



**Systemes
optoélectroniques**

Plan



I – Rappels sur les propriétés des semi-conducteurs

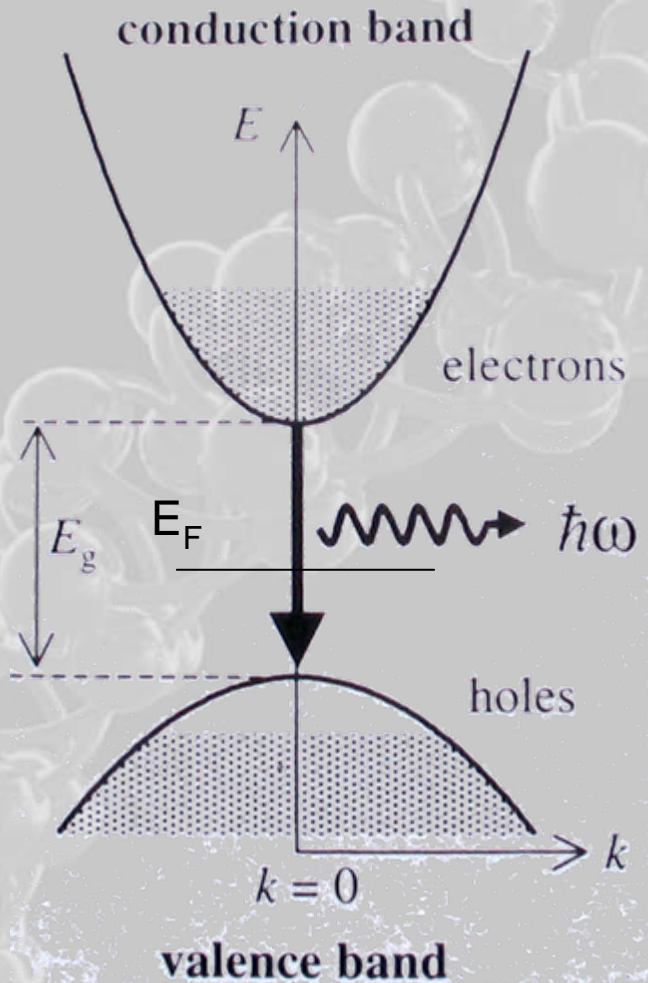
II – Les diodes électroluminescentes (LED)

III – Les diodes laser



**Rappels sur les
propriétés des
semi-
conducteurs**

Modèle des bandes

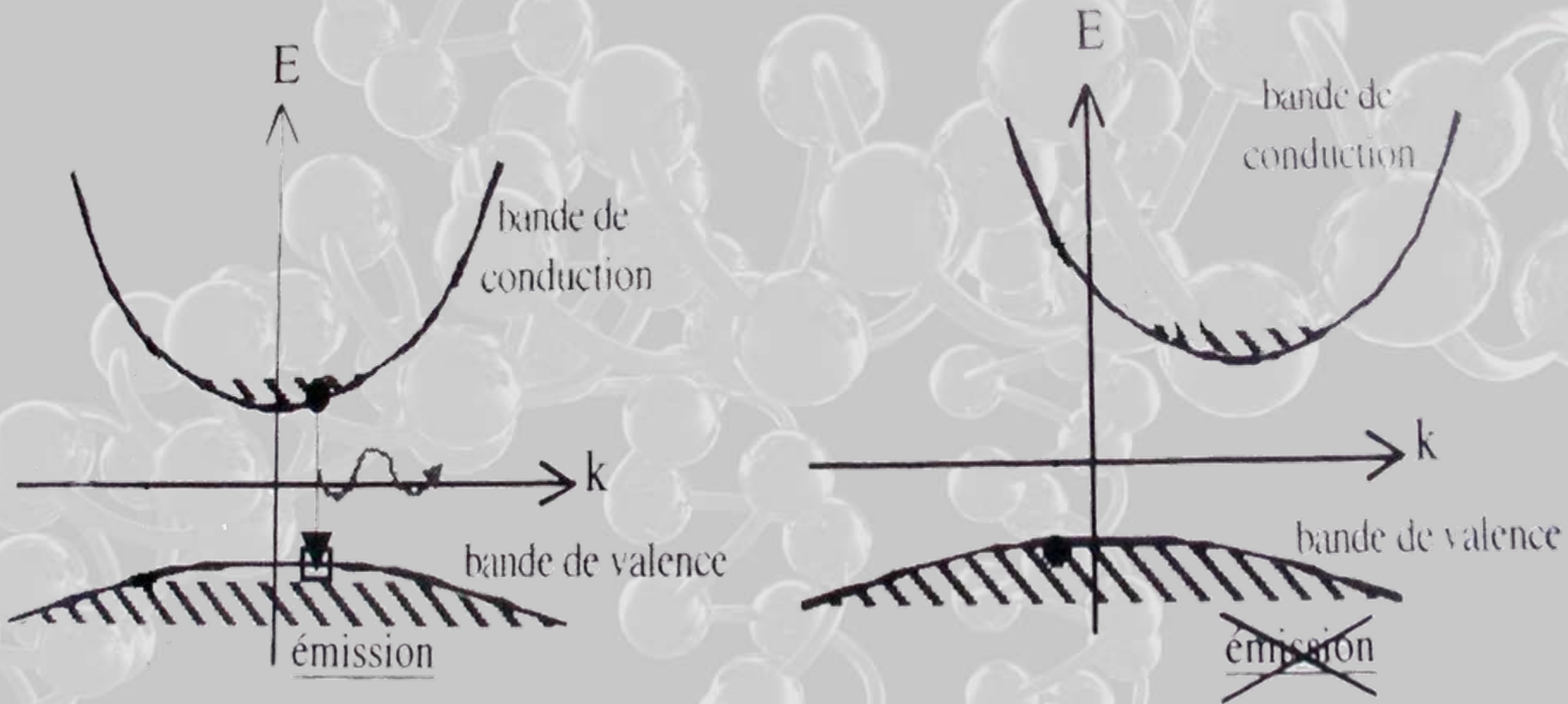


Répartition des électrons à l'équilibre, statistique de Fermi Dirac :

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_B T}}}$$

La bande de conduction n'est statistiquement pas vide

Gap direct vs gap indirect



Conservation de la quantité de mouvement

k_{photon} négligeable devant $k_{\text{électron}}$



Recombinaison

électron/trou à k constant

Loi d'action de masse (1)

- À l'équilibre thermodynamique :

$$n \cdot p \approx N_c N_v e^{-\frac{E_g}{k_B T}} = n_i^2(T)$$

n : densité d'électrons dans la bande de conduction

p : densité de trous dans la bande de valence

N : densité d'état (bande de conduction ou de valence N_c, N_v)

Il ne peut y avoir simultanément en un même point du cristal beaucoup d'électrons et beaucoup de trous !

Loi d'action de masse (2)

- Hors équilibre :

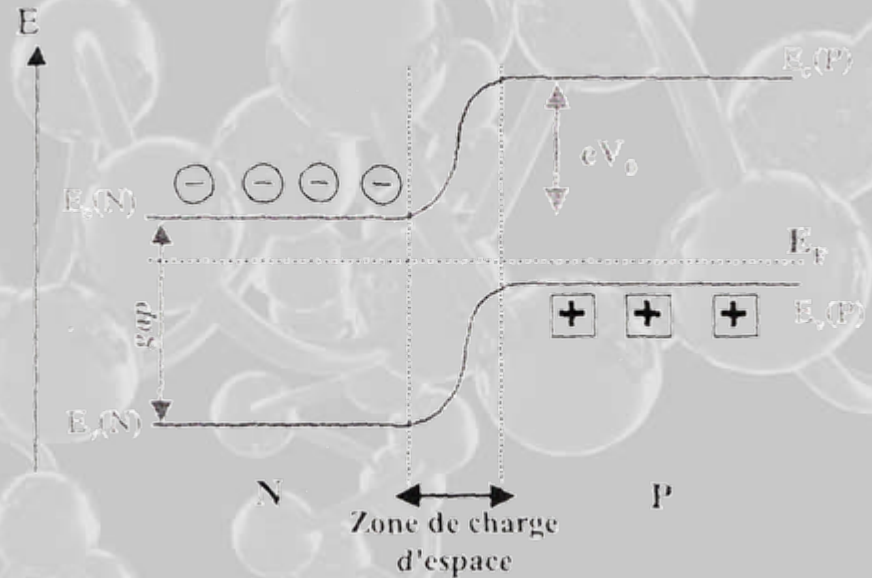
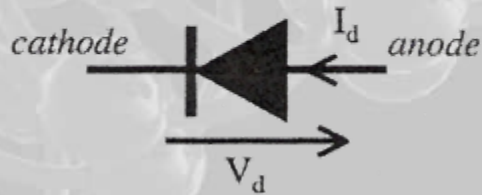
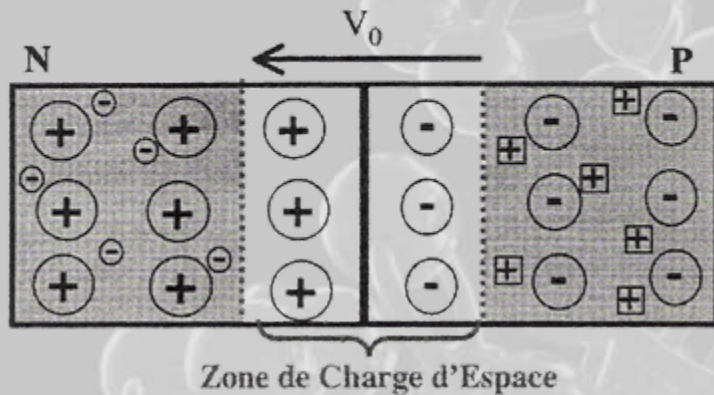
Électrons dans la bande de conduction et trous dans la bande de valence décrits **séparément** par la statistique de Fermi-Dirac (thermalisation rapide devant recombinaison des porteurs)

=> Définition de 2 quasi-niveaux de Fermi E_{FC} et E_{FV}

$$n.p \approx n_i^2(T).e^{\frac{E_{FC} - E_{FV}}{k_B T}}$$

Densité d'électrons dans la bande de conduction et densité de trous dans la bande de valence peuvent être élevées simultanément et en un même point du cristal

Jonction P-N



Jonction polarisée en direct :

$$V_d > V_0 \text{ et } I > 0$$



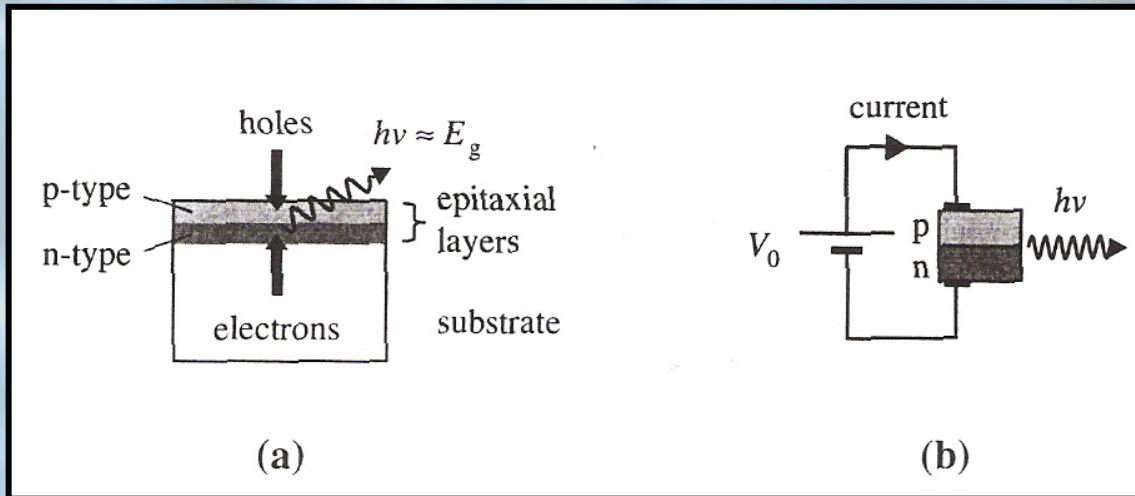
Diode passante, recombinaisons électrons/trous autorisées + semiconducteur hors équilibre

Émission de lumière !



Les diodes électroluminescent

Principe

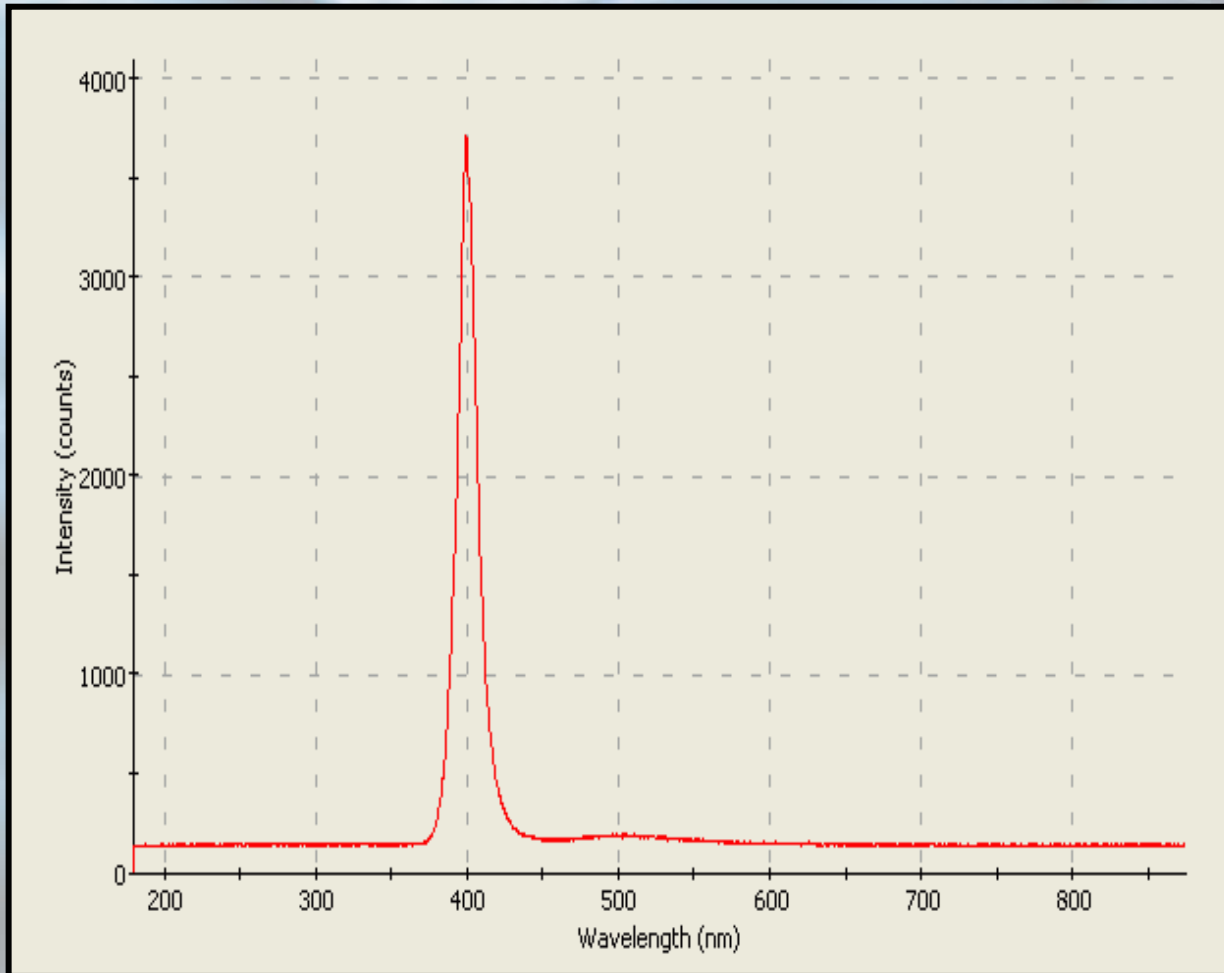


Origine de l'émission de lumière : recombinaison spontanée des paires électrons/trous

Caractéristiques optoélectroniques :

- Longueur d'onde d'émission : $\lambda = \frac{hc}{E_g}$
- Barrière de potentiel V_0 de la jonction (tension de seuil)
- Largeur spectrale : $\sim k_B T$

Performances



Spectre d'une
LED violette
(400nm)

Genres variés

Diodes couleurs	Sensibilité de l'œil lm/W	Semi-conducteur	Rendement quantique externe	Rendement énergétique	Flux lumineux par Ct injecté lm/A
Rouge	75	GaAsP	0,1 à 0,5 %	0,05 à 0,25 %	0,14 à 0,7
Orange	200	GaAsP	0,2 %	0,1 %	0,8
Jaune	500	GaAsP	0,1 %	0,05 %	1
Vert	400	GaP	0,05 à 0,1 %	0,02 à 0,05 %	0,4 à 0,8
		GaN	1 %	0,5 %	11
Bleu	70	GaN	0,3 %	0,15 %	0,6

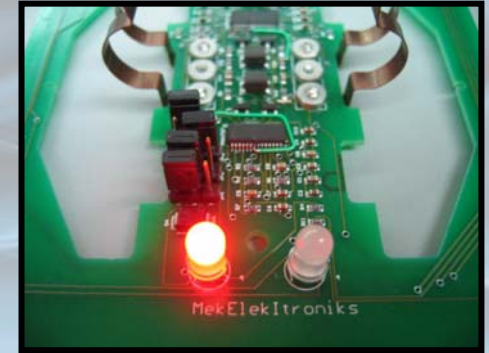
Rappel : Rendement quantique externe : nombre de photons émis sur nombre d'électrons injectés.

Rendement énergétique : puissance rayonnée sur puissance injectée.

Flux lumineux par courant injecté : sensibilité spectrale de l'œil sur rendement quantique externe par la tension.

Applications

Voyants pour systèmes embarqués



Affichage de messages

Détecteurs de mouvement (ex. souris optique)



Télécommandes...

Avantages des LEDs

- S'allume de dix à cent fois plus rapidement que des sources de lumière à incandescence (~0,01 sec)
- Dégagement de chaleur plus faible
- Résistantes aux chocs et vibrations
- Longue vie (10 ans) et mort « progressive »
- Entre autres...

Inconvénients des LEDs

- Plus cher que les technologies traditionnelles
- Dépendance vis-à-vis de la température et des conditions d'utilisation
- Besoin d'un dispositif d'évacuation de la chaleur en cas de fonctionnement à température élevée



Les diodes laser

power
PRONUNCIATION: pou(-ə)-
FUNCTION: noun
ORIGIN: Old French *poire*, from *poire* to be able, from (assumed) Vulgar Latin *potēre*, alteration of Latin *potēs* - more at **POTENT**
DATE: 13th century
USAGE: often attributive
1) ability to act or produce an effect
2) to get extra-base hits
3) undergoing an effect
4) authority, capacity, or right
5) to influence over others
6) especially: *sovereign* to state
in the phrase "the powers that be"
7) *chaic*: a force of armed men
8) *chiefly dialect*: a large number or quantity
9) a: physical might
b: mental or moral efficacy
c: political control or influence
10) plural: an order of angels - see **CELESTIAL HIERARCHY**
11) a: the number of times as indicated by an exponent that a number occurs as a factor in a product; also: the product itself
b: **CARDINAL NUMBER**
12) a: a source or means of supplying energy; especially: **ELECTRICITY**
b: **MOTIVE POWER**
c: the time rate at which work is done or energy emitted or transferred
13) **MAGNETIZATION** 28
14) **SCOPE** 3
15) the probability of rejecting the null hypothesis in a statistical test when a particular alternative hypothesis happens to be true
16) ability to wield force, permissive authority, or substantial influence. **AUTHORITY** implies the granting of power for a specific purpose
17) the power to make arbitrary decisions and compel obedience. **SWAY** suggests the extent or scope of exercised power or influence
18) **DOMINION** stresses sovereign power or supreme authority
19) to act upon or a upon. **FORCE** implies the actual effective exercise of power. **ENERGY** applies to power expended or capable of being
20) to make able the exertion of force or the withstanding of strain, pressure, or attack. **MIGHT** implies great or overwhelming power or strength

Les diodes laser

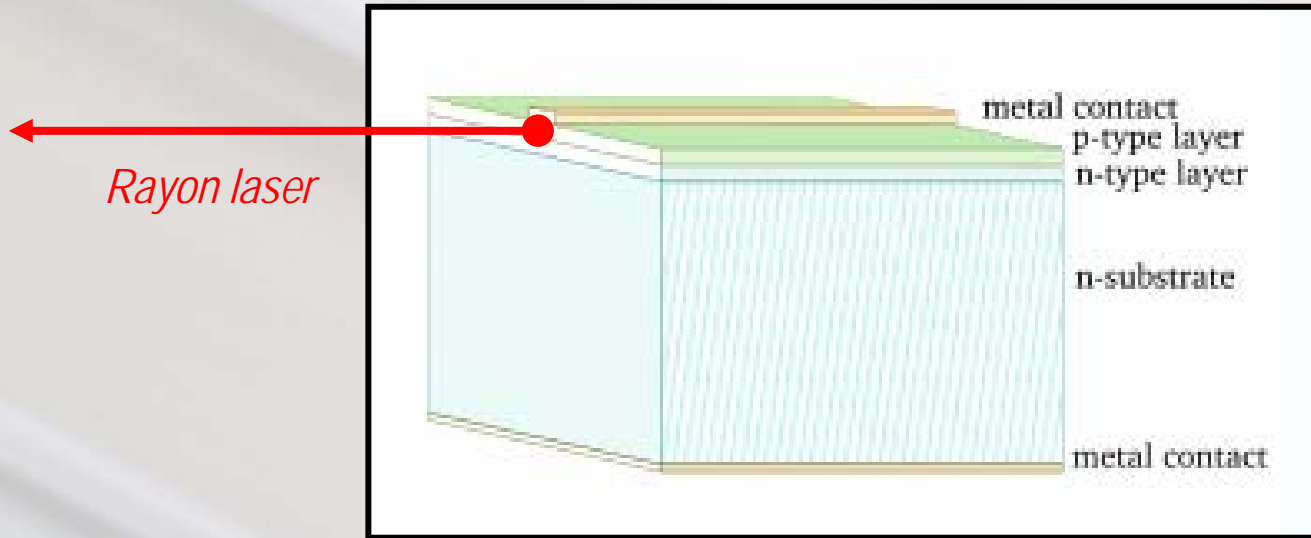
Plus pointu et difficile à réaliser que les LED

MAIS

Meilleures performances :

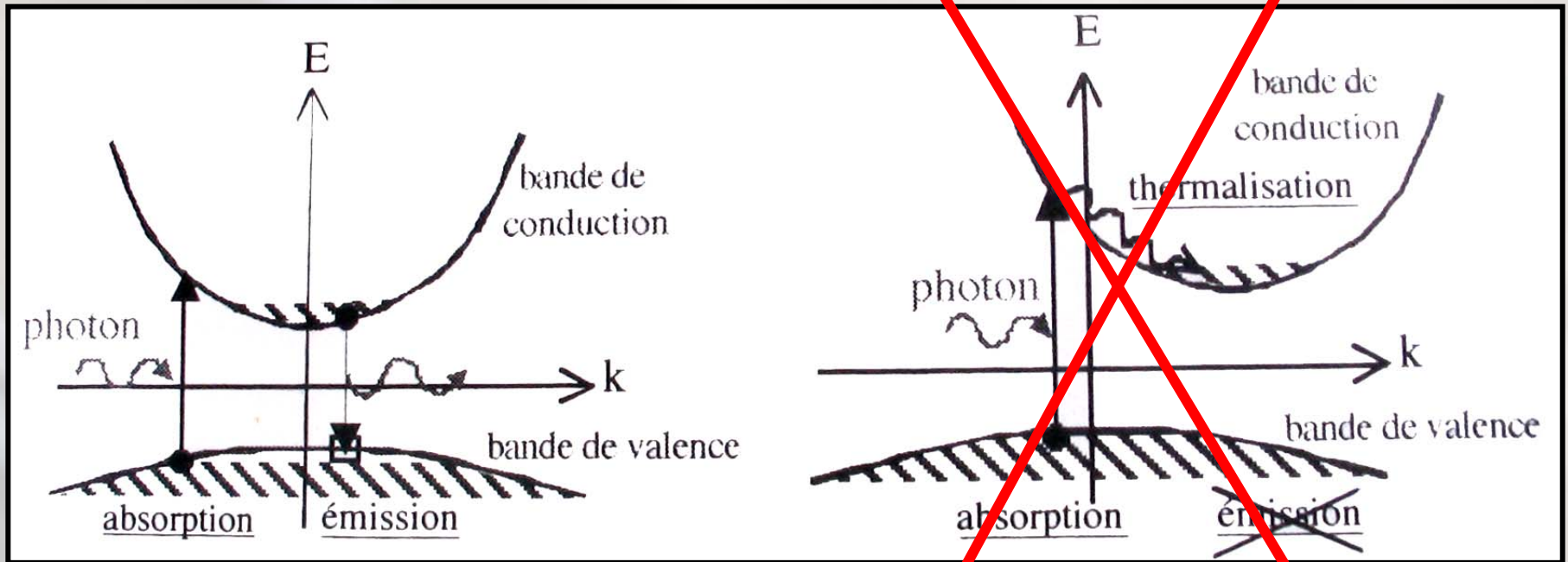
- Rendement de 30% (environ 3% pour les autres lasers)
- Largeur spectrale faible
- Qualité du rayonnement émis ↗
- Temps de réponse ↘

Schéma de base



- Processus de pompage (courant électrique)
- Milieu amplificateur (par émission stimulée)
- Structure résonante (typiquement, cavité Fabry-Pérot)

Amorçage par émission spontanée

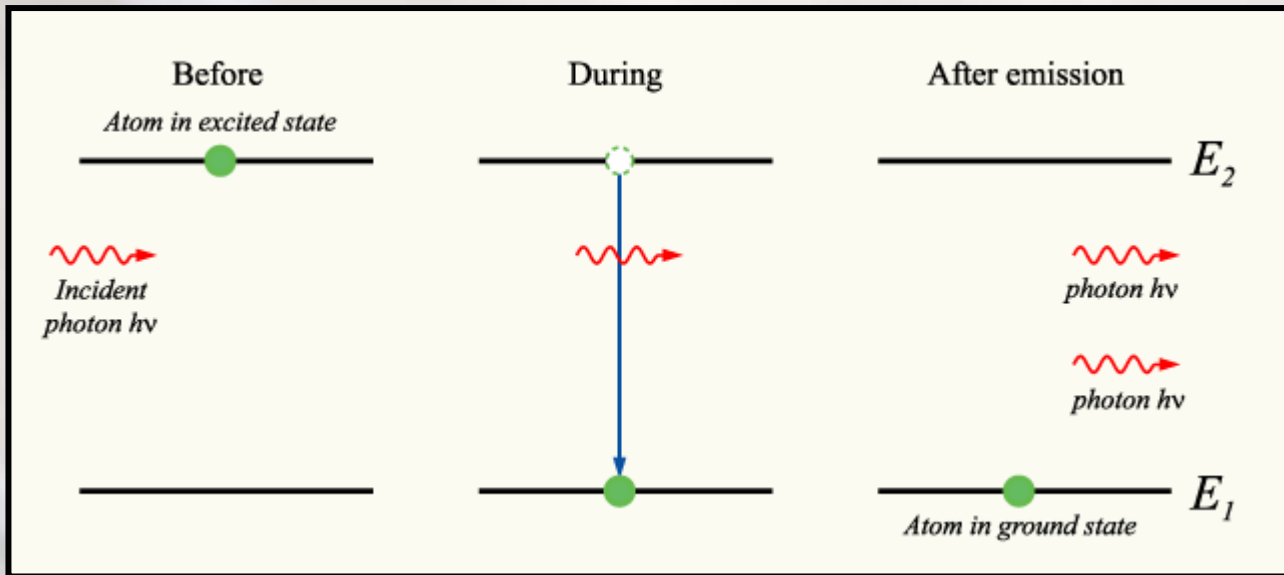


Gap direct

Gap indirect

Matériau couramment utilisé : GaAs, arséniure de gallium
Bande interdite : 1,424 eV, longueur d'onde générée 870 nm

Emission stimulée - Principe



Photon émis : même fréquence, même phase, même polarisation et même direction que le photon incident

Cavité Fabry-Pérot

Ici, résonance possible \Leftrightarrow

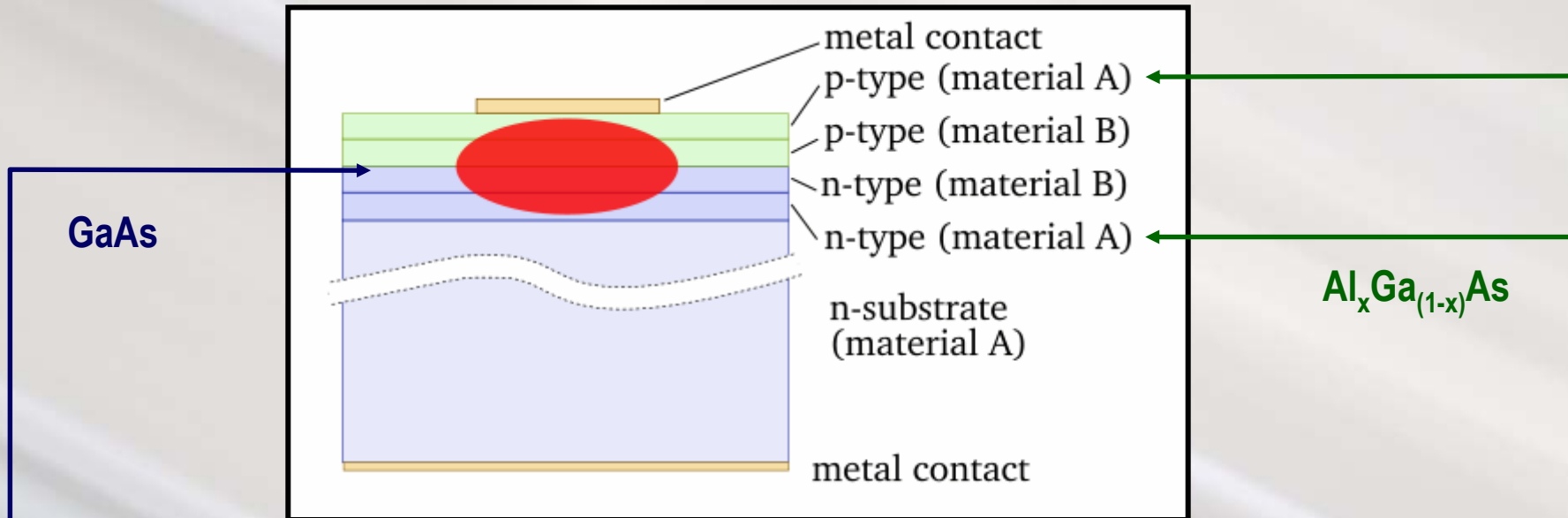
$$G^2 \times R1 \times R2 > 1$$

Déphasage sur un aller-retour : $2k\pi$

$$k \in \mathbb{Z}$$

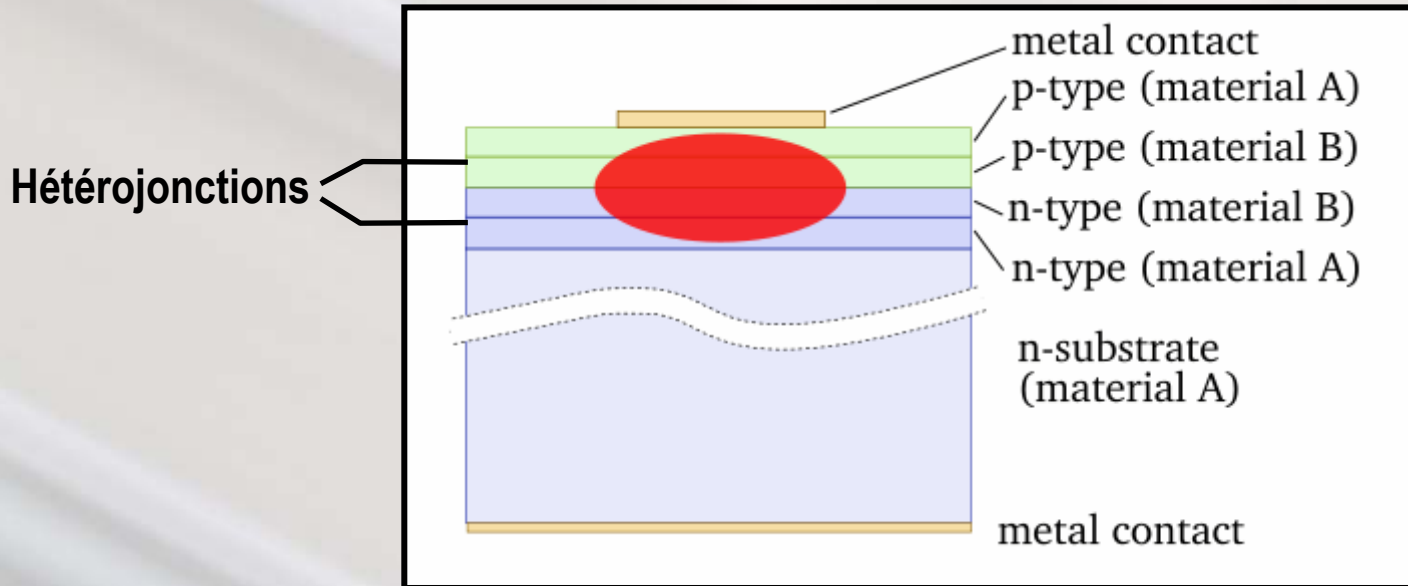


Diodes laser à double hétérostructure



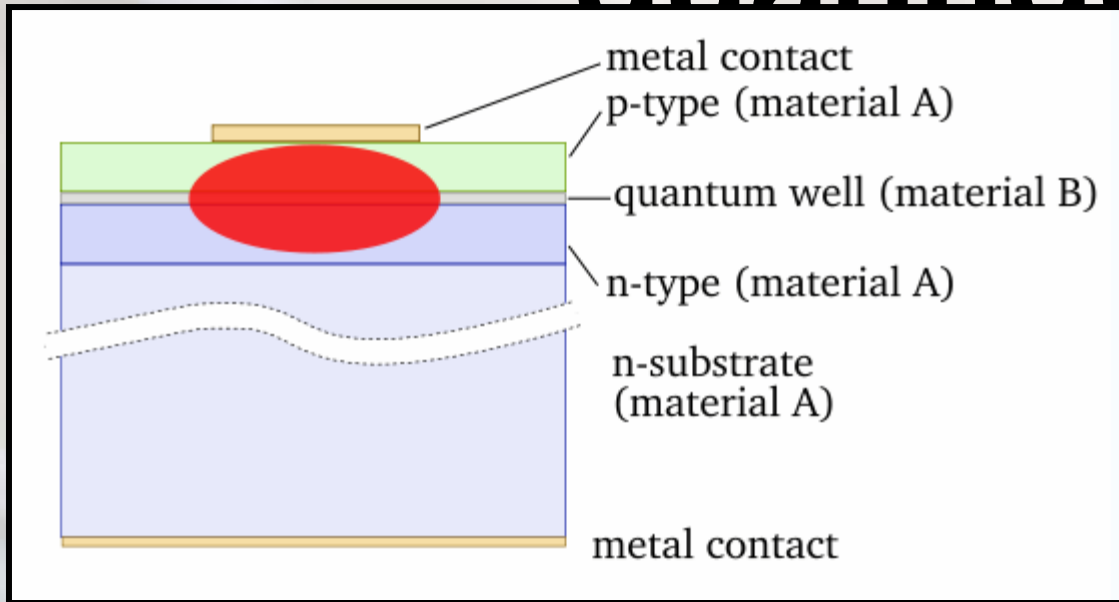
Structure P-N de matériau à faible énergie de gap pris en sandwich dans une structure P-N de matériau à grande énergie de gap.

Diodes laser à double hétérostructure



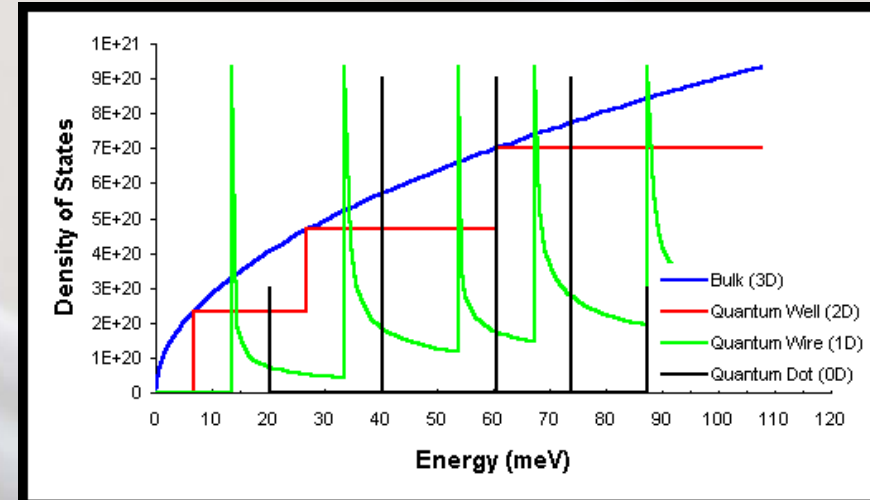
- Les hétérojonctions réfléchissent la lumière, qui est confinée dans la zone d'amplification
- La région où électrons libres et trous coexistent est contenue dans la fine couche du milieu : plus de paires électron-trou peuvent contribuer à l'amplification

Diodes laser à puits quantique



Dans le puits, la variation verticale de la fonction d'onde des électrons est quantifiée.

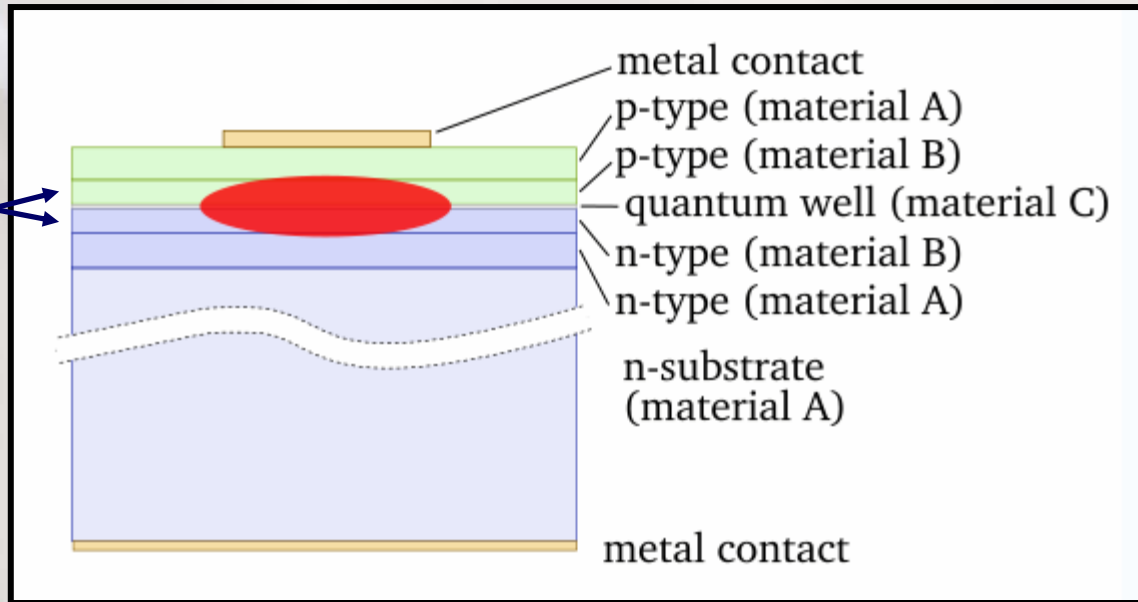
La fonction de densité d'états dans le puits fait que les électrons sont condensés dans des niveaux d'énergie contribuant à l'action du laser.



Evolution de la technologie à puits q.

- Lasers à puits quantiques multiples.
- Réduction des puits quantiques à des « fils quantiques », voire à une « mer » de « points quantiques ».
- A l'état expérimental : lasers à « cascade quantique ».

Lasers SCH (Separate Confinement Heterostructures)



Le puits quantique est trop petit pour pouvoir confiner efficacement la lumière.

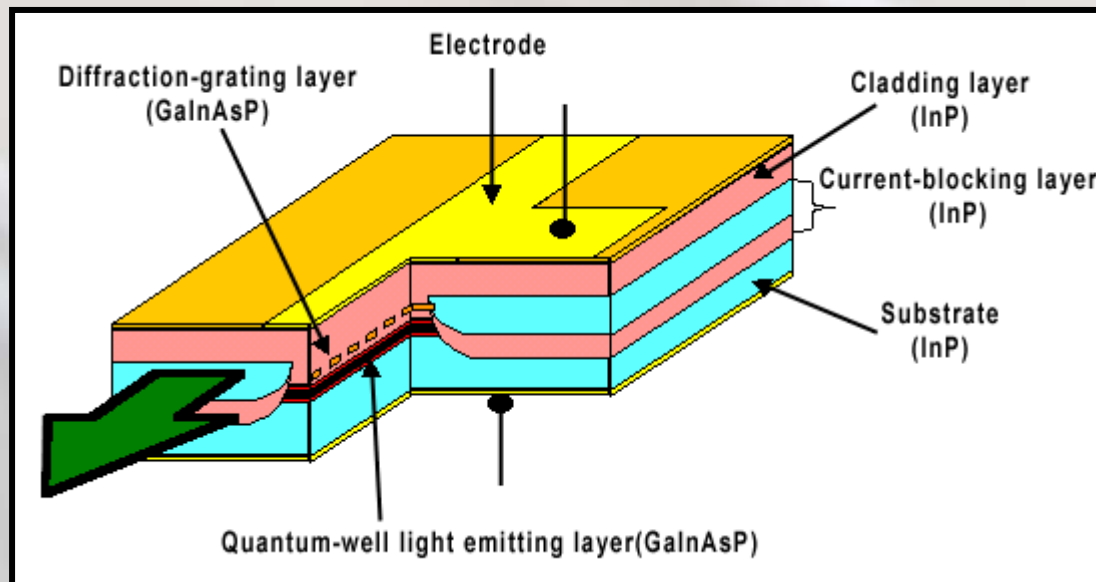
On intercale deux couches supplémentaires de matériau faiblement réfringent pour permettre le confinement.

La plupart des diodes commercialisées depuis 1990 sont des SCH.

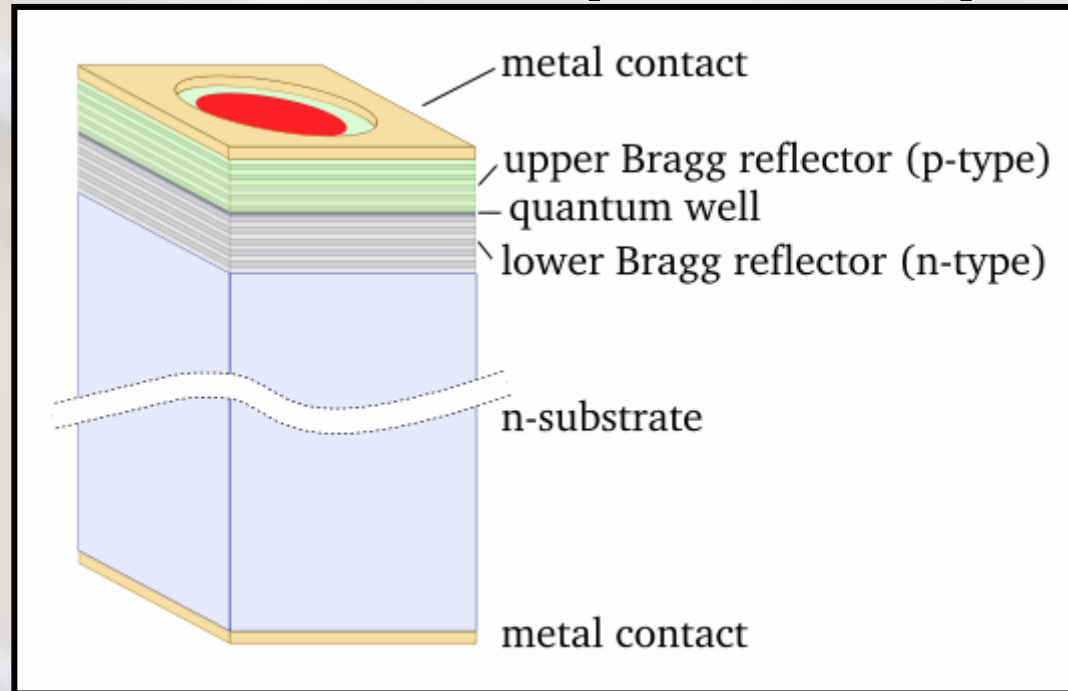
Lasers DFB (Distribution Feedback Lasers)

Mode de transmission très utilisé pour le multiplexage en longueur d'onde (fibres optiques).

On place une grille de diffraction au niveau de la jonction P-N qui fait office de filtre optique : une seule longueur d'onde crée le rayon laser.



Lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL)



L'axe de la cavité optique est le même que l'axe de circulation du courant électrique.

Miroirs de Bragg : couches alternant hauts et bas indices de réfraction
Coefficient de réflexion $> 99\%$

Moins puissant que les autres diodes laser **MAIS...**

Lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL)

... Possibilité d'ajuster la longueur d'onde d'émission en modifiant l'épaisseur des couches des miroirs de Bragg

... L'angle de divergence du faisceau est réduit, pas besoin de lentille

... Le courant de seuil est fortement réduit, ce qui abaisse la consommation électrique du dispositif.

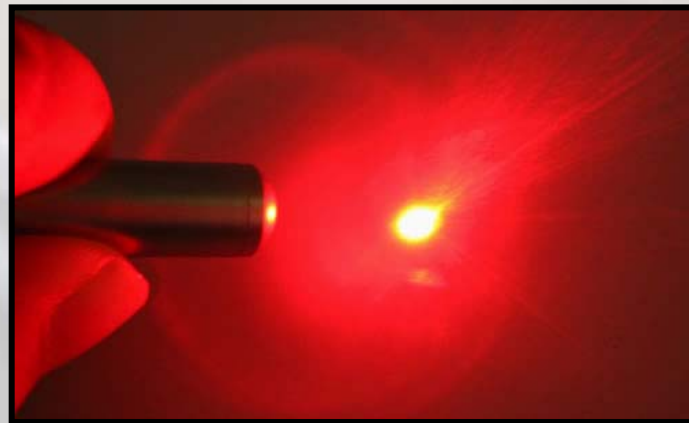
Applications



Fibres optiques

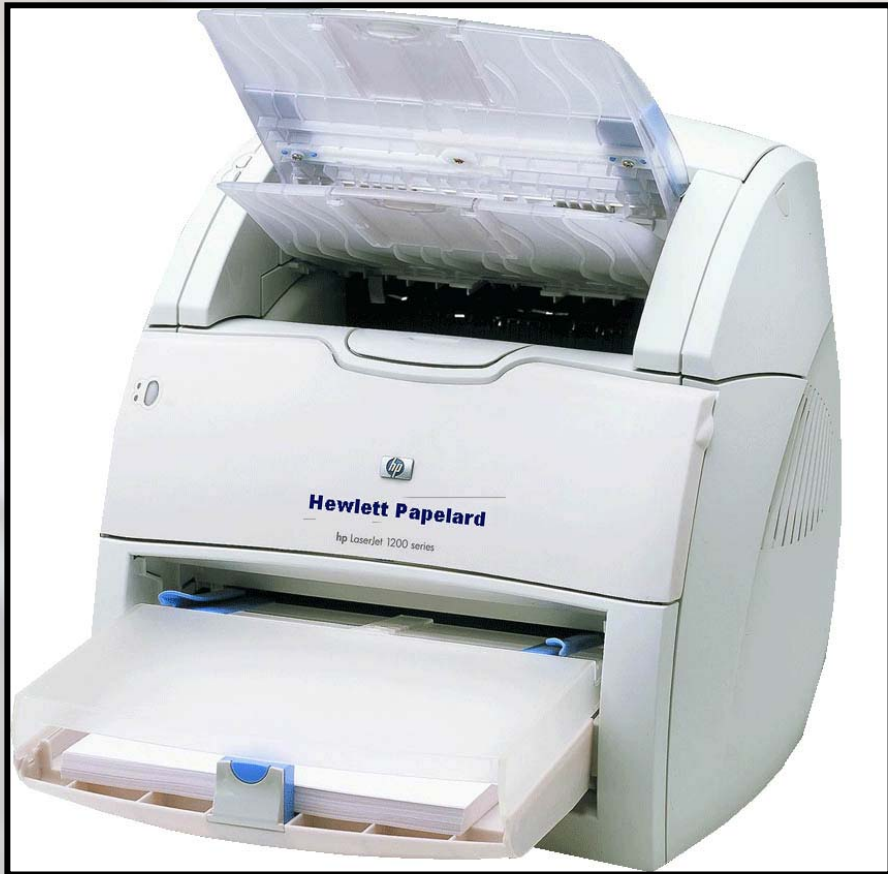


Lecteurs CD, CD-ROM, DVD...



Pointeurs laser

Applications



Imprimantes et scanneurs laser



Nombreuses applications industrielles...

Applications



Etc...



Etc...

(**733 millions** de diodes laser vendues dans le monde en 2004)