple LED est montré dans la figure II.2 : la première couche dopé (n) du semiconducteur est déposée sur un substrat convenable (GaAs ou GaP) ; la structure du couche est suivi la structure du substrat. L'épaisseur du substrat est assez épaisse pour être un support mécanique du composant (LED). La 2ème couche dopé p du semiconducteur est déposée sur la 1ère couche.

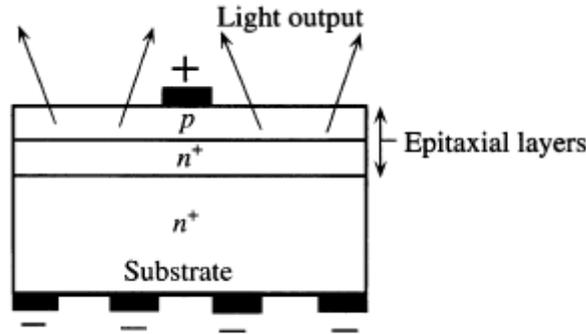


Figure II.2 Une schéma d'un LED : l'épaisseur de la couche p est petit.

Si la structure des couches et celle du substrat ne sont pas convenable on aura des contraintes dans le LED et conduit à la diminution des recombinaisons électrons-trous. Si on prend par exemple le semiconducteur AlGaAs, qu'est un semiconducteur à gap direct sont énergie est dans l'intervalle d'émission rouge ; ce semiconducteur peut être déposé sur un substrat de GaAs, parce que ils ont des structure convenable et on aura un LED très efficace.

Les alliages ternaires III-V :  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ , qui base sur les deux semiconducteurs : GaAs et GaP couvrent l'émission sur tous le spectre lumineux. Ils présentent un classe commercial important dans la fabrication des LED.

Dans ce type d'alliages les atomes de As et P sont distribuent aléatoirement dans les sites de As in GaAs. Pour  $x < 0.45$  les alliages  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  sont des semiconducteurs à gap direct et la recombinaison des paires électron-trou sont direct comme le montre la figure II.3.a. Le taux de recombinaison est relié directement à la concentration des électrons et des trous.

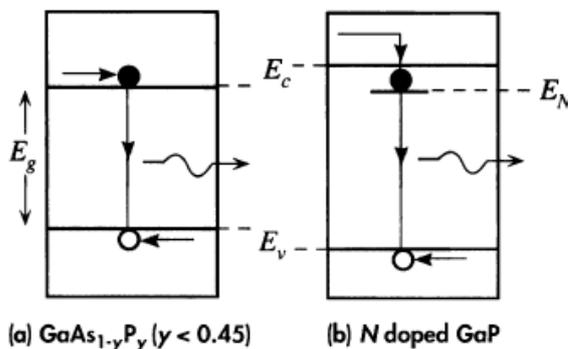
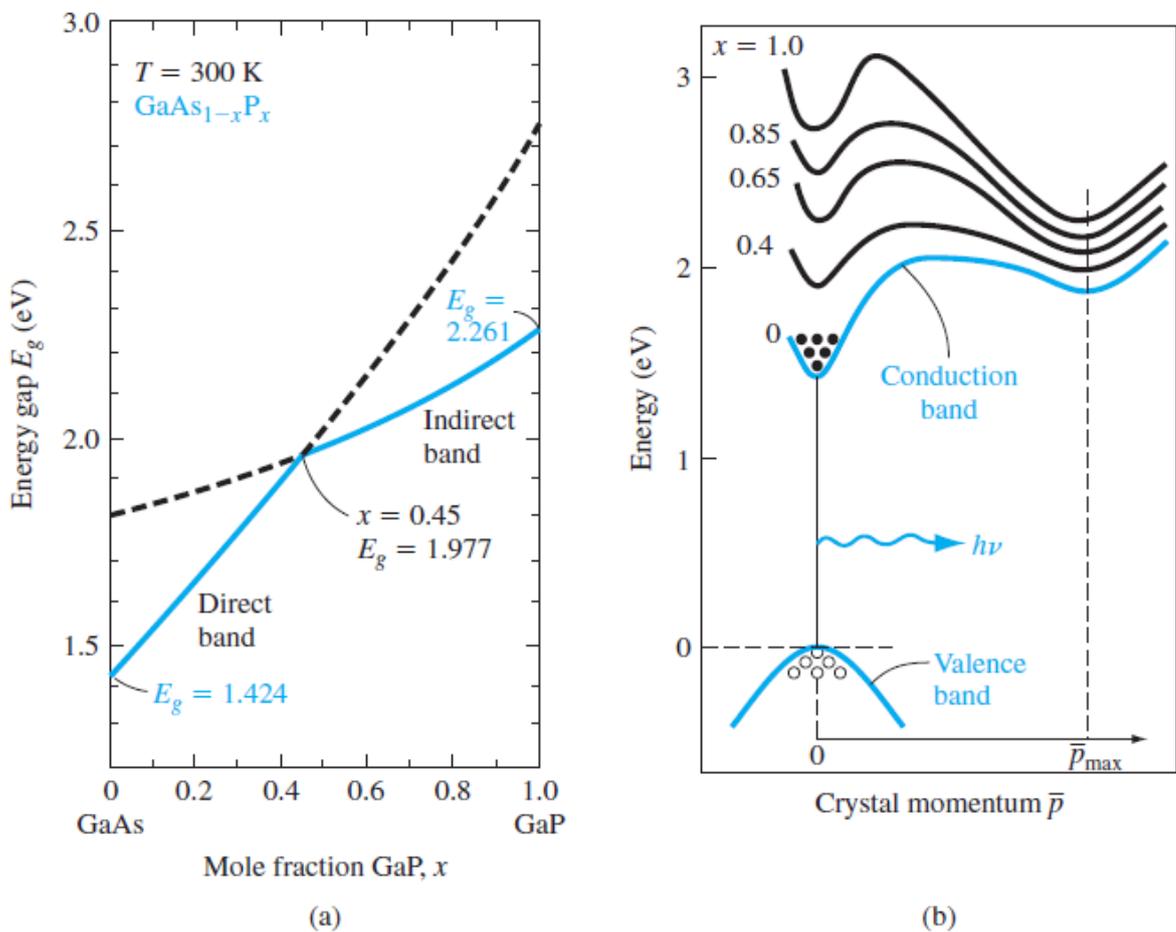


Figure II.3

- a : émission d'un photon dans un semiconducteur à gap direct
- b : GaP un semiconducteur à gap indirect, dopé avec nitrogène (N) qui a créé un centre de recombinaison  $E_N$  : la recombinaison entre un électron piégé à  $E_N$  et un trou donne un photon.

Les longueurs d'ondes émises sont dans l'intervalle 630 nm (rouge) pour  $y=0.45$  ( $\text{GaAs}_{0.55}\text{P}_{0.45}$ ) à 870nm (infra rouge) pour  $y=0$ .

Les alliages semiconducteurs  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  (GaP inclus) avec  $x > 0.45$  sont des semiconducteurs à gap indirect. La recombinaison électron-trous aura lieu à travers un centre de recombinaison et donne une vibration du réseau qu'une émission des photons. La figure ci-dessous montre le changement du gap de direct à indirect avec la fraction molaire  $x$  du phosphore:



**Figure 14.24** | (a) Bandgap energy of  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  as a function of mole fraction  $x$ . (b)  $E$  versus  $k$  diagram of  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  for various values of  $x$ . (From Sze [18].)

Mais si on ajoute dans le semiconducteur GaP des atomes isoélectrique tel que de nitrogène (N) qui est de la même colonne que le phosphore P ; les atomes de N créent des niveaux  $E_N$  dans la bande interdite proches de la bande de conduction, ces niveaux peuvent

capturer des électrons de la bande de conduction (figure II.3.b) et ces derniers se recombinent avec les trous de la bande de valence les plus proches et résulte une émission des photons. L'énergie des photons émis est inférieure de l'énergie du gap. Les LEDs fabriquée avec des semiconducteurs  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  avec un gap indirect et dopé avec des atomes N sont moins efficace que les LEDs fabriquée avec des semiconducteurs  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  mais avec un gap direct.

## 2. Le rendement

Outre la longueur d'onde du rayonnement émis, un paramètre essentiel dans le fonctionnement d'une diode électroluminescente est son rendement. On définit plusieurs rendements.

### - Rendement quantique interne $\eta_i$

Considérons le processus physique interne, les porteurs excédentaires injectés dans chacune des régions, se recombinent avec les porteurs majoritaires. Ces recombinaisons mettent en jeu divers processus dont certains sont radiatifs, d'autres non. On définit le rendement quantique interne  $\eta_i$ , comme le rapport du nombre de photons créés à la jonction, au nombre de porteurs qui traversent cette jonction.

Tous les porteurs qui traversent la jonction se recombinent, les uns radiativement, les autres non, de sorte que  $\eta_i$  n'est autre que le rapport du taux de recombinaisons radiatives au taux global de recombinaisons.

$$\eta_i = \frac{r_r}{r} = \frac{r_r}{r_r + r_{nr}}$$

Les taux de recombinaison sont exprimés en fonction des durées de vie par  $r_r = -\Delta n / \tau_r$ ,  $r_{nr} = -\Delta n / \tau_{nr}$  où  $\tau_r$  et  $\tau_{nr}$  sont les durées de vie radiative et non radiative. Le rendement interne s'écrit donc

$$\eta_i = \frac{\tau_{nr}}{\tau_r + \tau_{nr}}$$

$\eta_i$  n'est autre que le rendement radiatif du matériau. Si  $\tau_r \ll \tau_{nr}$ ,  $\eta_i \approx 1$ . La durée de vie radiative est faible dans les matériaux à gap direct, où le couplage électron-photon est grand en raison de la possibilité de satisfaire simultanément aux règles de conservation de l'énergie et du moment. C'est la raison pour laquelle les matériaux à gap direct sont les mieux adaptés à la réalisation de diodes électroluminescentes. Il faut toutefois noter l'exception de GaP qui a un gap indirect, mais qui dopé azote, présente un bon rendement radiatif. L'importante luminescence du centre azote dans GaP-N est due à la nature du potentiel associé à l'azote, en substitution du phosphore.

Les matériaux utilisés dans la réalisation de diodes électroluminescentes sont caractérisés par  $\eta_i \approx 100\%$ .

### Le rendement optique

Tous les photons créés à la jonction ne sortent pas de la diode. Une fraction de ces photons est réabsorbée, souvent après réflexion à la surface du matériau (figure 14.25).

Le rendement optique  $\eta_o$  est défini comme le rapport du nombre de photons émis à l'extérieur de la diode, au nombre de photons créés à la jonction.

Le paramètre qui conditionne le rendement optique, est l'indice de réfraction du matériau. Deux phénomènes limitent l'émission des photons à l'extérieur du matériau: la valeur élevée du **coefficient de réflexion** à l'interface air-semiconducteur et l'existence d'un **angle de réflexion** totale relativement faible (Fig. 14.26).

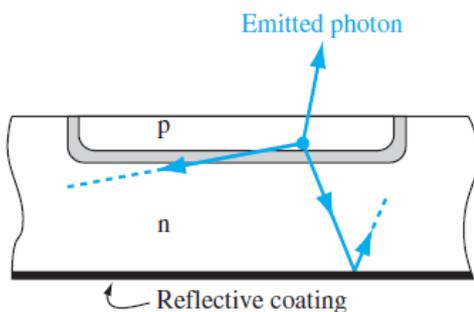


Figure 14.25 | Schematic of photon emission at the pn junction of an LED.

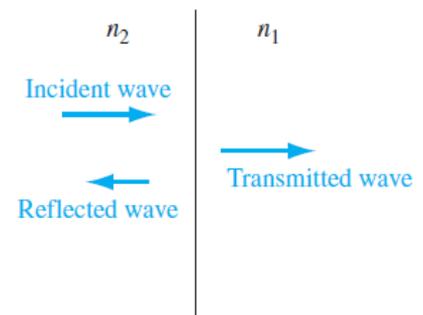


Figure 14.26 | Schematic of incident, reflected, and transmitted photons at a dielectric interface.

### Perte par effet de réflexion : perte de Fresnel

Le coefficient de réflexion en incidence normale est donné par :  $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$

$n_2$  est l'indice de réfraction pour du semi-conducteur et  $n_1$  est l'indice de réfraction de l'air et égale 1.

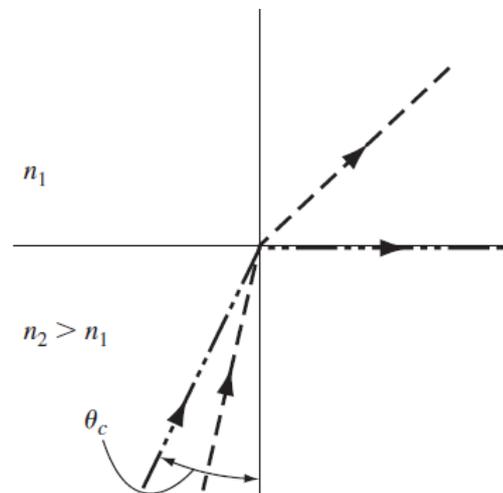
Pour l'air l'indice de réfraction  $n_2=1$  alors le coefficient de réflexion est :

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

**Perte par diffraction (angle critique).**

Les photons incidents sur l'interface semiconducteur-air sont réfractés (figure 14.27). Si les photons sont incidents sur l'interface avec un angle plus grand qu'un angle critique  $\theta_c$ , les photons subissent une réflexion interne totale. Le critique l'angle est déterminé à partir de la loi de Snell et est donné par :

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \right)$$



**Figure 14.27** | Schematic showing refraction and total internal reflection at the critical angle at a dielectric interface.

Le rendement optique est donné par la relation suivante :

$$\eta_o \approx \frac{1}{4} \left( \frac{n_p}{n} \right)^2 \left( 1 - \left( \frac{n-n_p}{n+n_p} \right)^2 \right) \quad (9-134)$$

Pour une émission dans l'air ( $n_p=1$ ), le rendement optique est :

$$\eta_o \approx \frac{1}{4n^2} \left( 1 - \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right) \approx \frac{1}{n(n+1)^2} \quad (9-133)$$

Pour une diode d'un indice de réfraction est  $n = 3,5$ , on obtient  $\eta_o \approx 1 \%$ .

On améliore le rendement optique en recouvrant la diode d'un matériau plastique transparent, dont l'indice  $n_p$  est supérieur à celui de l'air. Exp :  $n_p \approx 1,5$  le rendement optique à l'interface semiconducteur-plastique est  $\eta_o \approx 4\%$ .

On limite aussi les pertes due à l'angle d'incidence en réalisant le plastique sous forme de dôme hémisphérique pour que le rayonnement sorte en incidence normale ( $\theta=90^\circ$ ).

Le coefficient de transmission à cet interface est donné par  $T = 1-R=1-((n_p-1)/(n_p+1))^2$

Pour l'exemple précédent  $T= 96 \%$ .

- *Rendement quantique externe  $\eta_e$*

Le rendement quantique externe est défini comme le rapport du nombre de photons émis par la diode, au nombre de porteurs traversant la jonction. En d'autres termes ce rendement est donné par

$$\eta_e = \eta_i \eta_o$$

- *Rendement global  $\eta$*

Le rendement global est défini comme le rapport de la puissance lumineuse émise, à la puissance électrique absorbée

$$\eta = W_{op} / W_{el}$$

Si le nombre de photons émis par seconde est  $N_{ph}$  et si l'énergie de chacun de ces photons supposés identiques, est  $h\nu$ , la puissance lumineuse émise est  $W_{op} = N_{ph} h\nu$ .

La puissance électrique absorbée est donnée par le produit  $VI$ , où  $V$  est la tension appliquée à la diode et  $I$  le courant débité.  $I$  est la quantité de charges qui traversent la jonction par seconde,  $I = N_{el} e$ , ainsi  $W_{el} = N_{el} eV$ .

Le rendement global s'écrit donc

$$\eta = \frac{N_{ph} h\nu}{N_{el} eV} = \eta_e \frac{h\nu}{eV}$$

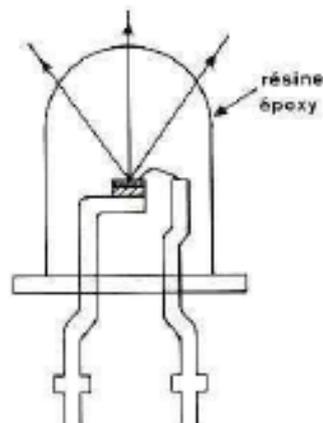
L'énergie du rayonnement émis est voisine du gap du semiconducteur,  $h\nu \approx E_g$ . D'autre part la tension appliquée  $V$  est en partie perdue dans la résistance série de la diode, de sorte que le rendement s'écrit

$$\eta = \eta_e \frac{E_g / e}{r_s I + V_d} \quad (9-138)$$

où  $r_s$  représente la résistance série et  $V_d$  la tension de diffusion.

### 3. La structure de la diode électroluminescente

La structure réalisée est ... encapsulée dans un dôme de résine transparente ou translucide. Ce dôme a trois fonctions essentielles, il protège la structure et surtout le fil de connexion, il augmente le rendement optique en réduisant la discontinuité d'indice entre le semiconducteur et l'air extérieur, il conditionne la distribution spatiale du rayonnement émis. La résine utilisée est une résine époxy à deux composants, ...



**Figure II.4. Packaging d'une LED**

### 4. Les caractéristiques d'une diode électroluminescente

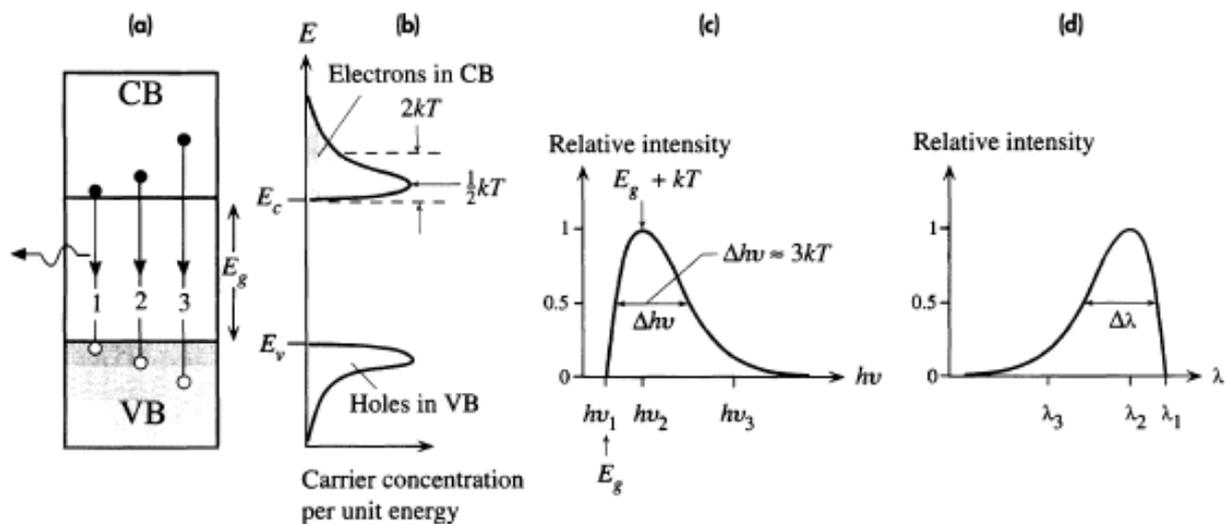
L'énergie des photons émis d'un LED n'est pas simplement l'énergie du gap, parce que les électrons dans la bande de conduction ont une distribution énergétique, et le même cas

pour les trous dans la bande de valence (figure II.5 a et b). La concentration des électrons comme une fonction d'énergie est donné par :

$g(E) * f(E)$  où  $g(E)$  est la densité d'états et  $f(E)$  est la fonction de distribution de Fermi-Dirac (la probabilité de trouver un électron à un état  $E$ ).

Le produit  $g(E) * f(E)$  représente la concentration des électrons par unité d'énergie.

La concentration des électrons comme une fonction énergétique est asymétrique et présente un pic à  $1/2kT$  au dessus de la bande de conduction. L'énergie est étalée sur un intervalle de  $2kT$  (la figure II.5.b). Les trous aussi ont une même distribution et même intervalle énergétique. La transition identifié par 1 dan la figure II.5.a est une recombinaison direct entre un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence mais la concentration des porteurs de charge est négligeable alors la recombinaison 1 ne se produit pas. La transition 2 a une grande probabilité de se produit parce que la concentration des électrons et des trous est important.



**Figure 6.47**

(a) Energy band diagram with possible recombination paths.

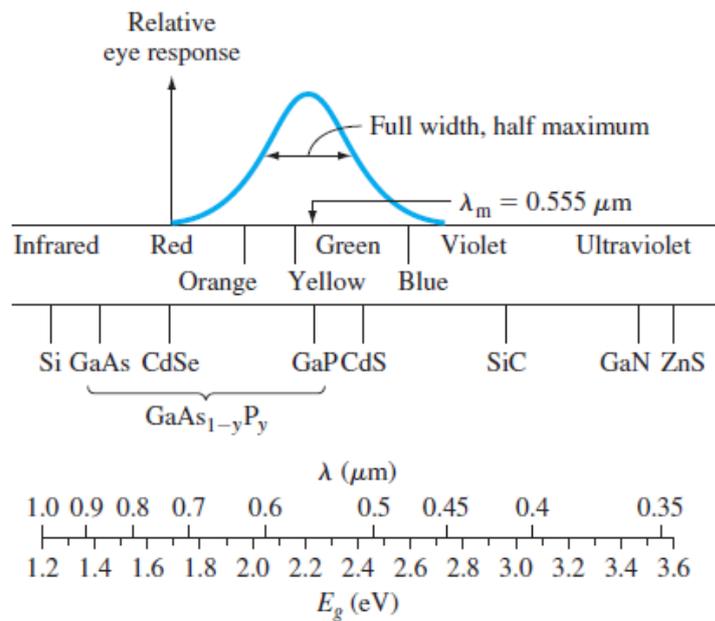
(b) Energy distribution of electrons in the CB and holes in the VB. The highest electron concentration is  $\frac{1}{2} kT$  above  $E_c$ .

(c) The relative light intensity as a function of photon energy based on (b).

(d) Relative intensity as a function of wavelength in the output spectrum based on (b) and (c).

### Spectre lumineux

Spectre lumineux en fonction de la longueur d'onde et énergie. La figure comprend la réponse relative de l'œil humain



**Figure 14.5** | Light spectrum versus wavelength and energy. Figure includes relative response of the human eye. (From Sze [18].)