

# Chapitre 8

## **Introduction**

Processus optiques

Principaux dispositif et applications

Matériaux

# Plan du cours

1/3  
bases

## 1. Introduction

- Caractéristiques physiques des semiconducteurs
- Quels Matériaux pour quel type d'applications

## 2. Propriétés électroniques des semiconducteurs

- Structure de bandes
- Statistiques d'occupation des bandes
- Propriétés de transport
- Processus de recombinaison

1/3  
transport

## 3. Jonctions et interfaces

- Jonctions métal/semi-conducteurs
- Jonction p-n à l'équilibre, Jonction p-n hors-équilibre

## 4. Composants électroniques

- Transistors bipolaires
- Transistors à effet de champ
- Dispositifs quantiques
- Nouveaux matériaux

1/3  
optique

## 5. Composants optoélectroniques

- Détecteurs
- Diodes électroluminescentes
- Diodes lasers
- Lasers à émission par la surface
- Lasers à cascade quantique

# Processus optiques dans les semiconducteurs

## Transitions optiques

Interaction matière-rayonnement

Lumière



1 électron + 1 trou

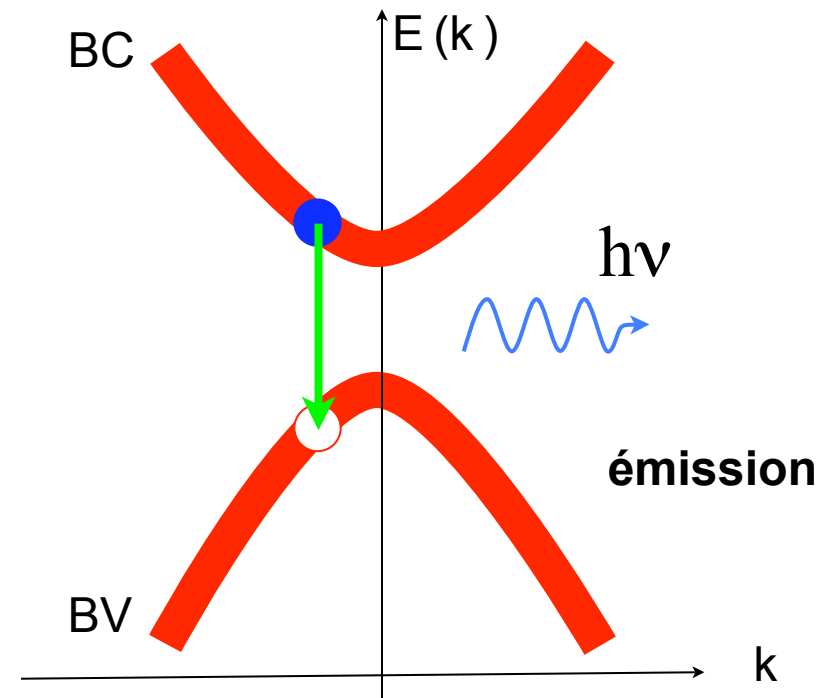
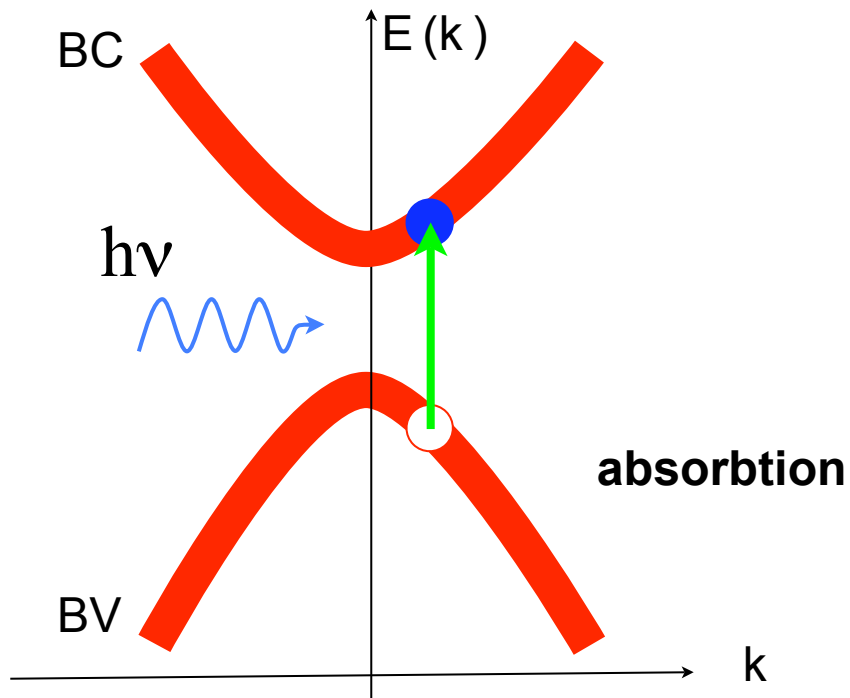
absorbption

1 électron + 1 trou



Lumière

émission



# Processus optiques dans les semiconducteurs

## Règles de sélection

### Règle d'or de Fermi

Probabilité de transition d'un état initial vers un état final

+ pour absorption

- pour émission *stimulée*

$$H_{\text{interaction}} = V e^{\pm i\omega t}$$

Admettre

$$\omega = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \langle \text{état final} | V | \text{état initial} \rangle \right|^2 \rho(f) \delta(E_{\text{final}} - E_{\text{initial}} \pm \hbar\omega)$$

Diagram illustrating the Fermi Golden Rule equation with color-coded components:

- ω**: probability de transition par unité de temps (pink box)
- $\frac{2\pi}{\hbar}$ : constant factor
- $|\langle \text{état final} | V | \text{état initial} \rangle|^2$ : élément de matrice de l'interaction (green box)
- $\rho(f)$ : densité d'états finaux (cyan box)
- $\delta(E_{\text{final}} - E_{\text{initial}} \pm \hbar\omega)$ : conservation de l'énergie (yellow box)

Les règles de sélection sont données par l'élément de matrice  $\langle f|V|i\rangle$

# Processus optiques dans les semiconducteurs

Les règles de sélection sont données par l'élément de matrice  $\langle f|V|i\rangle$

Etats propres du cristal:

$$|\psi_{\vec{k}}\rangle = u_{\vec{k}}(\vec{r}) e^{i\vec{k}\vec{r}}$$

fonction de Bloch.  
Même périodicité  
que le réseau

onde  
plane

Admettre

$q$ : vecteur d'onde de la lumière:  $q=2\pi/\lambda$

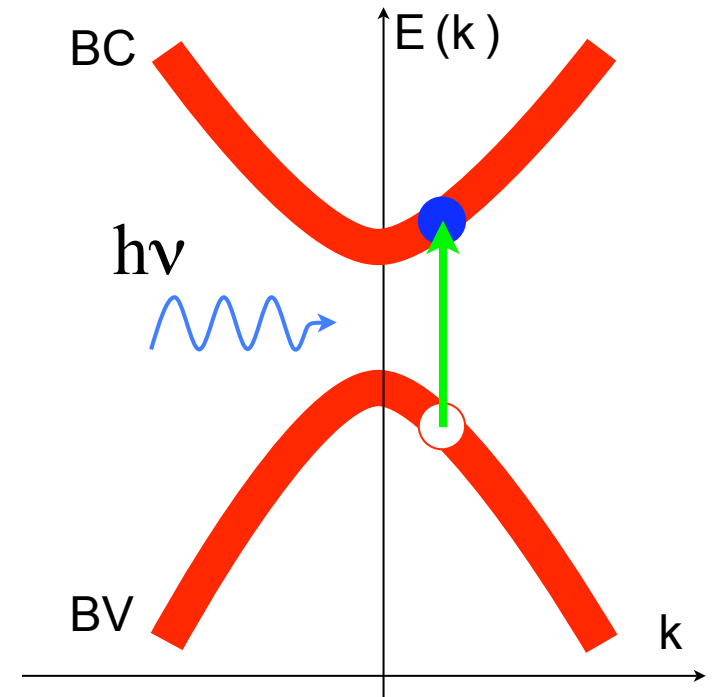
$$\langle f|V_{opt}|i\rangle \propto \langle u_i|V_{opt}|u_f\rangle \delta(\vec{k}_f - \vec{k}_i - \vec{q})$$

Règles de sélection  
entre nature de bandes

Règles de sélection sur  $k$

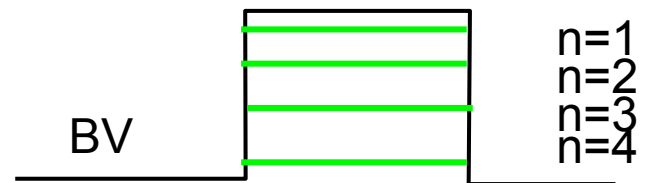
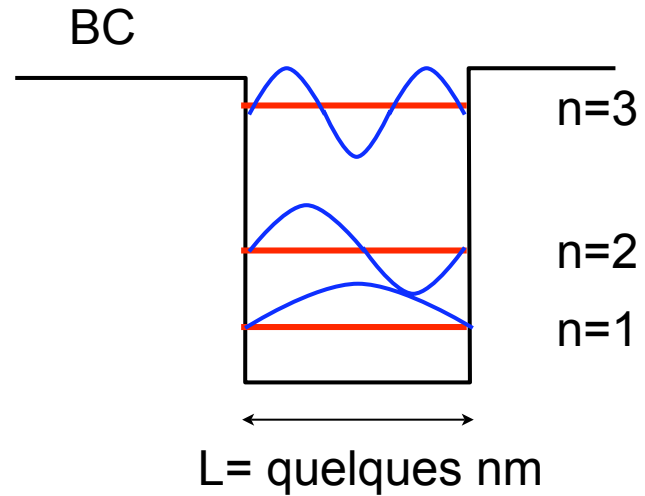
$$\vec{k}_f = \vec{k}_i + \cancel{\vec{q}}$$

Transitions verticales en  $k$



# Processus optiques dans les semiconducteurs

Règles de sélection: Cas d'un puits quantique



Niveaux d'énergie quantifiés

# Processus optiques dans les semiconducteurs

Règles de sélection: Cas d'un puits quantique

Fonctions d'ondes  $|\psi_{\vec{k}_{//}}\rangle \propto e^{i\vec{k}_{//}\vec{r}} f(z) u_{\vec{k}_{//}}(\vec{r})$

Admettre

$$\langle f | V_{opt} | i \rangle \propto \left[ \langle u_i | u_f \rangle \langle e^{i\vec{k}_{//}^i \vec{r}} f_i | V_{opt} | e^{i\vec{k}_{//}^f \vec{r}} f_f \rangle + \langle f_i | f_f \rangle \langle u_i | V_{opt} | u_f \rangle \right] \delta(\vec{k}_f - \vec{k}_i - \vec{q})$$

$= \delta_{if}$

transitions intrabandes  
et inter-sousbandes

$= \delta_{nm}$

transitions  
interbandes  
 $n=m$

transitions  
verticales  
 $\vec{k}_f = \vec{k}_i$

# Processus optiques dans les semiconducteurs

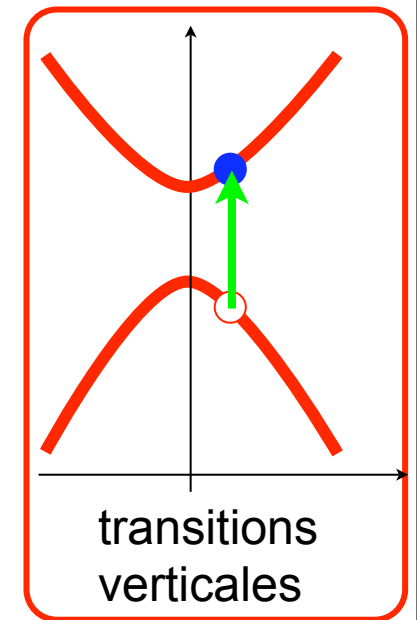
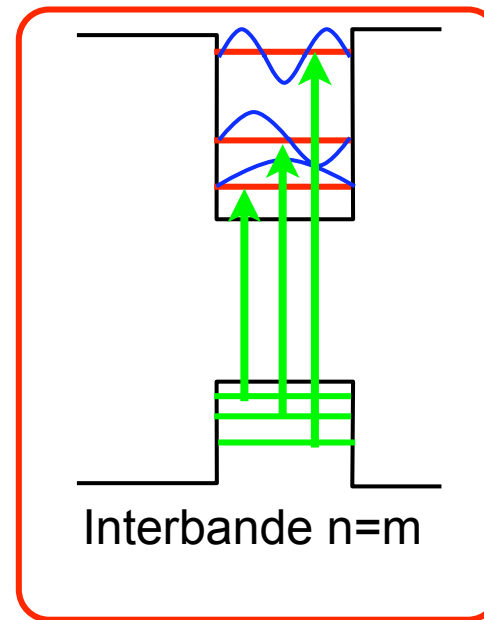
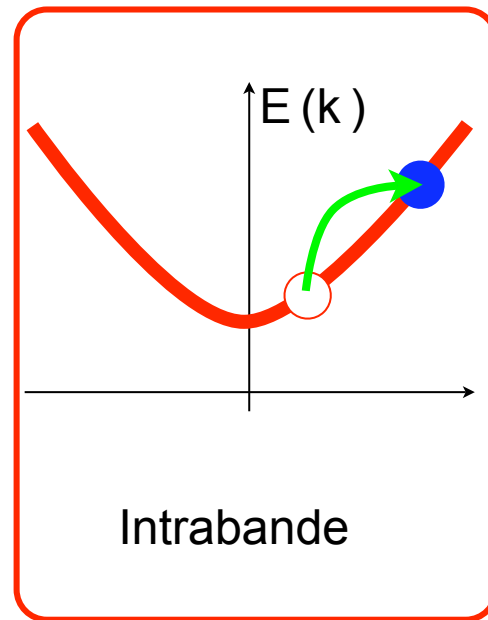
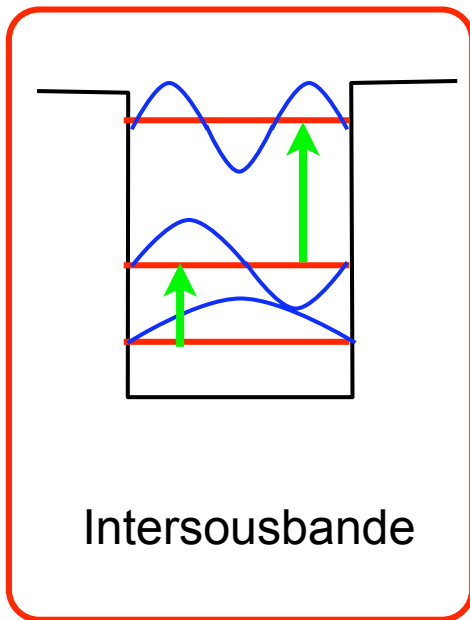
Règles de sélection: Cas d'un puits quantique

$$\langle f | V_{opt} | i \rangle \propto \left[ \langle u_i | u_f \rangle \langle e^{i\vec{k}_{//}^i \vec{r}} f_i | V_{opt} | e^{i\vec{k}_{//}^f \vec{r}} f_f \rangle + \langle f_i | f_f \rangle \langle u_i | V_{opt} | u_f \rangle \right] \delta(\vec{k}_f - \vec{k}_i - \vec{q})$$

transitions intrabandes et inter-sousbandes

transitions interbandes n=m

transitions verticales





# Processus optiques dans les semiconducteurs

## Coefficient d'absorption

Après sommation sur toutes les transitions possibles, soit de  $E_g$  à  $+\infty$ :

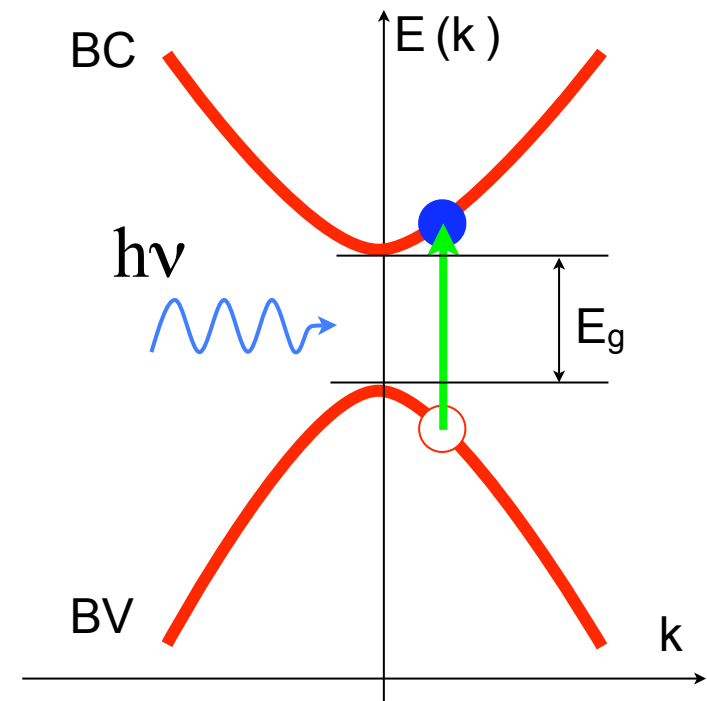
$$\alpha \propto \frac{m_r^{3/2}}{n\omega} \sqrt{\hbar\omega - E_g}$$

$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$   $\alpha$  : coefficient d'absorption

proportionnel à la densité d'états jointe

$m_r =$  masse réduite

$$\frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h}$$

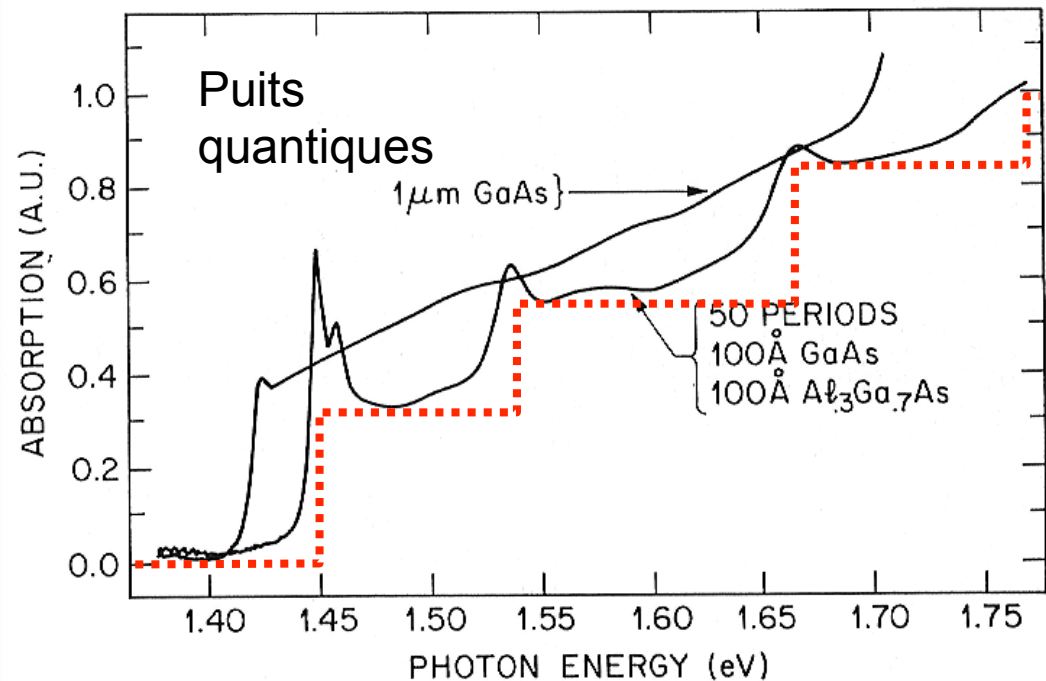
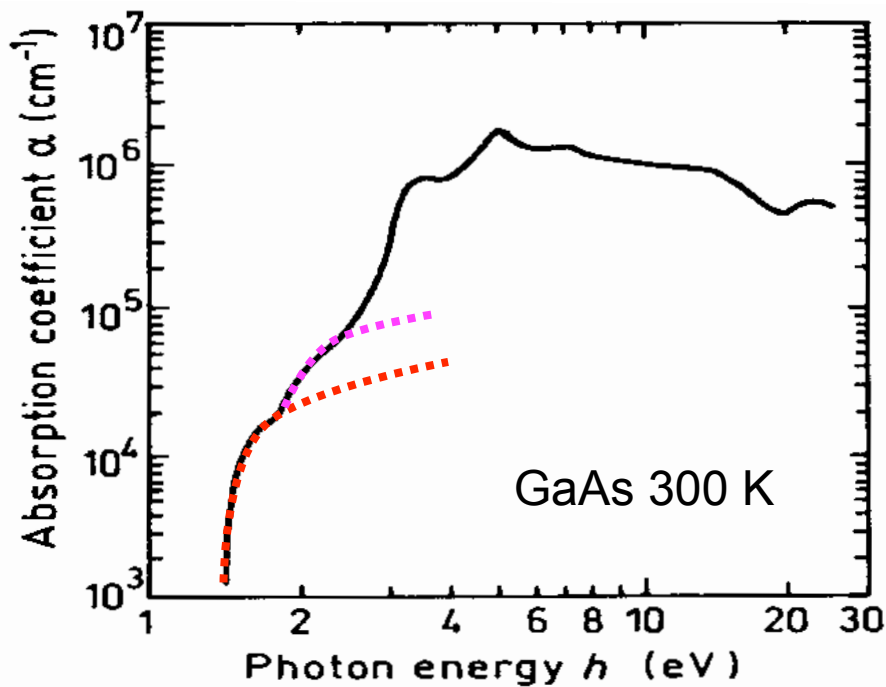


# Processus optiques dans les semiconducteurs

## Coefficient d'absorption

$$\alpha \propto \frac{m_r^{3/2}}{n\omega} \sqrt{\hbar\omega - E_g}$$

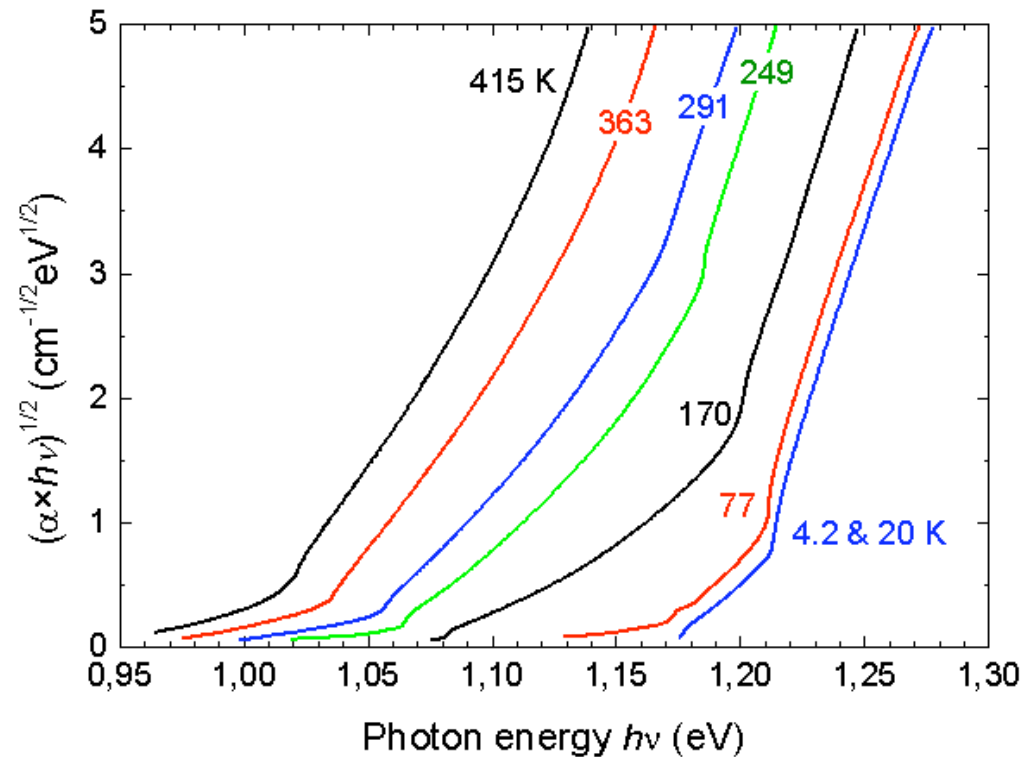
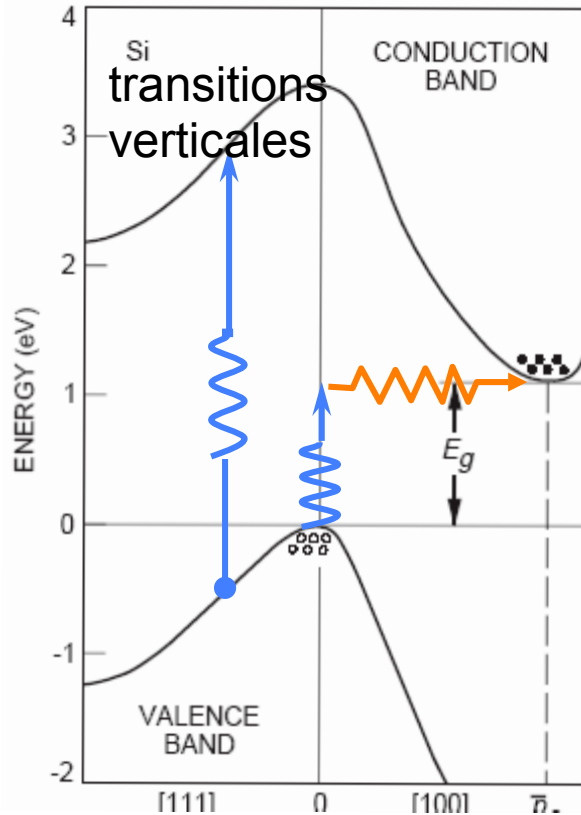
à 2D pour des puits quantiques on aurait un résultat semblable avec une densité d'états jointe à 2 dimensions et la masse réduite



<http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/>

# Processus optiques dans les semiconducteurs

## Absorption dans un matériau à bande interdite indirecte

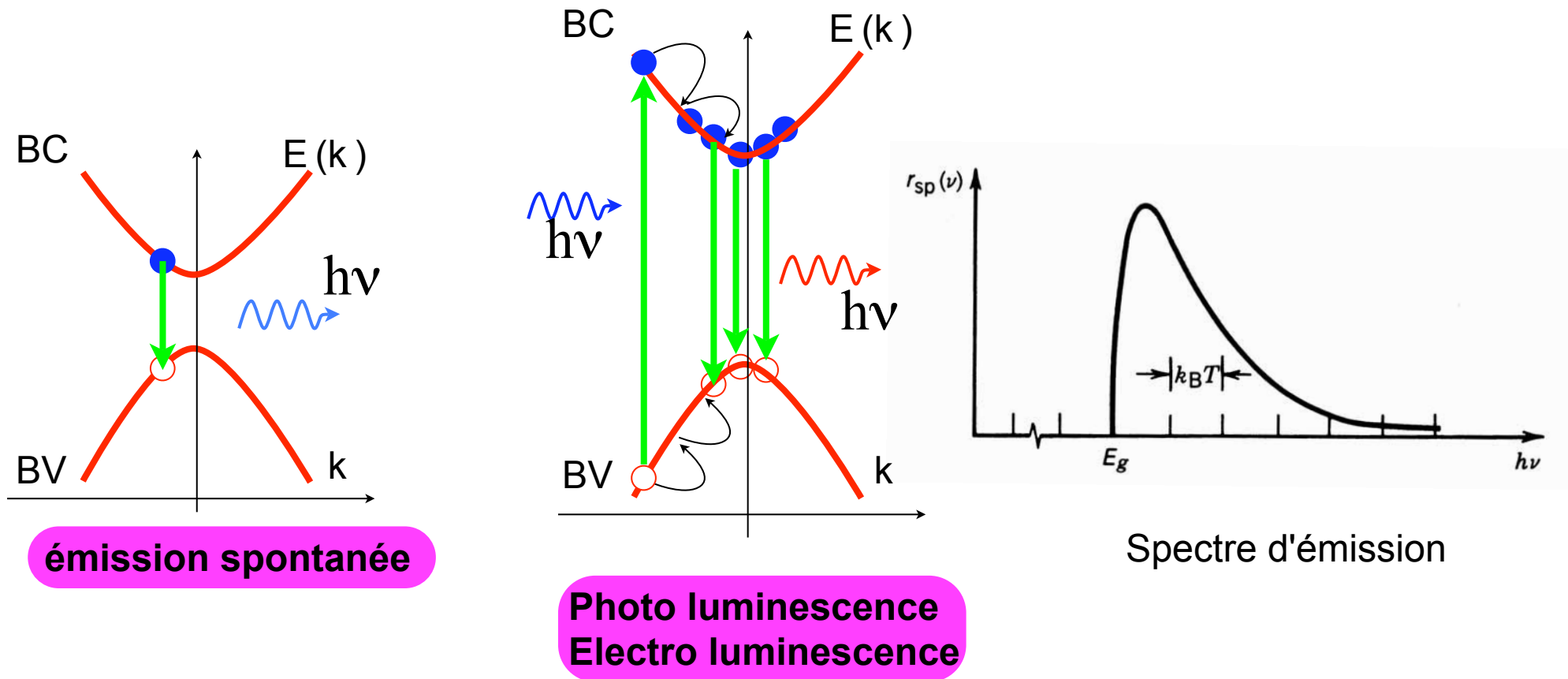


transitions indirectes,  
assistées par un phonon

<http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/>

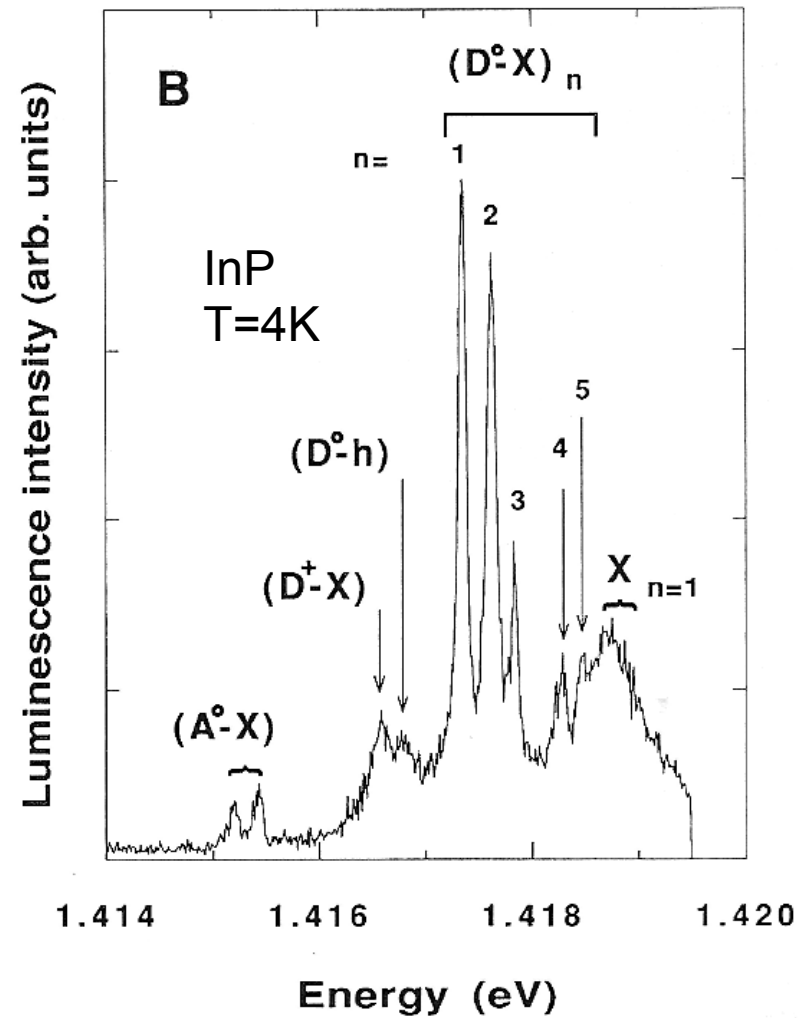
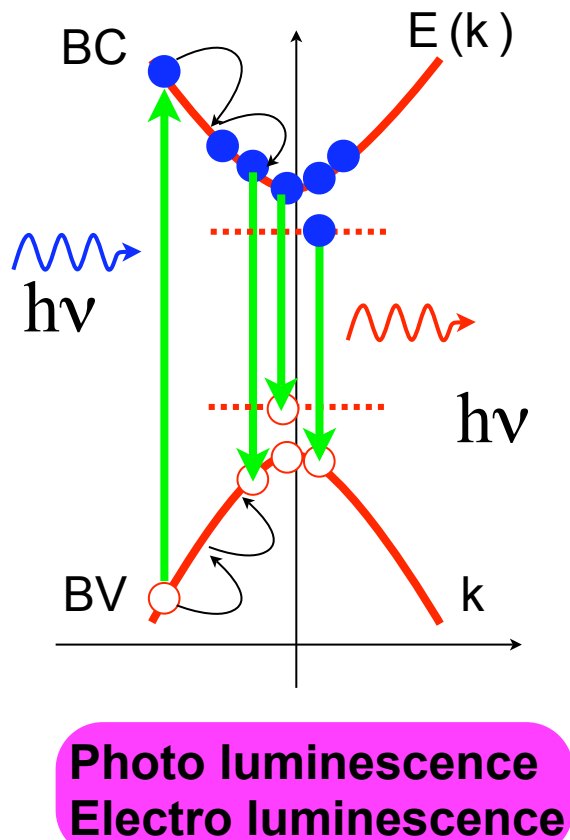
# Processus optiques dans les semiconducteurs

## Recombinaison, émission spontanée



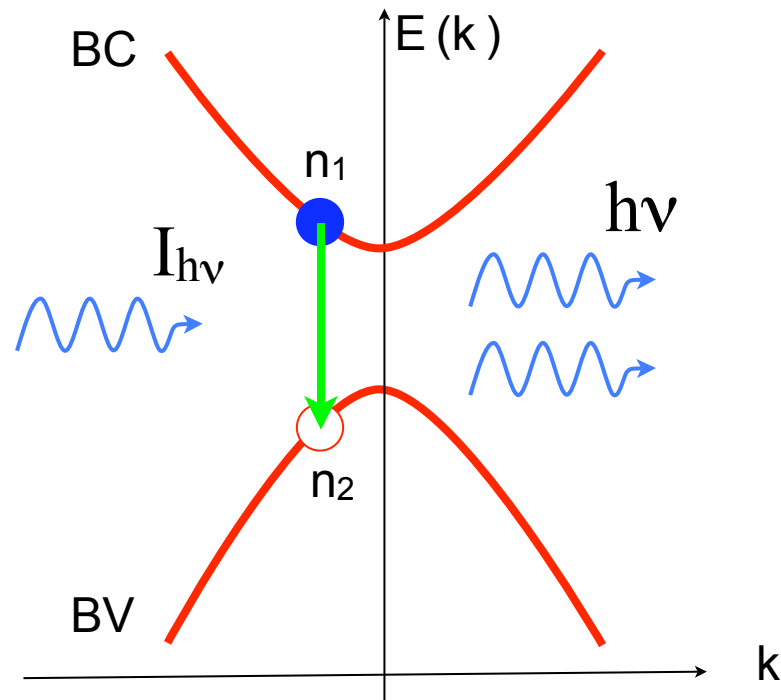
# Processus optiques dans les semiconducteurs

## Recombinaison, émission spontanée



# Processus optiques dans les semiconducteurs

## Recombinaison, émission stimulée



**émission stimulée**  
**Processus d'amplification**

Les taux d'émission stimulés et spontanés ne sont pas indépendants.

$$\frac{dn_2}{dt} = -B_{12}n_2I_{h\nu} = -\frac{dn_1}{dt} \quad \text{absorption}$$

$$\frac{dn_1}{dt} = -B_{21}n_1I_{h\nu} = -\frac{dn_2}{dt} \quad \text{stimulé}$$

$$\frac{dn_1}{dt} = -An_1 = -\frac{dn_2}{dt} \quad \text{spontané}$$

A et B: coefficients d'Einstein

Ils sont reliés par :

$$B_{12} = B_{21} = B$$

$$\frac{A}{B} = 8\pi \frac{n^3 \nu^2}{c^3} = \rho_{3D}^{\text{photons}} \quad \text{densité d'état}$$

n: indice