

LU3EE200

Techniques et dispositifs pour l'électronique analogique et l'électronique numérique

Chapitre n°9. Photonique



©OSRAM Opto Semiconductors



1. Photoconduction

1.1 Injection de porteurs minoritaires

1.2 Application aux photo-détecteurs

Question-clé : que se passe-t-il si on éclaire un semi-conducteur dopé avec des photons d'énergie $h\nu$ au moins égale à la largeur du $gap E_g$?

Nous allons considérer dans la suite un semi-conducteur dopé N (par exemple, du silicium dopé avec des atomes donneurs en concentration $N_D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, à 300 K)

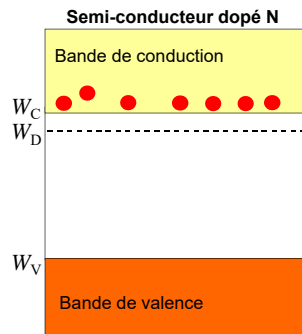
1.1 Injection de porteurs minoritaires (1/3)

❖ Si on **n'éclaire pas** le semi-conducteur dopé N, celui-ci est à l'**équilibre** :

- ✓ Concentration en porteurs de charges majoritaires (électrons) : n_{N0}
- ✓ Concentration en porteurs de charges minoritaires (trous) : p_{N0}

La loi d'action de masse est vérifiée : $n_{N0} p_{N0} = n_i^2$

Convention pour les indices :
N pour indiquer le dopage de type N
0 pour indiquer une situation à l'équilibre



Exemple numérique :
 $N_D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $n_i \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à $T = 300 \text{ K}$
d'où $n_{N0} = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $p_{N0} = 2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3} \ll n_{N0}$
Les électrons libres dans la bande conduction viennent majoritairement du dopage N.

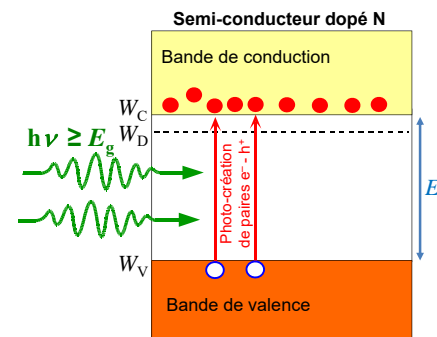
1.1 Injection de porteurs minoritaires (2/3)

❖ On **éclaire** désormais le semi-conducteur : on est dans une situation **hors-équilibre**.

- ✓ Comme $h\nu \geq E_g$, il y a création de paires électrons-trous en excès (**photo-crédation**, selon un **taux de création G_{ph}**)

$$n_N = n_{N0} + \Delta n \text{ et } p_N = p_{N0} + \Delta p$$

Excès de porteurs libres (photo-crédation) :
comme il s'agit de paires $e^- - h^+$, $\Delta n = \Delta p$.



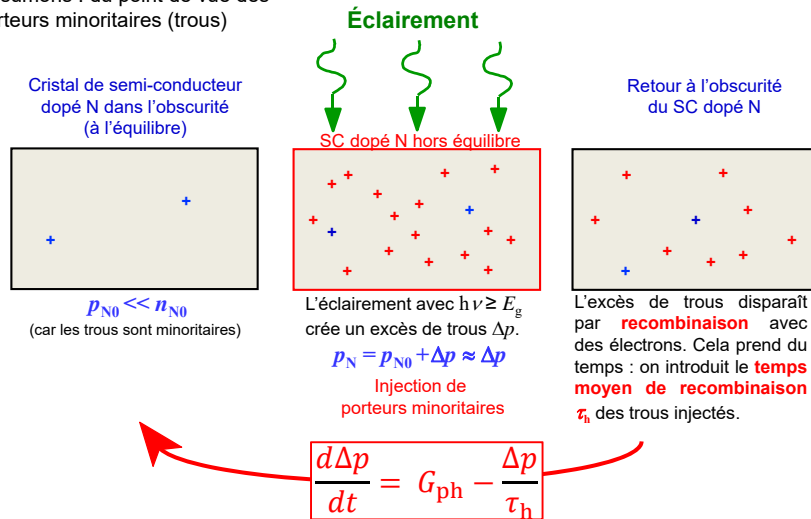
Attention ! La loi d'action de masse hors équilibre n'est plus vérifiée : $n_N p_N \neq n_i^2$

Exemple numérique :
 $N_D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $n_i \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à $T = 300 \text{ K}$
d'où $n_{N0} = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $p_{N0} = 2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$
Supposons une faible illumination qui crée $\Delta n = 0,1 n_{N0}$
d'où $\Delta n = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} = \Delta p$ (car paires $e^- - h^+$)
Ainsi : $n_N = 5,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $p_N = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (car $\Delta p \gg p_{N0}$)
La concentration en électrons (majoritaires) augmente de 10%, alors que celle en trous (minoritaires) varie d'un facteur 10^{12} !

L'illumination influence fortement la concentration en porteurs minoritaires : on parle d'**injection de porteurs minoritaires**.

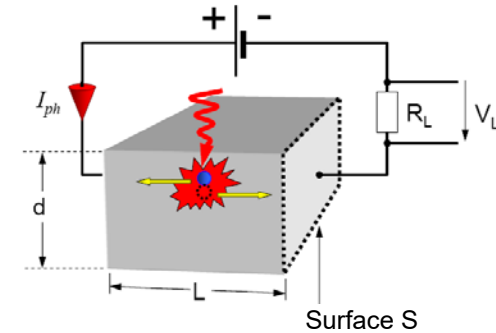
1.1 Injection de porteurs minoritaires (3/3)

Résumons : du point de vue des porteurs minoritaires (trous)



G_{ph} : nombre de paires électron-trou créées par unité de volume et par unité de temps

1.2 Application aux détecteurs photoconducteurs (ou quantiques)



- ❖ Variation de la conductivité électrique suite à l'absorption de photons par le matériau (à condition que l'énergie des photons incidents $h\nu$ soit supérieure ou égale à l'énergie du $gap E_g$).
- ❖ Si, Ge, PbSe, PbS, CdSe, HgCdTe, PbSnTe, InGaAs (infrarouge principalement)
- ❖ Applications : alarmes, astronomie IR, spectroscopie IR.

2. Propriétés optiques : concepts généraux

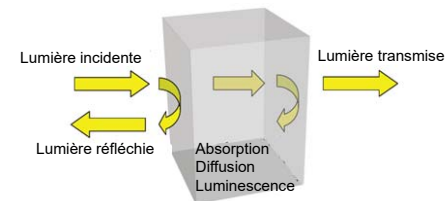
2.1 Indice de réfraction

2.2 Absorption optique

Question-clé : quelles sont les grandeurs optiques à considérer pour un matériau sous illumination ?

Le comportement optique d'un matériau est lié à ses propriétés diélectriques. Deux grandeurs sont à considérer : l'indice de réfraction n lié à la polarisation électronique et le coefficient d'absorption α lié aux pertes diélectriques.

2.1 Indice de réfraction (1/2)



- ❖ Dans un milieu homogène, la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique s'écrit :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide (F/m),
 μ_0 est la perméabilité du vide (H/m),
 ϵ_r est la permittivité relative du matériau (sans unité),
 μ_r est la perméabilité relative du matériau (sans unité),
 c est la vitesse de la lumière dans le vide (m/s).

- ❖ Indice de réfraction pour un matériau sans pertes, non magnétique ($\mu_r = 1$) :
- $$n = c / v \Rightarrow n^2 = \epsilon_r$$

- ❖ Mais un matériau présente toujours des pertes. Si on le soumet à un champ électrique alternatif, les atomes du réseau cristallin vont osciller autour de leur position d'équilibre, et donc une partie de l'énergie issue du champ électrique sera convertie en énergie de vibrations (son, chaleur). On introduit alors une permittivité relative complexe et donc un indice de réfraction complexe (voir transparent suivant).

2.1 Indice de réfraction (2/2)

❖ Indice de réfraction complexe : $\tilde{n} = n - j\kappa$

Indice de réfraction
Coefficient d'extinction

❖ Permittivité relative complexe : $\tilde{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$

Constante diélectrique
(polarisation diélectrique)
pertes diélectriques
(absorption)

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r}$$

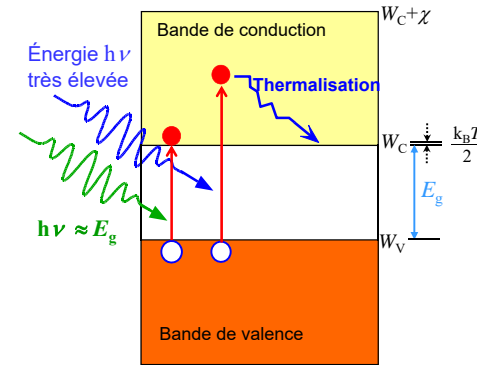
ϵ''_r dépend de la fréquence. De plus, pour un matériau de conductivité σ finie, il y a des pertes par effet Joule :

$$\epsilon''_r = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}$$

❖ Relations :

$$\begin{aligned} \tilde{\epsilon}_r &= \tilde{n}^2 \\ \Rightarrow \epsilon'_r &= n^2 - \kappa^2 \\ \text{et } \epsilon''_r &= 2n\kappa \end{aligned}$$

2.2 Absorption optique : condition sur l'énergie des photons



Si $h\nu = E_g$, le photon est absorbé et on observe la transition d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Cet électron se place au voisinage du bas de la bande de conduction à $W \approx W_C + (k_B T / 2)$.

Si $h\nu \gg E_g$, le photon est absorbé et on observe la transition d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Cet électron est situé haut dans la bande de conduction : il perd l'excès d'énergie par **thermalisation** avant de se placer au voisinage du bas de la bande de conduction.

Si $h\nu < E_g$, le photon n'est pas absorbé : le semi-conducteur est **transparent** aux longueurs d'onde plus grandes que $\lambda_g = hc / E_g$, soit encore $\lambda_g (\mu\text{m}) = \frac{1,24}{E_g (\text{eV})}$.

Exemple numérique :

Pour le silicium : $E_{g\text{Si}} = 1,12 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_{g\text{Si}} = 1,11 \mu\text{m}$

d'où toutes les longueurs d'onde plus grandes que $\lambda_{g\text{Si}}$ ne seront pas absorbées : on ne peut donc pas utiliser des photodiodes au silicium pour les télécommunications optiques à $1,31 \mu\text{m}$, par exemple.

2.2 Absorption optique : coefficient d'absorption α

❖ La profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique dans le matériau dépend de la fréquence du champ électrique \vec{E} et des constantes optiques (n et κ) du matériau. On appelle I_0 l'intensité du faisceau incident en surface du matériau ($z = 0$). La profondeur z à laquelle l'intensité est atténuée de $1/e$ de sa valeur maximale I_0 est la **profondeur de pénétration** δ_p .

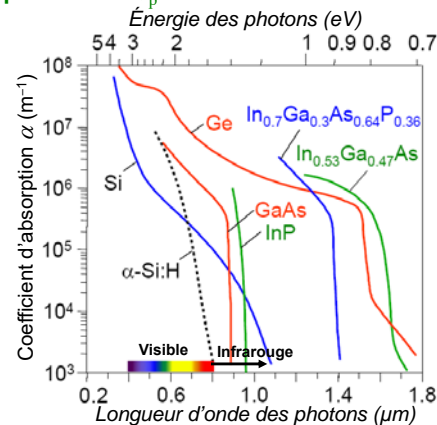
$$\begin{aligned} I(z) &= I_0 \exp(-z/\delta_p) \\ &= I_0 \exp(-\alpha z) \propto |E|^2 \end{aligned}$$

où $\alpha = \frac{1}{\delta_p} = \text{coefficient d'absorption}$.

❖ On peut relier α et κ selon :

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{2\kappa\omega}{c} = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \\ \text{où } \omega &= 2\pi f = 2\pi \frac{c}{\lambda} \end{aligned}$$

Visible : $400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$



© McGraw-Hill, 2002

3. Émission de lumière

3.1 Gap direct vs. gap indirect

3.2 Recombinaison

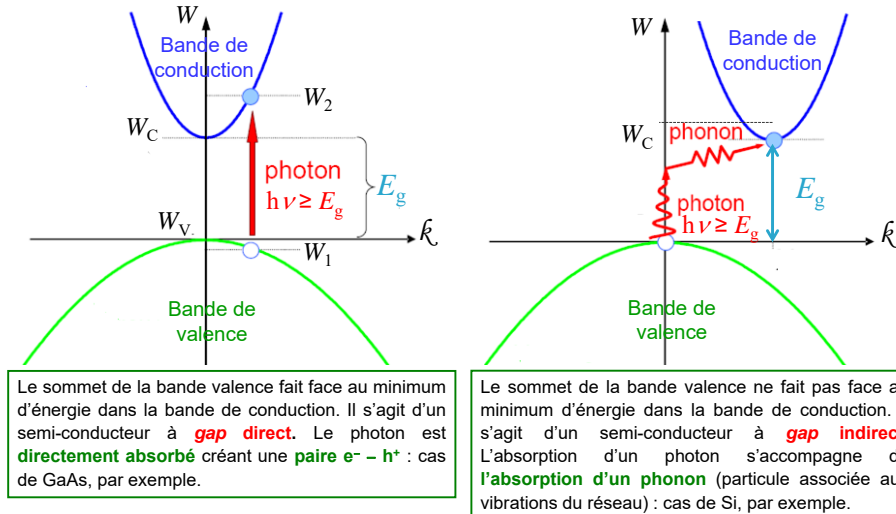
3.3 Applications aux LEDs

Question-clé : comment émettre de la lumière ?

Après l'introduction de quelques notions complémentaires sur le modèle des bandes, nous donnons quelques éléments de compréhension sur l'émission de lumière par les diodes électroluminescentes (DEL, ou LED en anglais).

3.1 Gap direct vs. gap indirect

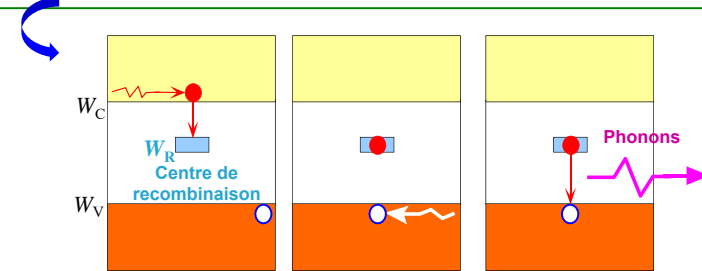
L'étude poussée du modèle des bandes révèle que ces bandes sont de forme parabolique (expression de l'énergie en fonction du nombre d'onde \vec{k}). Selon le matériau, la forme du *gap* peut être différente.



3.2 Recombinaison radiative / Recombinaison non radiative

La nature du *gap* a des conséquences sur le mode de recombinaison des porteurs libres (cf. Transparent 5) une fois l'éclairement stoppé. Ainsi :

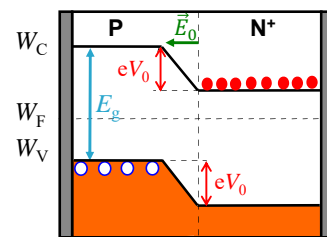
- ❖ Pour un semi-conducteur à **gap direct** (tel que GaAs), la recombinaison de la paire $e^- - h^+$ s'accompagne de **l'émission d'un photon d'énergie $h\nu \approx E_g$** : il s'agit d'une **recombinaison radiative**.
- ❖ Pour un semi-conducteur à **gap indirect** (tel que Si), la recombinaison de la paire $e^- - h^+$ est convertie en **énergie de vibrations** des atomes du réseau (**phonons**) : il s'agit d'une **recombinaison non-radiative**.



3.3 Application aux LEDs : principe (1/2)

Une **diode électroluminescente** émet un rayonnement (photons) sur la base d'un processus de recombinaisons de paires $e^- - h^+$. Ce processus exige au préalable l'excitation des électrons, qui s'effectue par polarisation électrique de la diode, d'où le nom de diode électroluminescente. Le photon émis est d'énergie environ égale à la largeur de *gap* du matériau.

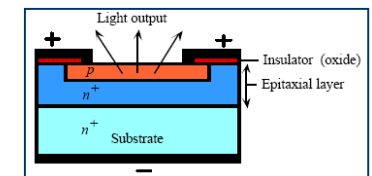
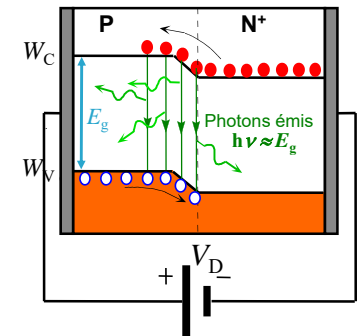
- ❖ Soit une jonction PN^+ (le côté N est fortement dopé).
- ✓ À l'équilibre, le niveau de Fermi W_F est uniforme dans la structure.
- ✓ À l'interface, il y a un champ électrique interne \vec{E}_0 (donc un potentiel interne de jonction V_0 associé) qui empêche les électrons de diffuser de la zone N^+ vers la zone P.
- ✓ La zone de déplétion s'étend principalement du côté P.



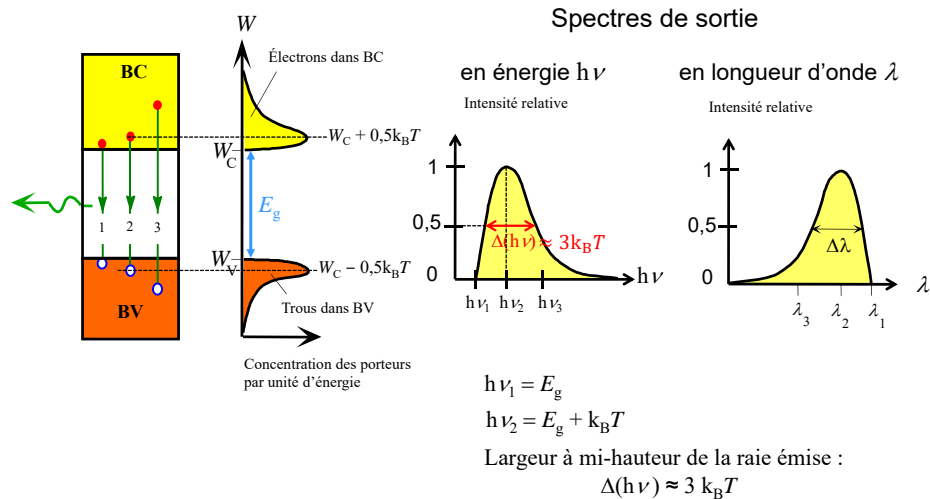
- Électrons dans la BC
- Trous dans la BV

3.3 Application aux LEDs : principe (2/2)

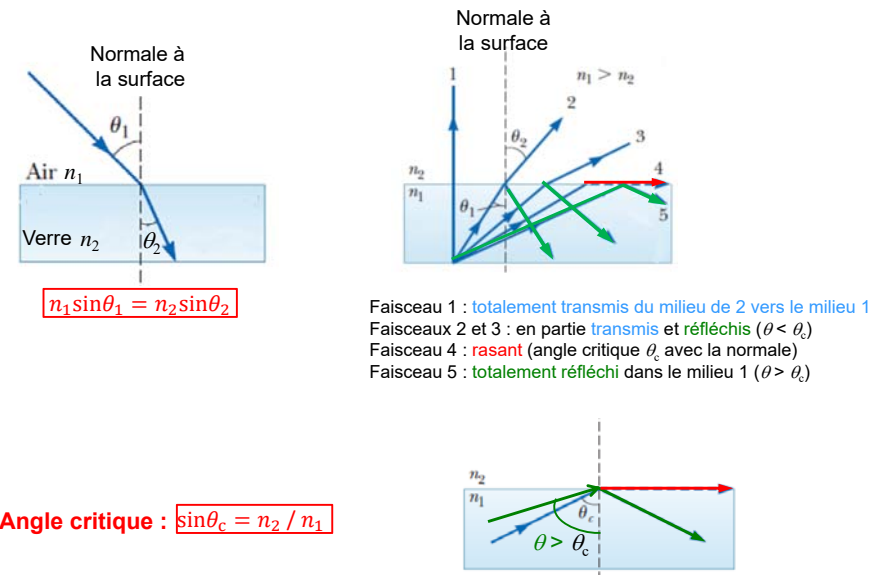
- ❖ Quand on polarise en direct la diode, le potentiel interne diminue de V_0 à $V_0 - V_D$, ce qui permet aux électrons de la zone N^+ d'être injectés dans la zone P.
- ❖ L'injection de trous de la zone P vers la zone N^+ est beaucoup plus faible. La recombinaison des électrons injectés dans la zone de déplétion (côté P, sur leur longueur de diffusion) avec les trous conduit à l'émission de photons. On parle d'**électroluminescence d'injection**.
- ❖ Les photons sont émis dans des directions aléatoires (émission spontanée). La structure de la LED doit être telle que les photons émis puissent s'échapper du dispositif sans être réabsorbés par le matériau semi-conducteur.



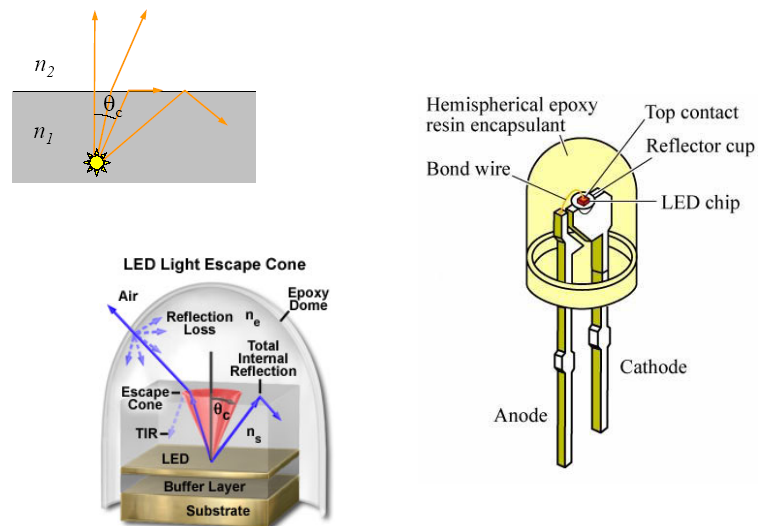
3.3 Application aux LEDs : caractéristiques de l'émission



3.3 Application aux LEDs : loi de Snell-Descartes



3.3 Application aux LEDs : packaging d'une LED



3.3 Application aux LEDs : matériaux et rendement

Semi-conducteur	Gap D ou I	λ (nm)	η_{external} (%)	Commentaires
GaAs	D	870 - 900	10	LEDs infrarouge
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 < x < 0.4$)	D	640 - 870	5 - 20	LEDs rouges à IR
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($y \approx 2.20x$, $0 < x < 0.47$)	D	1 - 1.6 μm	> 10	LEDs pour les communications
Alliages InGaN	D	430 - 460	2	LED bleue
		500 - 530	3	LED verte
SiC	I	460 - 470	0.02	LED bleue. Rendement faible
$\text{In}_{0.49}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.51-x}\text{P}$	D	590 - 630	1 - 10	LEDs ambres, vertes et rouges
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y < 0.45$)	D	630 - 870	< 1	LEDs rouges à IR
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y > 0.45$) (dopage N ou Zn)	I	560 - 700	< 1	LEDs rouges, oranges et jaunes
GaP (Zn-O)	I	700	2 - 3	LED rouge
GaP (N)	I	565	< 1	LED verte

$$\eta_{\text{ext}}(\%) = \frac{P_{\text{out}}}{IV_D}, \text{ où } P_{\text{out}} \text{ est la puissance optique fournie}$$