

Module OPTOELECTRONIQUE pour LICENCE Filière Télécom

Chapitre III

Les émetteurs et les récepteurs de lumière

Principe de fonctionnement d'un laser

Le **LASER** est un acronyme pour "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (amplification de la lumière par l'émission stimulée de rayonnement).

Mais **comment fonctionne un laser** ? En termes simples : Des particules de lumières (photons) excitées avec du courant émettent de l'énergie sous forme de lumière.

Comme tout **laser**, une **diode laser** fonctionne à l'aide d'un milieu amplificateur (amplification dans les semi-conducteurs par émission stimulée), d'une structure résonante (cavité de Fabry-Pérot ou autre types) et d'un processus de pompage (courant électrique).

Pourquoi les faisceaux laser sont-ils si fins et si concentrés contrairement à une lampe torche ? La lentille de collimation et la dimension de la source lumineuse laser expliquent la finesse du faisceau laser. Les diodes Laser reposent sur des technologies bien différentes en fonction de la couleur émise. En fonction de la couleur du Laser, le principe sera différent : diode laser simple ou diode laser de pompage et cristaux optiques spécifiques.

➤ Fonctionnement électrique d'une diode laser

Electriquement, une diode laser s'alimente comme une LED. Comme toute diode, elle est polarisée. Le courant qui circule dans la diode laser doit être maîtrisé avec une beaucoup plus grande précision que pour une LED. En effet, une pointe de courant, même très brève, ou une décharge d'électricité statique sont fatales à une diode laser. En tension inverse, une diode laser ne supporte que 2 ou 3V, donc attention à la polarité !

Comme une LED, la caractéristique courant-tension fait qu'il s'établit une tension aux bornes de la diode laser qui varie assez peu avec le courant. La diode laser doit donc être contrôlée en courant.



Diamètre : 5.6mm

Courant : 420mA au maximum

Tension : 3.2V

Puissance : 300mW

Longueur d'onde : 650nm

Qu'est ce qu'un LASER



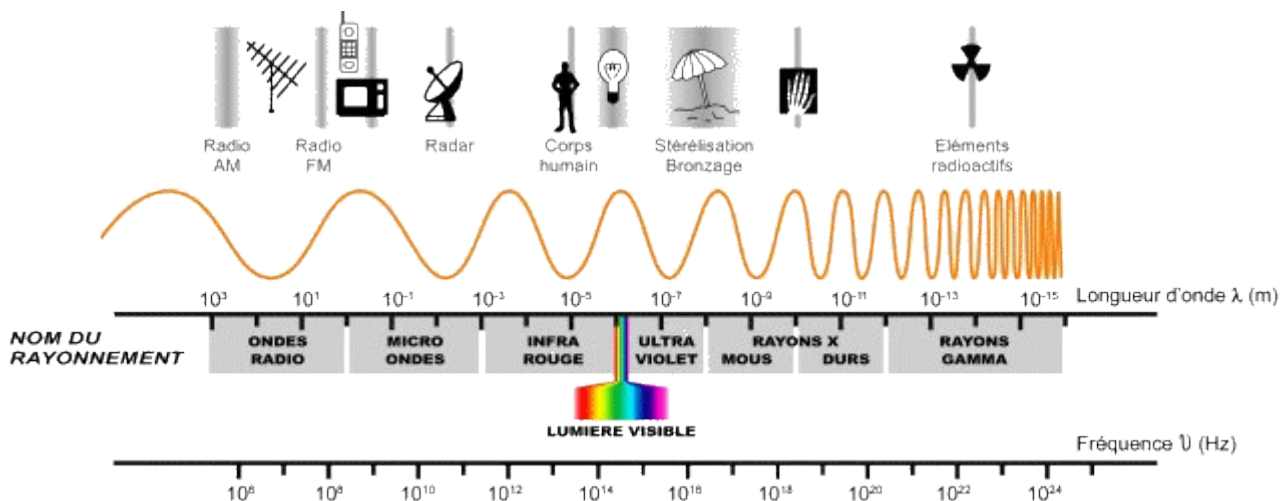
Le LASER est un dispositif qui délivre un faisceau bien particulier, un faisceau LASER se reconnaît au premier coup d'œil car il est différent de la lumière. Les physiciens disent que c'est un faisceau de lumière cohérente. Nous allons voir comment ses propriétés le distinguent de celles de la lumière émise par des lampes classiques. Il y a différents types de lampe: lampes à incandescences, lampes à décharge (tubes fluorescents) , LED (diodes électroluminescentes). Mais toutes émettent leur lumière dans des directions multiples, ce qui est bien adapté pour éclairer une pièce ou une région de l'espace. Au contraire, le faisceau émit par un LASER est un fin pinceau se manifestant, lorsqu'il est arrêté par un obstacle tel qu'un mur, par une tache brillante et presque ponctuelle. Lorsqu'il se propage, même sur de grandes distances, le faisceau LASER reste bien parallèle et localisé. Cette propriété de la lumière LASER s'appelle la cohérence spatiale. Une autre caractéristique du faisceau laser, qui apparaît dans le domaine du visible, est sa couleur : une couleur souvent pure, c'est-à-dire non superposée à d'autres couleurs, elle est donc monochromatique. Il s'agit ici d'une deuxième propriété, appelée la cohérence temporelle. Nous avons donc un début de réponse à la question "qu'est-ce qu'un LASER ?":

Un LASER est un dispositif qui produit de la lumière cohérente (à la fois spatialement et temporellement). Nous allons voir comment cette lumière est produite.

La lumière est une onde électromagnétique, c'est-à-dire un champ électrique et un champ magnétique couplés entre eux et qui se propagent ensemble: on parle de champ électromagnétique. Depuis le XXème siècle, on sait qu'un champ électrique qui varie produit un champ magnétique et réciproquement. Les couplages entre ces deux champs, ainsi qu'avec les charges et les courants électriques qui en sont les sources, sont donnés par les équations de Maxwell (1831-1879) qui décrivent le comportement du champ électromagnétique, les deux champs oscillent à la même fréquence, qui est leur nombre d'oscillations par seconde, et l'ensemble se propage dans le vide à la "vitesse c ", appelée *vitesse de la lumière*. La théorie de la

relativité, développée par Einstein en 1905, nous a appris que cette vitesse est la même pour tout observateur placé dans un référentiel galiléen. Depuis 1983, elle a pris dans le système d'unité internationale une valeur fixée à 299 972 458 m/s, soit environ 300 000 km/s, à l'occasion de la redéfinition du mètre. Si la lumière est une onde électromagnétique, le domaine des ondes électromagnétiques est bien plus large que celui de la lumière visible. Il couvre un vaste domaine de fréquences, comme l'indique le document ci-dessous :

Les fréquences et les rayonnements correspondants :



À Chaque fréquence, nombre d'oscillations pour une unité de temps donnée, est associée une longueur d'onde, donnée par la relation: $\lambda = c/\nu$, où λ est la longueur d'onde exprimée en mètre (m), c est la vitesse de la lumière dans le vide en mètre par seconde (m/s) et ν est la fréquence en hertz (Hz). Les grandes longueurs d'onde correspondent donc aux faibles fréquences et les petites longueurs d'onde aux hautes fréquences. La longueur d'onde dans le visible va de 400 à 800 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ soit 1 milliardième de mètre). Dans ce domaine, notre vision associe à chaque longueur d'onde une couleur: violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge, en suivant l'ordre des longueurs d'onde croissantes. Ce sont les couleurs de l'arc-en-ciel, qu'on obtient en décomposant de la lumière blanche à travers un prisme ou une goutte d'eau.

Au centre du spectre visible, la longueur d'onde est de 600 nm et la fréquence de 500 THz, soit 500 millions de milliards d'oscillations par seconde ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$). La fréquence est l'inverse d'un temps ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$) ; c'est pourquoi la monochromaticité dont on a parlé plus haut est une propriété dite temporelle de la lumière.

La puissance du LASER

La puissance d'un LASER est le nombre de photons qui traversent le LASER pour une unité de temps donnée. Dans cette partie nous nous intéresserons au calcul du nombre de photon qui traversent une surface S pour une unité de temps donnée, ici la seconde(s). La formule liant le nombre de photon à la puissance est: $P = n \times h\nu$, où P est la puissance en Watt (W); n représente de nombre de

photon émis par seconde; h est la constante de Planck exprimée en Joule / Seconde (J/s) et ν la fréquence en Hertz (Hz).

On va chercher la puissance du LASER Excimer :

Les LASER Excimer ont une sortie moyenne de 200 Watts, donc leur puissance est de 200 W, la longueur d'onde utilisée par ces LASER est de 193 nm soit 193×10^{-9} mètres.

Formule : $P = n \times h\nu$ donc $n = P/h\nu$

$$\nu = c/\lambda = 3.00 \times 10^8 / 193 \times 10^{-9} = 1.55 \times 10^{15} \text{ Hz ;}$$

$$h\nu = 6,626 \times 10^{-34} \times 1.55 \times 10^{15} = 1.03 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$n = P/h\nu = 200 / 1.03 \times 10^{-18} = 1.94 \times 10^{20}$$

Le LASER excimer émis 1.94×10^{20} photons par seconde.

A partir du nombre de photon nous pouvons calculer la puissance du LASER excimer qui est de $P = n \times h\nu = 1.96 \times 10^{20} \times 1.03 \times 10^{-18} = 200 \text{ W}$.

Voici un LASER Excimer



Les différents types de LASER

Diode laser rouge 300mW 650nm

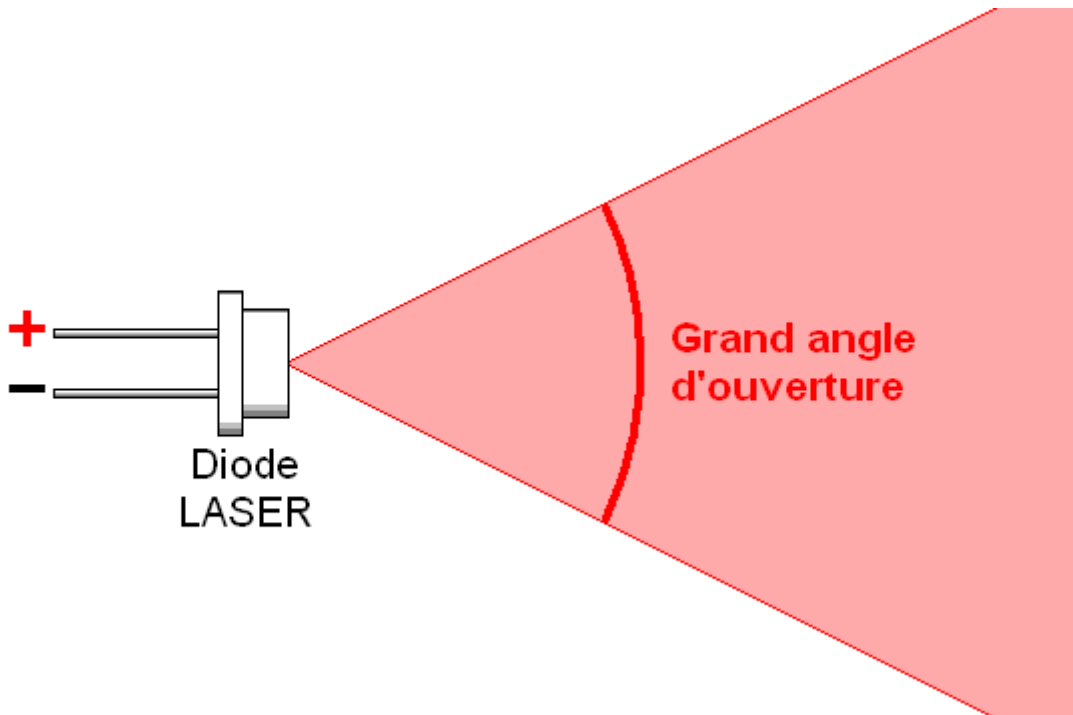
Courant de seuil d'une diode laser

La lumière "laser" ne commence à être émise qu'à partir d'un certain courant (10 à 25% du courant maximum). Par exemple, il faut au moins 80mA pour commencer à voir le faisceau laser rouge pour la diode laser 300mW. Ce phénomène n'existe pas sur les LED.

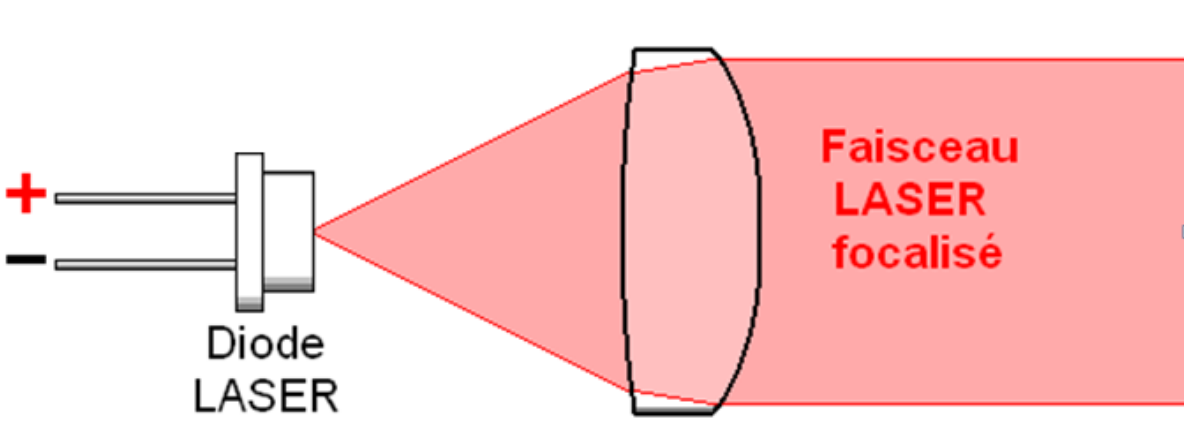
Faisceau laser fin

La finesse d'un faisceau laser et sa très faible divergence ne sont que des propriétés d'optiques géométriques de base, rien à voir avec la nature de la lumière

(longueur de cohérence, largeur spectrale, polarisation). C'est toujours la lentille qui crée l'allure du faisceau laser. Une diode laser sans lentille émet un faisceau sur une grande ouverture (20 - 60° d'angle)



Faisceau émis par une diode Laser sans lentille



Faisceau émis par une diode Laser avec lentille

C'est la lentille qui réduit l'angle de divergence à 0,001 radian environ. On ne peut pourtant pas transformer une LED en faisceau Laser... Pourquoi ? En fait, l'étendue de la source lumineuse laser est extrêmement petite (quelques microns) et c'est pour cela que le faisceau diverge très peu. C'est une source quasi ponctuelle extrêmement intense.

➤ Les différents lasers

On ne peut donc pas créer un faisceau ressemblant à un faisceau laser à partir d'une LED, ni une ampoule halogène très puissante :

NOTA : les lampes halogènes sont dotées d'une ampoule en verre de quartz, supportant de hautes températures, dans laquelle on a introduit des gaz halogénés à haute pression. Ce procédé permet de porter le filament à plus haute température et donc de produire une lumière plus éclatante, tout en assurant à l'ampoule halogène une durée de vie plus importante.

Projecteur très puissant avec lampe halogène 24V 250W et lentille de Fresnel

Projecteur LED 1000W

Attention : même sans lentille, une diode laser est dangereuse pour les yeux ! L'image qui s'en forme sur la rétine est très ponctuelle, donc très concentrée.

Dans une diode laser simple, le courant électrique est directement converti en lumière laser, comme dans une LED.

Exemples de lasers :

- Laser rouge 650nm (pointeurs laser rouge, lasers pour lightshow)
- Laser rouge 635nm (diodes industrielles spécifiques)
- Laser vert 520nm
- Laser bleu 445nm (diodes laser 1W et 2W pour lightshow)
- Laser bleu 405nm



Diode laser bleu 1W 445nm

Laser DPSS : Diode pumped solide state

C'est l'autre grande famille de lasers à semi-conducteurs. Sans trop entrer dans la théorie de la physique, on peut dire que le principe est différent et que la lumière laser finale est obtenue en plusieurs étapes. Exemple : le laser vert 532nm très courant depuis les années 2000. Voici les éléments successifs typiques qui aboutissent au laser vert 532nm.

Diode laser de pompage et cristaux

La source électrique (piles 1,5V dans les pointeurs, cartes d'alimentation pour les lasers de discothèque) alimente une puissante diode laser infrarouge qui excite un cristal spécifique. Cette diode est la source d'énergie optique : c'est la diode de pompage (elle réalise le "pompage optique"). Souvent, sa longueur d'onde est de 808nm (proche infrarouge).

Le rendement de la diode laser de pompage va de 10 à 25%.

Le faisceau de la diode de pompage est souvent parallèle au faisceau de la cavité laser. Ce type de pompage est plus efficace que le pompage transverse mais requiert aussi plus d'éléments optiques et de réglages.

Autre technique : une puissant tube à éclat (type stroboscope) pour génère un puissant flash qui irradie le cristal

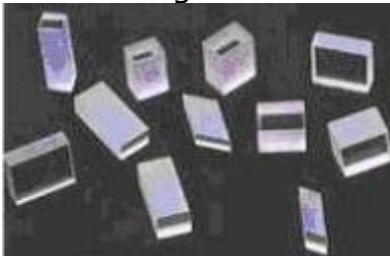
Cristaux Nd:YVO4 ou Nd:YAG

Ce cristal (d'où le nom "solid state") est irradié par la diode laser de pompage (808nm). Recevant cette énergie concentrée, il convertit la longueur d'onde de 808nm en une nouvelle longueur d'onde : 1064nm (914nm, 946nm, 1342nm aussi possibles...).

Le cristal Nd:YVO4 est avantageux par rapport au plus ancien Nd:YAG : il encaisse davantage de puissance et est moins sensible aux variations de longueur d'onde de pompage. Un excès de puissance dégrade définitivement le cristal.

Nd:YVO4 = orthovanadate d'yttrium dopé au néodyme

Nd:YAG = grenat d'aluminium et d'yttrium dopé au néodyme



Des cristaux Nd:YVO4 pour applications laser

Doubleur de fréquence

Un second cristal a pour but de doubler la fréquence optique, c'est-à-dire diviser par 2 la longueur d'onde.

A son entrée : lumière laser à 1064nm (infrarouge)

A sa sortie : lumière laser à 532nm (vert visible !)

Ce cristal est composé phosphate de titanyle potassium (formule chimique : KTiOPO_4 , abrégé "KTP") pour les lasers verts (532nm). Pour les lasers bleus 473nm, le triborate de lithium est aussi utilisé (formule chimique : LiB_3O_5 , abrégé "LBO").

cristaux LBO pour applications laser

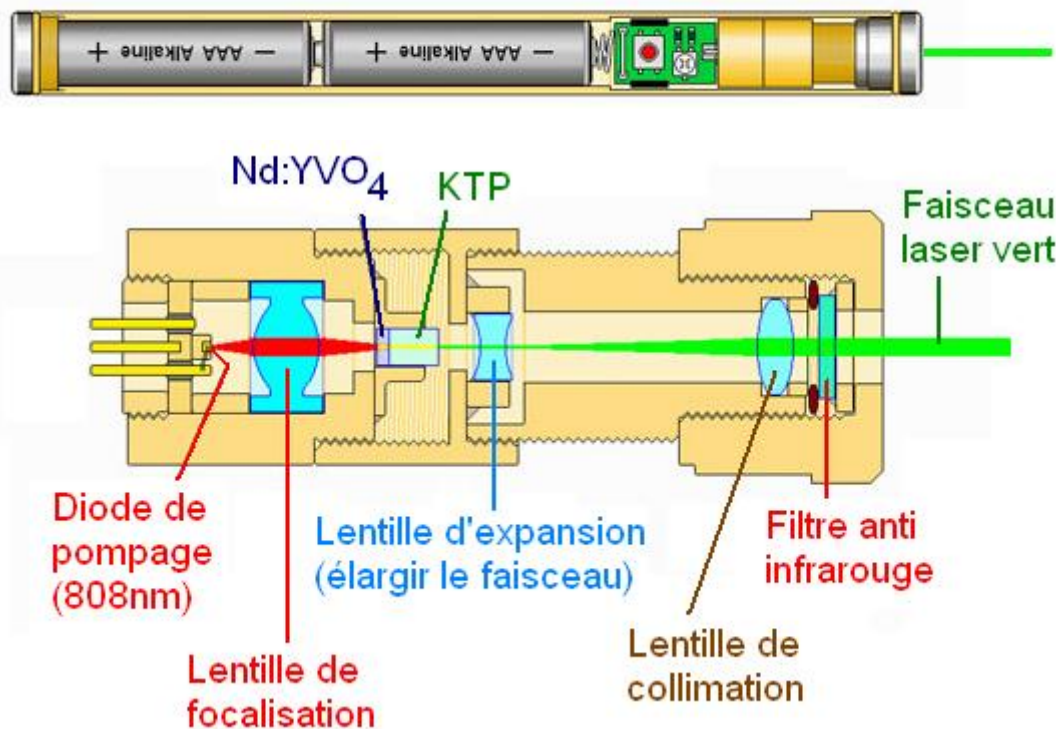
Le doubleur de fréquence repose sur l'optique non linéaire. Ces propriétés apparaissent à des champs électromagnétiques intenses (forte irradiation en

1064nm ou 946nm). La polarisation d'une molécule n'est pas tout à fait proportionnelle au champ électrique mais dépend aussi de son carré. *Cette composante quadratique explique le doubleur de fréquence.*

A la modeste lumière du jour, un cristal doubleur de fréquence est transparent et ne modifie nullement les couleurs ! Aucune couleur psychédélique ne se révèle quand on regarde à travers...

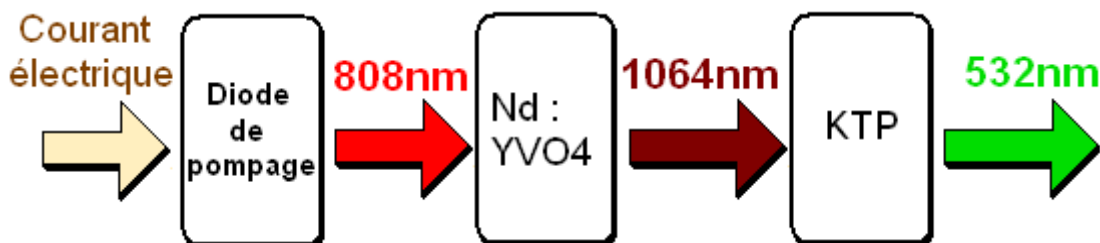
Éléments d'un pointeur laser vert

Voici un pointeur laser vert vu en coupe :



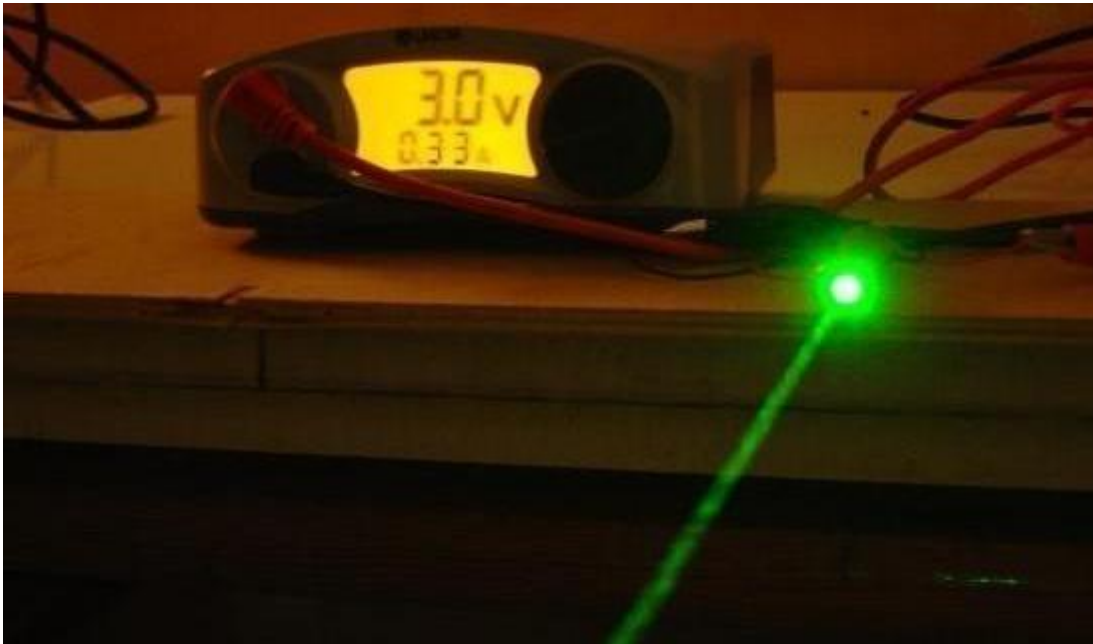
Pointeur laser vert : _diode de pompage, Nd:YVO₄ et KTP

Le filtre anti infrarouge empêche l'infrarouge résiduel de sortir.

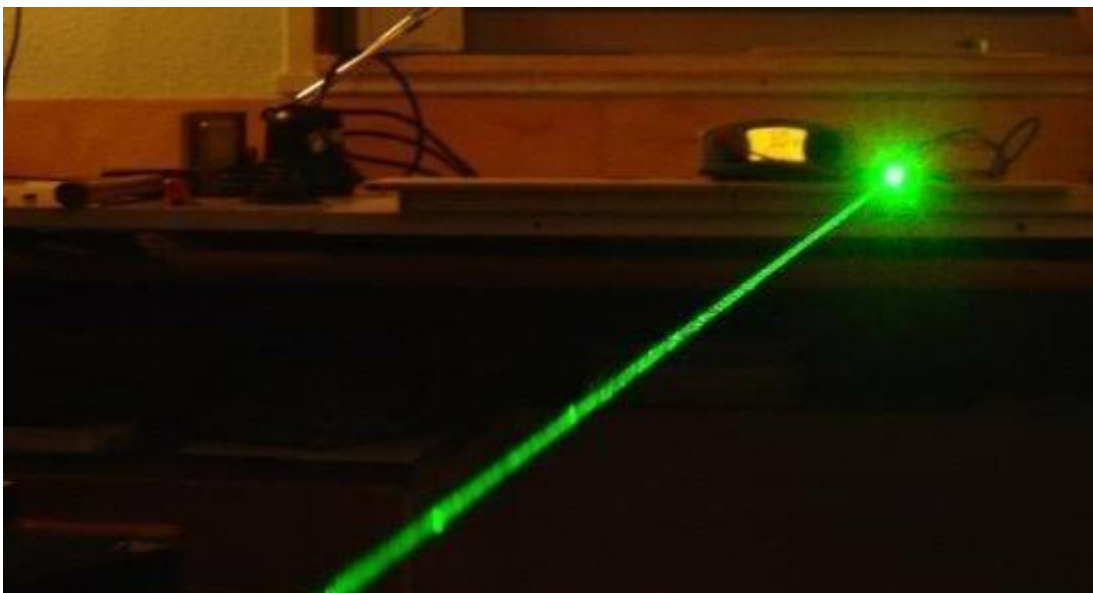


Vue synoptique d'un laser vert 532nm

Le rendement d'un laser vert (puissance optique à 532nm / puissance électrique consommée) va de 1 à 5% environ.



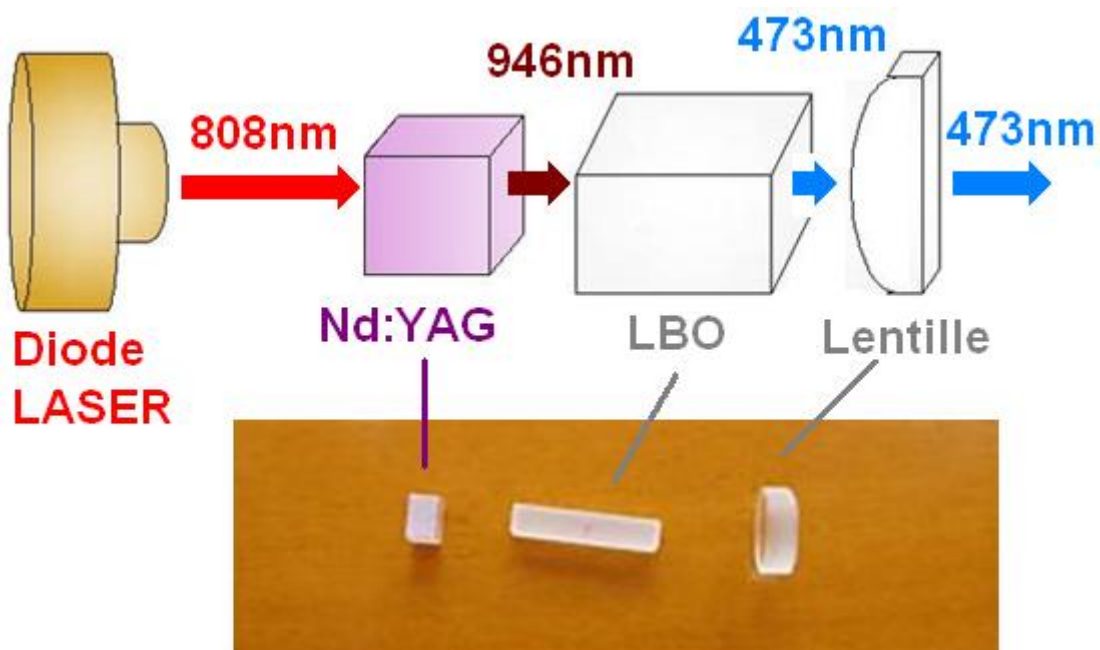
Laser vert 50mW alimenté par un courant de 330 mA



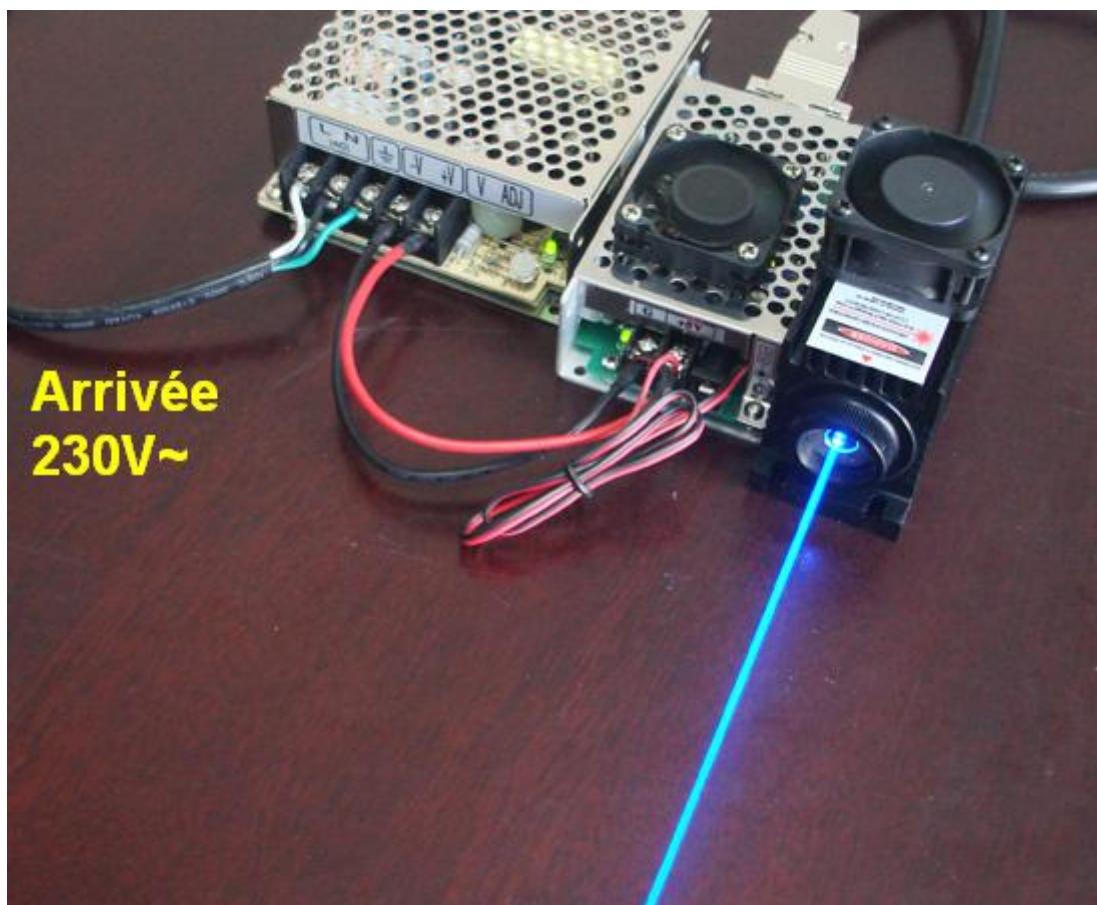
Diode laser vert 50mW 532nm en test

Éléments d'une diode laser bleu 473nm

C'est le même principe qu'un laser vert, sauf que le doubleur de fréquence est un cristal de LBO, optimisé pour transformer 946nm en 473nm.



Diode laser bleu 473nm : principe et éléments optiques



Diode laser bleu 473nm : rendu d'une diode laser 10mW

Laser jaune à 593nm

Le laser jaune aussi obtenu par pompage. Le cristal non linéaire ne double pas la fréquence mais combine deux longueurs d'ondes (1064nm et 1342nm) en additionnant leurs énergies respectives.

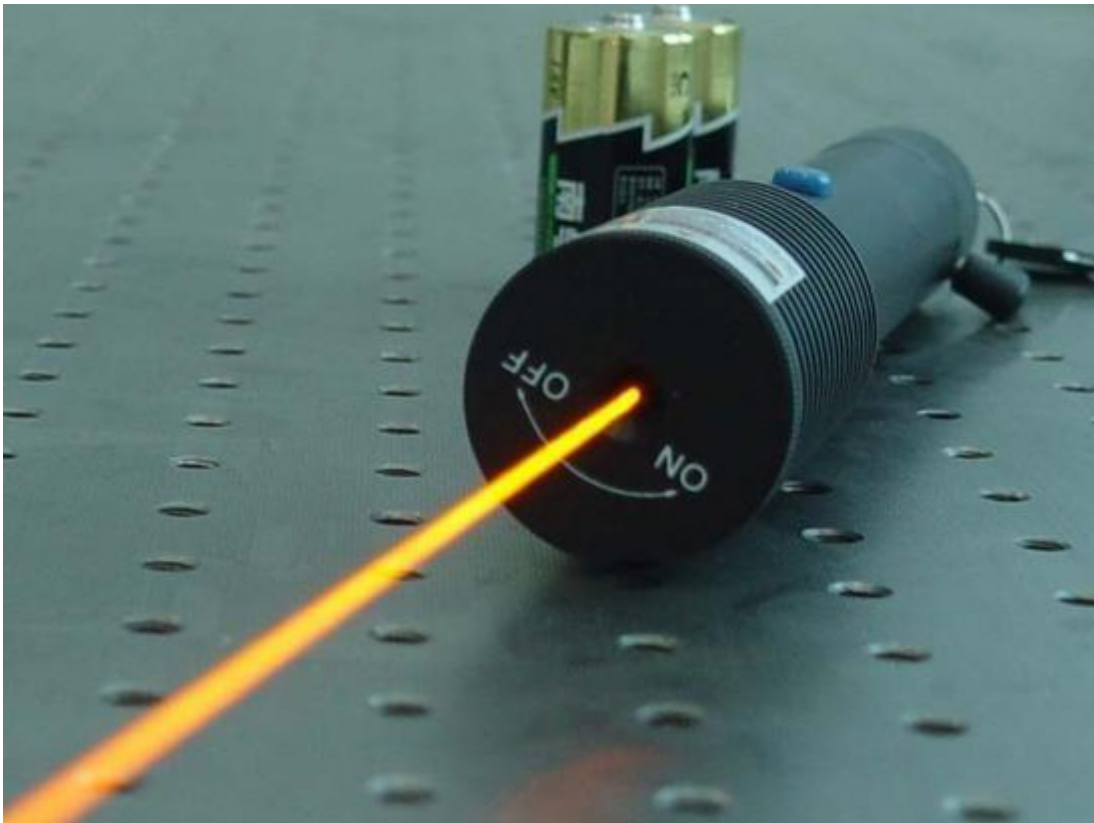
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

h : constante de Planck

ν (nu) : fréquence du photon en Hz

$$E = \frac{hc}{1064nm} + \frac{hc}{1342nm} = \frac{hc}{593nm}$$

On obtient un faisceau laser à 593nm (jaune ambré).



Laser jaune 593nm

Laser jaune : rouge + vert

En lightshow (spectacles, discothèques), les lasers jaunes sont la somme de laser rouge et de laser vert pour des raisons économiques. L'œil voit du jaune, comme sur un écran de télé, c'est la synthèse additive des couleurs. Il y a synchronisation entre les 2 miroirs mobiles où se réfléchit le faisceau et l'allumage commandé des diodes laser pour produire des zones rouges, vertes et jaunes.



Jeu de lumière Laser tricolore : rouge, vert et jaune ("RGY"= Red Green Yellow)

Laser blanc : rouge + vert + bleu

En lightshow (spectacles, discothèques), les lasers blancs sont la somme de laser rouge, laser vert et laser bleu. L'œil voit du blanc, comme sur un écran de télé, c'est la synthèse additive des couleurs.



Blanc obtenu par la rencontre du rouge, du vert et du bleu



Jeu de lumière Laser tricolore : rouge, vert et bleu ("RGB"= Red Green Blue)

Le laser bleu peut être à 473nm ou à 445nm.

Laser rouge Hélium-Néon 633nm

Cet ancien laser utilise un gaz (mélange Hélium-Néon) pour produire une lumière laser à 633nm.



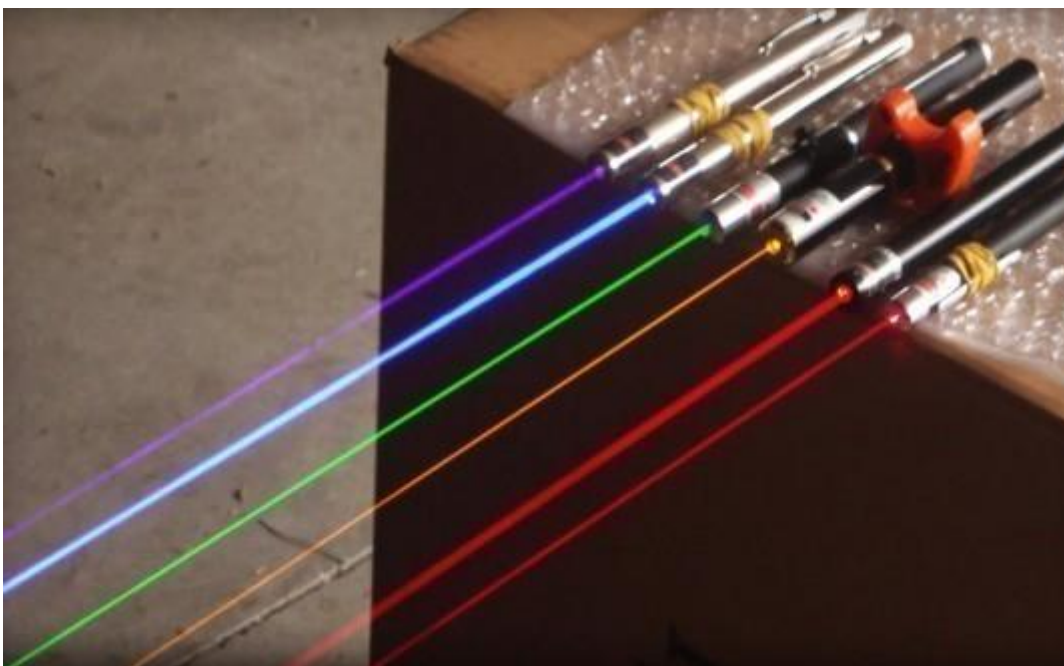
Laser Hélium Néon (He-Ne) à 633nm

Aucun semi-conducteur n'est utilisé dans ce laser.

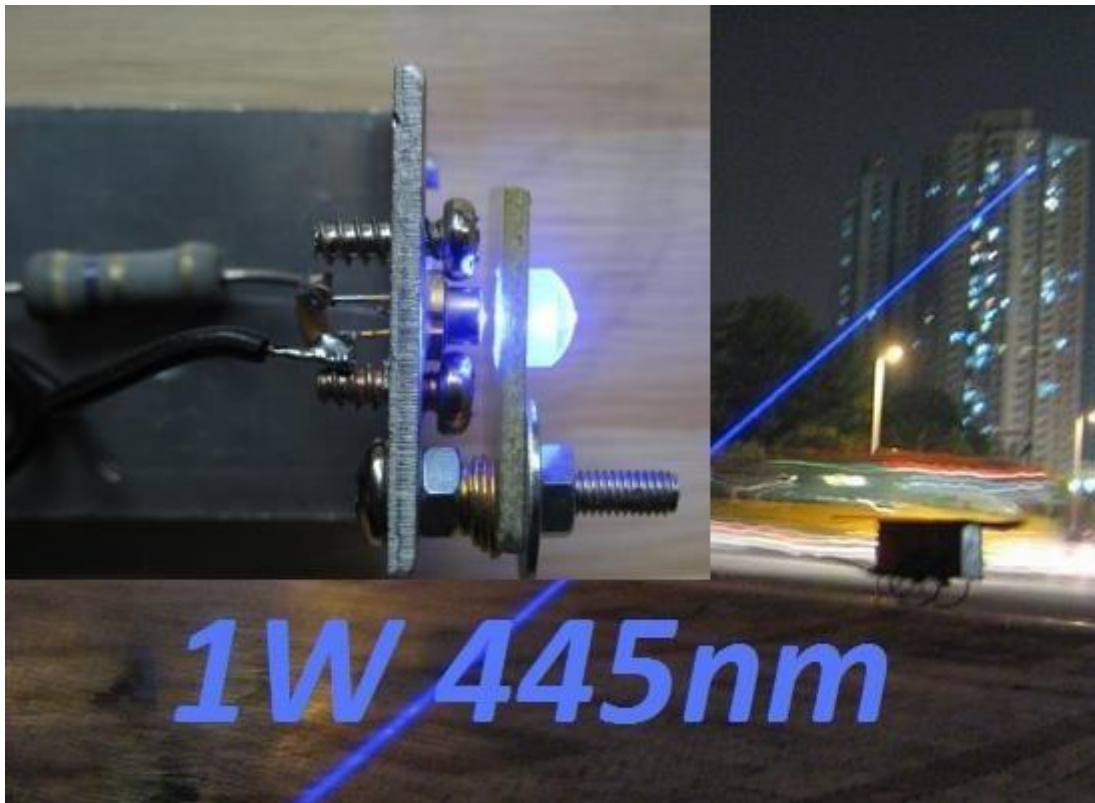
Récapitulatif des lasers

Les Lasers DPSS sont les lasers bleus à 473nm, vert et jaune. Les autres lasers convertissent directement le courant électrique en lumière laser sans passer par un cristal et un doubleur de fréquence.

Longueur d'onde (nm)	405	445	473	532	593	635	650
DPSS			X	X	X		



De gauche à droite : pointeurs laser à 405, 473, 532, 593, 635 et 650nm



Exemple de réalisation de laser bleu 1W (1000mW)

Couleur du laser bleu : bleu, indigo, violet ?

Deux types de laser bleus existent : le laser bleu à 473nm et le laser bleu à 445nm (ou 447nm, ou 450nm). Ici, c'est un laser bleu à 445nm qui est présenté. Le principe de fonctionnement est une diode laser qui émet directement à la longueur d'onde bleue, contrairement aux lasers verts et bleus 473nm qui possèdent une diode laser infrarouge, un cristal qui convertit la puissance optique infrarouge (808nm) en une autre longueur d'onde (elle aussi infrarouge, par exemple 1064nm), puis un doubleur de fréquence qui permet d'obtenir la couleur finale visible (par exemple vert 532nm à partir de 1064nm).



Laser bleus et violet : 405nm (Blu-ray), 445nm et 473nm

Il existe aussi le laser violet à 405nm qu'on trouve sous forme de diodes ou de pointeurs, mais aussi dans les lecteurs Blu-ray.

Le laser bleu à 445nm donne un très joli bleu indigo qui tire sur le violet.

Réalisation du laser bleu 1000mW (1W)

La diode laser bleu 1W chauffe beaucoup et très rapidement. Il est impératif de monter la diode laser elle-même sur un radiateur. On peut la fixer simplement avec deux vis qui la maintiennent de chaque côté. Il faut mettre de la pâte

thermoconductrice. La lentille permet à la diode laser de focaliser la lumière en un faisceau fin typique des lasers (ou de l'image qu'on s'en fait !). Contrairement aux optiques pour lumière blanche (vidéoprojecteurs, appareils photos, phares de voiture, jeux de lumière, etc), la lentille ne souffre pas d'aberrations chromatiques vu que le laser n'émet qu'une seule longueur d'onde !



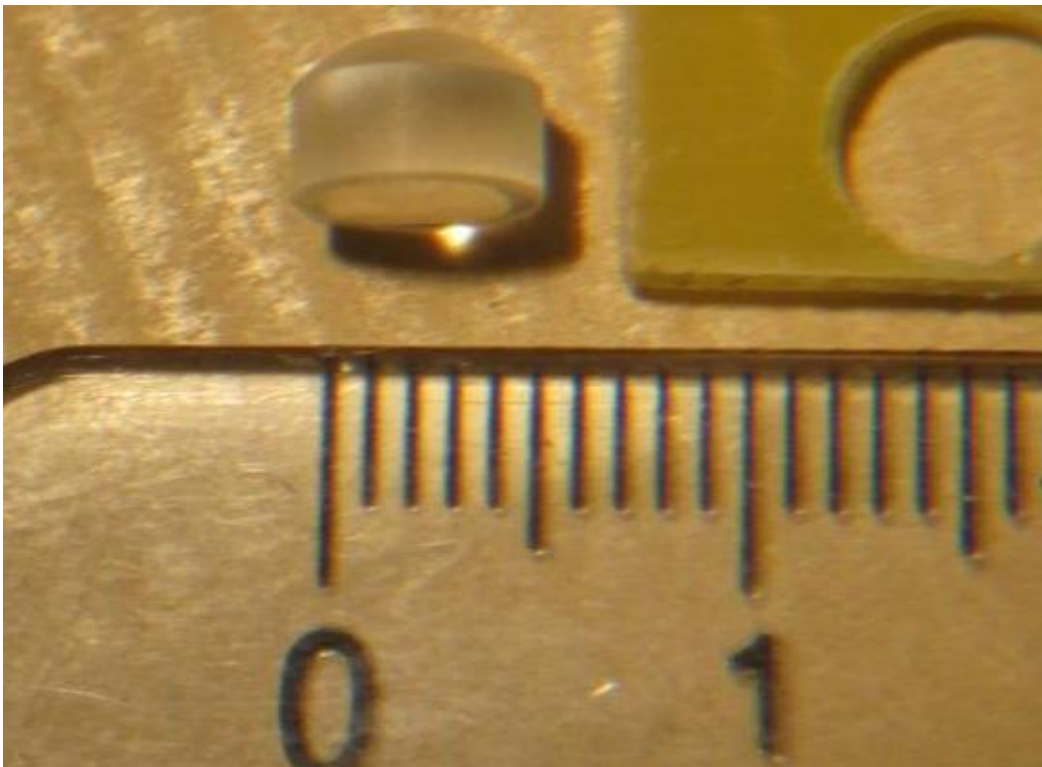
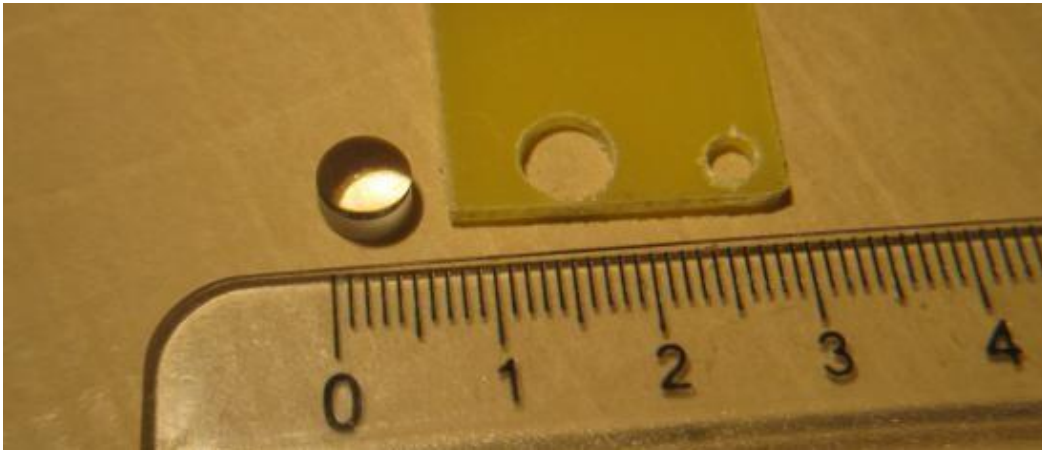
Lentille de collimation pour diode laser



Lentille pour diode laser bleu 1W 445nm

Fixation de la lentille pour la diode laser

La lentille peut être fixée sur un morceau de circuit imprimé percé au bon diamètre :



Lentille pour diode laser bleu 1W La diode laser bleu 445nm est fixée au radiateur en alu :

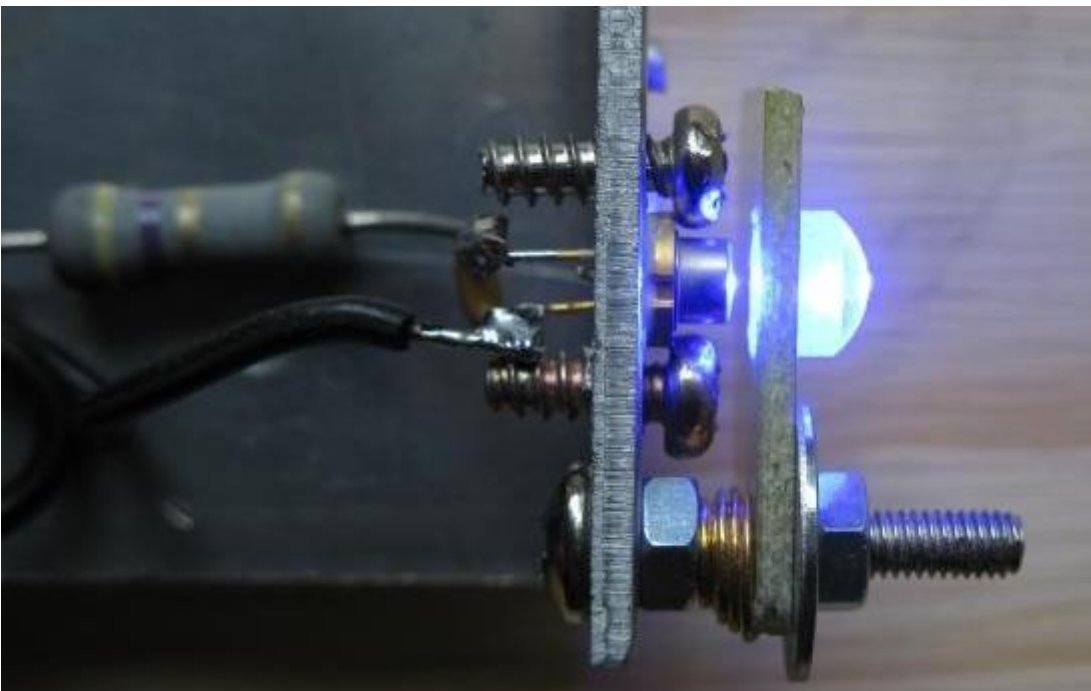


Diode laser bleu 1W 445nm

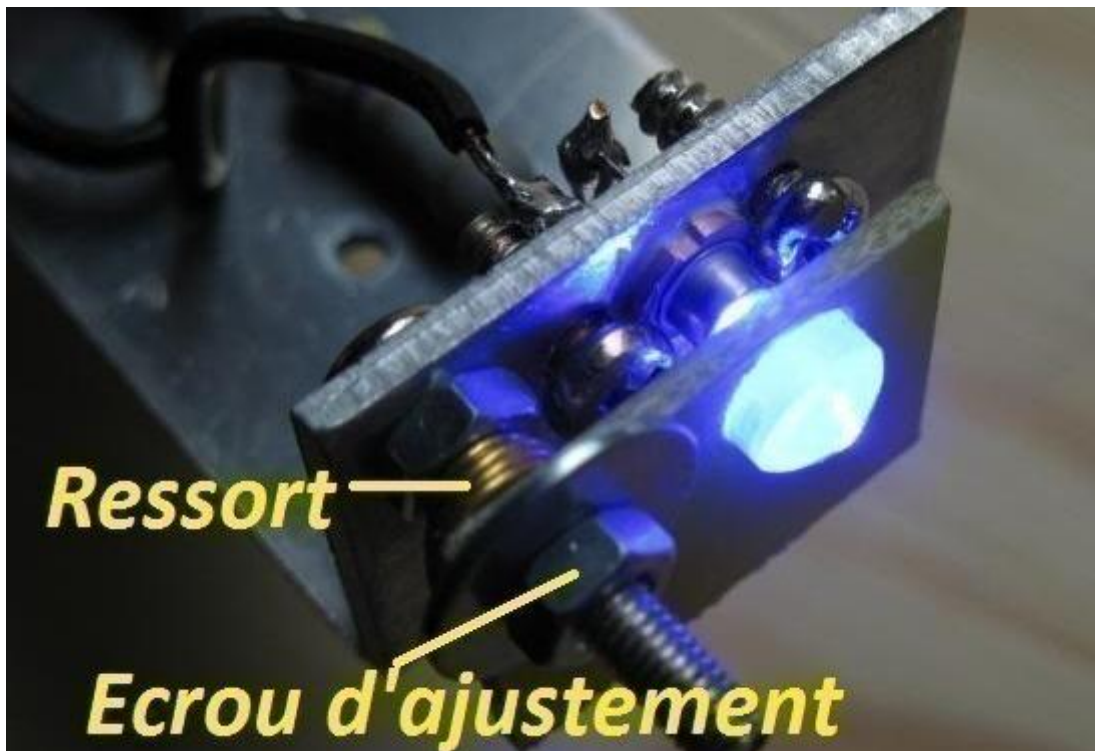


Diode laser bleu 1W sans lentille

La longue vis sur le côté sert à fixer et ajuster la position de la lentille face à la diode laser. Il est essentiel d'être dans l'axe optique et à la bonne distance (distance focale de la lentille). Le circuit imprimé qui maintient la lentille est fixé entre un écrou et un ressort. En jouant sur la position de l'écrou, on règle assez précisément la distance entre la diode laser et la lentille. On peut ensuite tourner le circuit imprimé pour le mettre bien en face de la diode laser. Bien sûr, il n'y a qu'un seul degré de liberté. Si la distance vis-lentille est mauvaise, il faut jouer sur les écrous pour ajuster la distance entre la diode laser et la lentille.



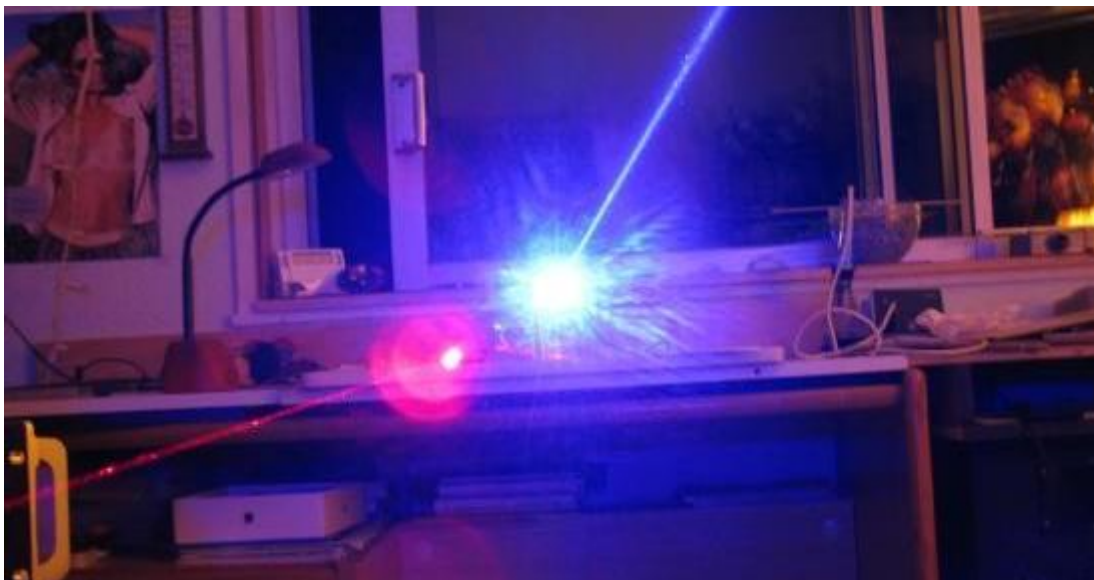
Laser bleu 1W vu de profil



Diode laser bleu 1W avec lentille montée

Ajustement et rendu du laser bleu 1W

Par comparaison avec une diode laser rouge 300mW 650nm :



Diode laser bleu 1W 445nm et diode laser rouge 300mW 650nm

Le faisceau issu du laser bleu est bien visible !

Alimentation de la diode laser 1W

Alimentation des diodes laser 1W et 2W 445nm

Il semble que le courant maximum des diodes laser 445nm soit :

- Laser bleu 1W : 1,2A
- Laser bleu 2W : 1,8A

Il est prudent de garder une marge vis à vis du courant maximum.

La diode laser bleu 1W absorbe une puissance d'environ $4,5V \times 1,2A = 5,4W$ pour produire environ 1W de lumière bleue. Son rendement est donc de 15 à 20%.

La tension aux bornes de la diode laser bleu 445nm s'établit autour de 4,5V. Il ne faut jamais essayer de brancher la diode laser sur une source de tension de 4,5V parce qu'une petite variation de tension entraîne une forte variation de courant, comme pour les LED. Il faut une régulation en courant (driver) ou pour débiter, une résistance série avec une alimentation stabilisée.

Alimentation la plus simple du laser

L'alimentation peut se faire avec une simple résistance série de puissance et un adaptateur stabilisé (6V à 9VDC comme tension idéale). Comme il n'y a pas de régulation, il est prudent de garder une bonne marge et ne pas viser le courant maximum nominal de la diode laser. L'adaptateur doit pouvoir fournir le courant nécessaire et ne pas créer de surtension lorsqu'on le branche au secteur 230V.

Premier essai avec la diode laser 1W.

Un premier essai a été fait avec un adaptateur stabilisé 6,5V / 1A et une résistance série de 4,7 Ohms / 3W. La résistance série fixe le courant à 0,5 à 0,6A environ. Toute la puissance du laser n'est pas exploitée, mais cela garantit une bonne marge. Sur la petite plaque en aluminium, la dissipation n'est pas suffisante pour permettre un fonctionnement permanent. Au bout d'une minute, le diode laser est déjà brûlant !

Attention : **il est impératif de souder un condensateur (1nF à 100nF) en parallèle avec la diode laser** pour la protéger contre les surtensions si on place un interrupteur entre la source de tension continue et la diode laser. La longueur du fil qui relie l'alimentation à votre diode crée une inductance parasite qui suffit à générer une surtension destructrice ! Si la diode claque, elle émet ensuite une lumière bleue très faible frisant le ridicule. Sa caractéristique électrique en revanche ne change pas, mais elle ne pourra plus fonctionner correctement.

Lentille de collimation et diode laser

Lorsqu'on décale la lentille, la focalisation de la lumière ne se fait plus bien et le faisceau laser bleu s'élargit et ressemble à une simple flaque de lumière, un peu comme une LED :



Diode laser bleu et lentille très légèrement désaxée



Diode laser bleu 1W et lentille de collimation désaxée

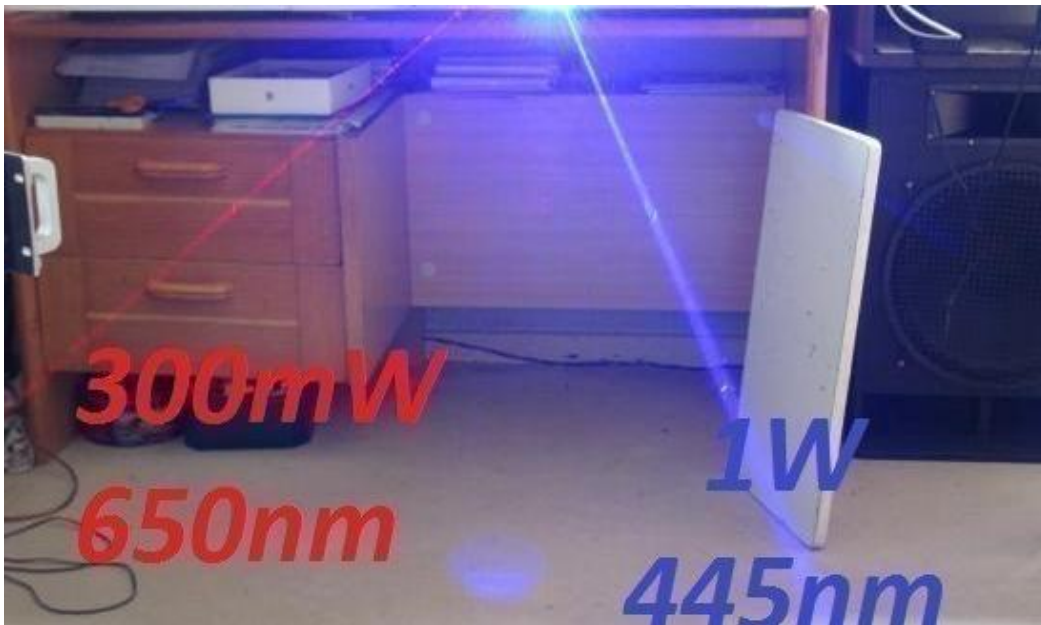


Diode laser bleu et lentille désaxée (encore plus)

Attention, la source laser reste très ponctuelle et il est dangereux de regarder en direction de la diode laser ! On comprend bien ici que le rayon laser est dû à l'optique (lentille) et à la très petite taille de la source lumineuse. Ce qui caractérise le laser, c'est plutôt la précision de la longueur d'onde. L'étalement du spectre lumineux est extrêmement réduit, contrairement à une LED dont le spectre est une cloche assez large. Pour les effets visuels (jeux de lumière), cela n'a pas vraiment d'importance ! Tous les lasers courants possèdent une lentille pour focaliser la lumière en un faisceau fin et précis. Pour plus de détails sur la technologie et l'optique des lasers :

Technologie des diodes LASER : rouge, bleu et jaune

Lorsque la lentille est le mieux alignée avec la diode laser bleu, le faisceau est assez visible, même en plein jour :



Faisceau visible du laser bleu 1W 445nm

Note d'information sur les diodes laser bleu A140 et M140

La diode laser M140 est une diode laser 445nm 2W de 5,6mm de diamètre et se trouve dans les projecteurs série M. Il ne faut pas les confondre avec les diodes laser série A (A140) qui ne font que 1W. Si un vendeur recommande un courant maximum de 1,2A, il s'agit sans doute d'une diode laser A140 (1W).

La diode laser M140 fournit typiquement 2,2W (2200mW !) à 1,8A. Cette puissance varie de 1,9W à 2,5W d'une diode à l'autre



Diode laser 445nm : 1W et 2W

La diode laser 1W (A140) n'a que 3 fils de liaison du support jusqu'à la diode laser elle-même. La diode laser 2W (M140) a 4 fils de liaison. La diode laser 2W a aussi une partie active laser un peu plus large (carré gris fixé au métal).

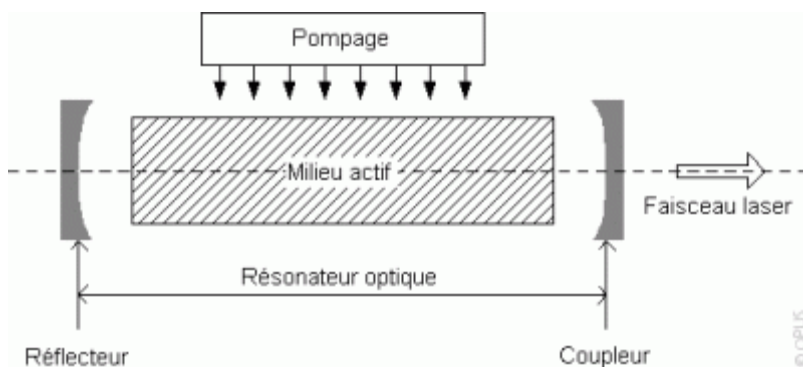
Le principe de fonctionnement du LASER

Un LASER est composé de 4 organes principaux

Un **milieu actif ou amplificateur**: il est composé des atomes que l'on va venir exciter. Ce milieu peut être solide, liquide ou gazeux.

- Une **source de pompage** : elle permet d'exciter les atomes du milieu actif en injectant de l'énergie. Cette source peut être d'origine électrique ou lumineuse.

- Un résonateur optique: un **miroir** qui réfléchit tous les photons incidents et un **miroir semi-réfléchissant** qui laisse passer entre 1% et 10% des photons incidents et réfléchit le reste du rayonnement.



Le LASER a besoin de ces trois parties pour fonctionner si jamais l'un des trois ne fonctionne plus, le LASER ne produit plus de lumière. Ces éléments fonctionnent en symbiose.

Nous allons étudier les compositions de 2 types de LASER, utilisés pour la chirurgie réfractive :

Le laser solide ou cristallin : Contrairement aux autres lasers, le laser solide utilise un milieu solide comme du verre ou des cristaux alors c'est le milieu d'émission des photons mais ils ne sont qu'un support avant d'être dopé par un ion pour constituer le milieu du laser. Alors l'ion utilisé déterminera la longueur d'onde ou λ du laser. Il peut très bien émettre dans le visible que dans le proche infrarouge et l'ultraviolet de manière continue ou impulsionnelle. En effet, cela se joue sur la puissance du laser qui s'exprime en kW s'il est continu et en GW s'il est impulsionnel.

Pour un LASER Excimer (traitement pour corriger la myopie et l'astigmatisme). Le mot excimer est une contraction du terme « dimère excité ». Le milieu d'excitation des lasers excimer est gazeux et composé de gaz rares (Helium, Argon, Krypton etc.) ou d'halides (Fluorine, Brome, etc.). Les gaz rares occupent la dernière colonne à droite dans le tableau de classification périodique des éléments, et les halides l'avant-dernière. Ces éléments sont à l'état naturel peu enclins à s'assembler, sauf sous certaines conditions physiques qui doivent être réunies dans la cavité laser (haute pression, décharges électriques) : ils peuvent alors former un dimère excité. A proprement parler, un dimère est l'assemblage de deux atomes identiques, et on devrait plutôt employer le terme « exiplexe » pour caractériser l'assemblage de deux monomères différents.

Rayonnement excimer

Le rayonnement excimère utilisé en chirurgie réfractive (193 nm) est obtenu à partir d'un mélange Argon et de Fluorine (Ar-F).



Containers contenant les mélanges gazeux qui alimentent la cavité d'un laser excimer. L'hélium (He) et le Néon (Ne) sont des gaz tampons : l'Argon (Ar) et le Fluorine (F2) sont les parties susceptibles de former le dimère excité. Ce sont des gaz corrosifs, et il est important que le système de distribution des gaz soit étanche..

La chirurgie réfractive regroupe les opérations des yeux au laser destinées à réduire leur dépendance à une correction optique en lunettes ou lentilles de contact. Elle permet de corriger de manière définitive la vision des patients dont l'œil, dit amétrope, présente un défaut optique (amétropie) provoquant un flou visuel permanent. Les amétropies opérables comportent myopie, hypermétropie, astigmatisme, presbytie. Ces défauts optiques traduisent le fait que les rayons lumineux captés ne sont pas ou pas tous focalisés dans le plan de la rétine (voir : œil et optique, introduction). Après l'intervention, le patient devient emmétrope : il bénéficie d'une indépendance accrue voire totale à sa correction en lunettes ou lentilles.

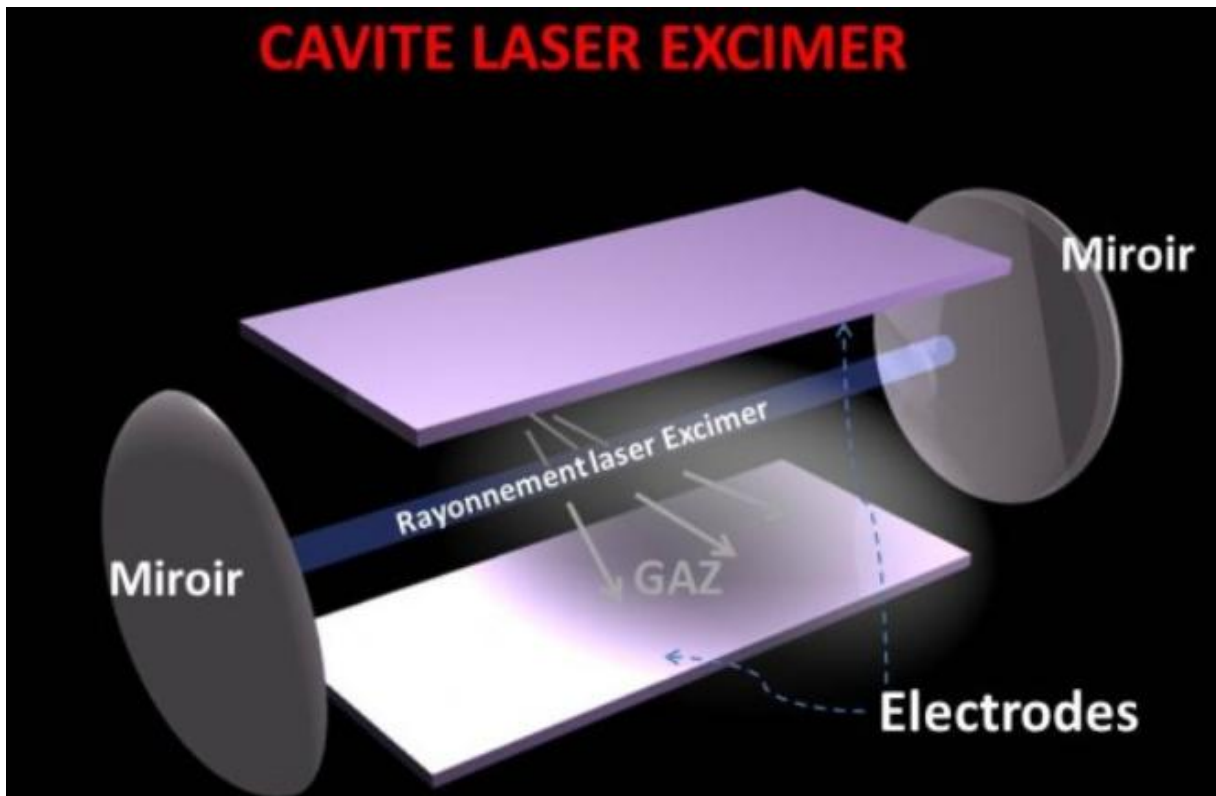
Les gaz rares comme l'Argon sont des éléments inertes, dont les niveaux électroniques sont complètement saturés; de fait, ils ne forment pas à l'état naturel de molécules stables avec d'autres éléments et tendent à se repousser. L'excitation par une décharge électrique intense fournit à l'un des éléments (exemple : atome d'Argon) un électron, et cette charge lui permet alors d'attirer et de constituer de manière éphémère avec un second élément un « dimère » excité (ex $2 \text{ Ar} + \text{F}_2 \rightarrow 2 \text{ ArF}^*$). Pour obtenir cette réaction, il faut que la probabilité de rencontre entre ces éléments soit suffisamment élevée, ce qui suppose une haute densité et donc une pression élevée dans la cavité du laser. Lors de la séparation du dimère, l'énergie de la rupture de la liaison est produite sous la forme d'un photon dont la longueur d'onde est située dans l'ultra-violet (193 nm).

La genèse du rayonnement laser est particulière puisque chaque molécule de dimère créée est excitée et correspond à une inversion de population, sans état fondamental. Il est relativement facile de créer les dimères excités. En revanche, cette inversion doit être beaucoup plus marquée que pour un laser à gaz « classique » pour compenser les pertes en rayonnement au sein de la cavité. En effet, les dimères excités ont une durée de vie éphémère de l'ordre de quelques nanosecondes, et peuvent émettre de l'énergie sous forme de chaleur, ou de lumière ; celle-ci est émise lors de la dissociation « naturelle » et correspond à une émission spontanée, non contributive au rayonnement laser, qui nécessite que la dissociation soient provoquée par un photon incident. L'émission de chaleur au niveau de la cavité de certains lasers est importante, et certains font appel à un troisième élément gazeux (Helium) afin de dissiper une partie de cette chaleur.

Ainsi, pour accroître la densité en dimères excités, il est nécessaire de fournir un apport énergétique très important au milieu gazeux, ce qui n'est faisable que sur des durées très brèves en raison des intensités et tensions requises.

Des pages sont consacrées aux principes fondamentaux de l'émission laser et à l'amplification de la lumière laser. Le gain des cavités des lasers à excimères est plus faible que pour d'autres types de lasers dont le milieu est constitué d'ions ; il faut donc produire d'intenses décharges électriques pour obtenir le rayonnement laser, qui est émis naturellement sous la forme de pulse d'une durée de quelques nanosecondes. Les décharges électriques sont émises par des électrodes situées de part et d'autre de la cavité où sont introduits les gaz Ar et F₂.

La cavité d'un laser excimer est munie de miroirs qui permettent l'amplification du faisceau laser: le gaz circule rapidement entre les électrodes et l'émission stimulée produit le rayonnement laser ultraviolet.



Dans une cavité laser excimer, le gaz contenant le mélange exciplexe (Argon Fluorine) est injecté entre les électrodes qui le soumettent à d'intenses décharges électriques (excitation). Le rayonnement produit est amplifié par quelques aller- retours au sein de la cavité avant d'être dirigé à l'extérieur de la cavité. Certains dispositifs comme les pré-ionisateurs, les systèmes d'isolation et de refroidissement / circulation de la cavité ne sont pas montrés.

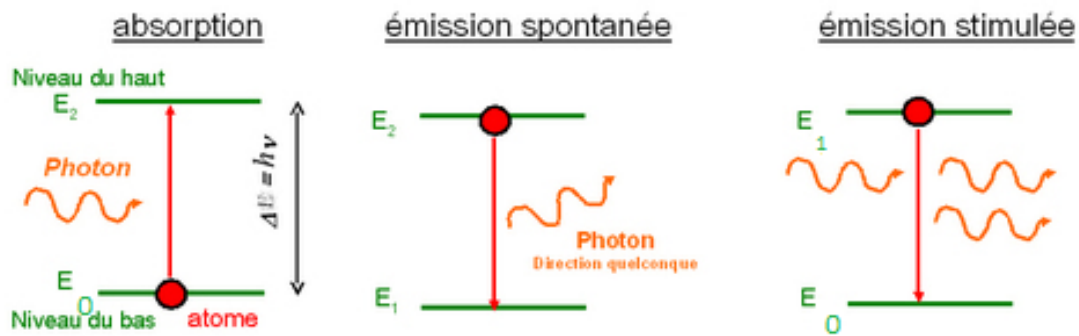
Il existe 3 phénomènes d'émission de la lumière :

L'absorption: Lorsqu'il est éclairé par un rayonnement électromagnétique (la lumière), un atome peut passer d'un état fondamental E_0 à un niveau excité E_2 en prélevant l'énergie correspondante sur le rayonnement.

L'émission spontanée: Il peut ensuite passer d'un état E_2 (très excité) à un autre E_1 (qui l'est moins). Ce phénomène se produit de façon spontanée et s'accompagne de l'émission d'un photon (incident).

- L'émission stimulée: Enfin, l'atome va se désexciter sous l'effet d'une onde électromagnétique qui lui fournira l'énergie dont il a besoin. L'électron revient à un niveau d'énergie inférieur en émettant un photon dans la même direction que le photon incident

Lorsqu'il est éclairé par un rayonnement électromagnétique (la lumière), un atome peut passer d'un état fondamental E_0 à un niveau excité E_2 en prélevant l'énergie correspondante sur le rayonnement.



On peut calculer la différence d'énergie d'un état E_0 à un état E_1 et donc la différence d'énergie durant le phénomène de l'émission stimulée.

Formule : $\Delta E = h * \nu = \frac{hc}{\lambda}$

où ΔE est exprimé en joule et représente la différence entre un état E_0 et un état E_1

h est la constante de Planck et vaut : 6.626×10^{-34} J/s.

ν est la fréquence, en effet c'est le nombre d'oscillation par seconde en Hz.

c est la célérité de la lumière, $c=3 \times 10^8$ m/s.

Pour un LASER Excimer :

$$h = 626 \times 10^{-34} \text{ J.s} ; c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\nu = 1,55 \times 10^{15} \text{ Hz} ; \lambda = 193 \text{ nm soit } 193 \times 10^{-9} \text{ mètres.}$$

$$\Delta E = hc/\lambda = (6,626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8) / 193 \times 10^{-9} = 1,03 \times 10^{-18} \text{ J.}$$

$$\text{Vérifions avec } \Delta E = h\nu = 6,626 \times 10^{-34} \times 1.55 \times 10^{15} = 1,03 \times 10^{-18}$$

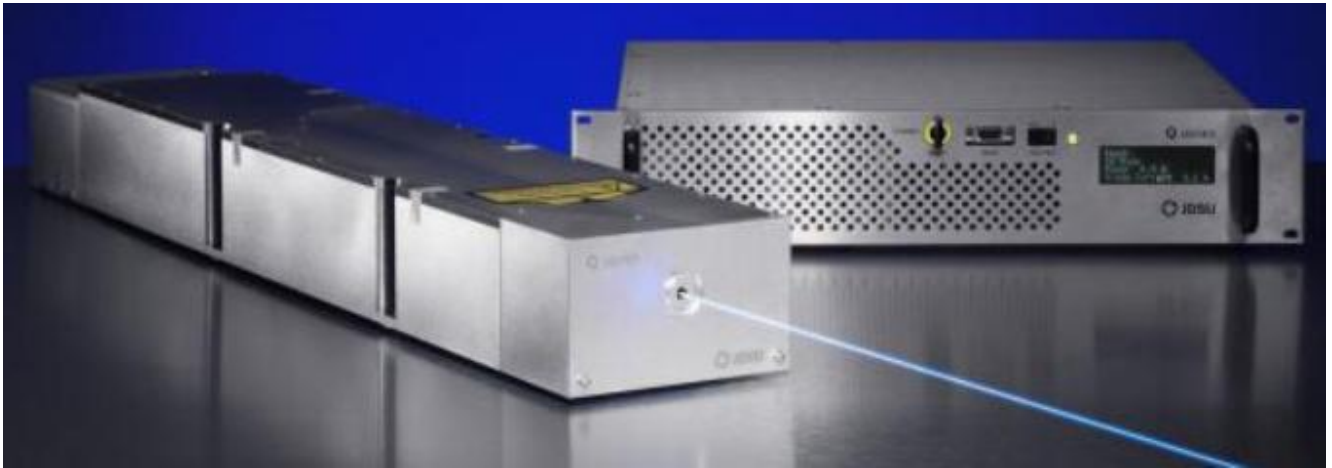
Pour le LASER Femtoseconde :

$$h = 626 \times 10^{-34} \text{ J.s} ; c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\nu = 2,849 \times 10^{14} \text{ Hz} ; \lambda = 1053 \text{ nm.}$$

$$\Delta E = hc/\lambda = (6,626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8) / 1053 \times 10^{-9} = 1,888 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

$$\text{Vérifions avec } \Delta E = h\nu = 6,626 \times 10^{-34} \times 2,849 \times 10^{14} = 1,888 \times 10^{-19} \text{ J}$$



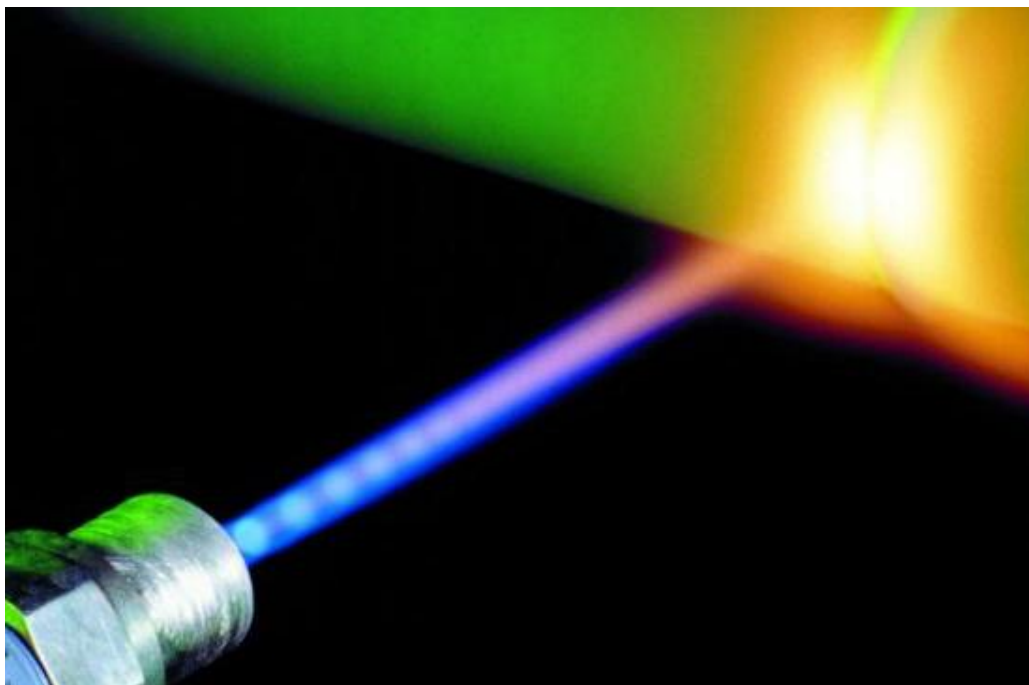
Composition du LASER

Les différents types de LASER

Les LASER sont classés par catégorie car ils peuvent avoir différentes de compositions :

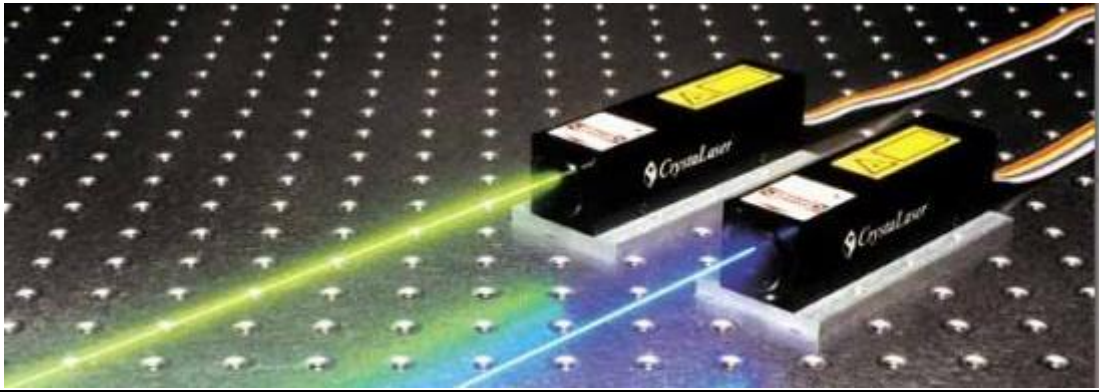
-LASER à gaz: Ils utilisent tous un gaz et fonctionnent avec un procédé électrique, ils sont utilisés dans le domaine médical et dans l'industrie pour le traitement des matériaux. Les lasers à gaz sont souvent des lasers encombrants et nécessitant d'un refroidissement par eau importante.

Exemple de LASER gazeux (LASER Xénon) :



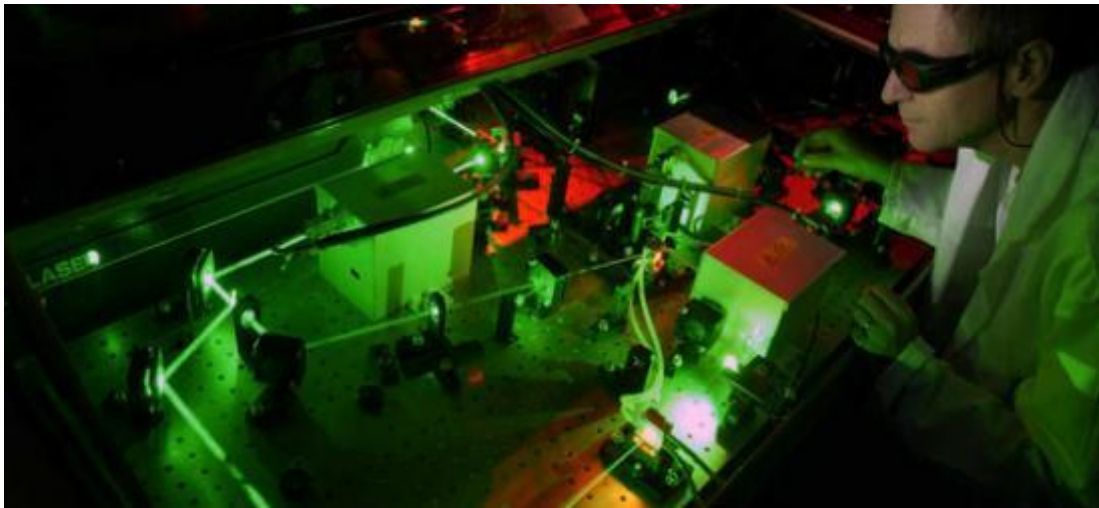
➤ LASER à solide: Les lasers à solide émettent en général dans le rouge et l'infrarouge proche , leurs sources d'excitation sont soit des diodes laser ou des lampes flash , ils sont utilisés dans beaucoup de domaine : usinage , médical , recherche scientifique,....

Exemple de LASER à solide avec comme milieu amplificateur du cristal :



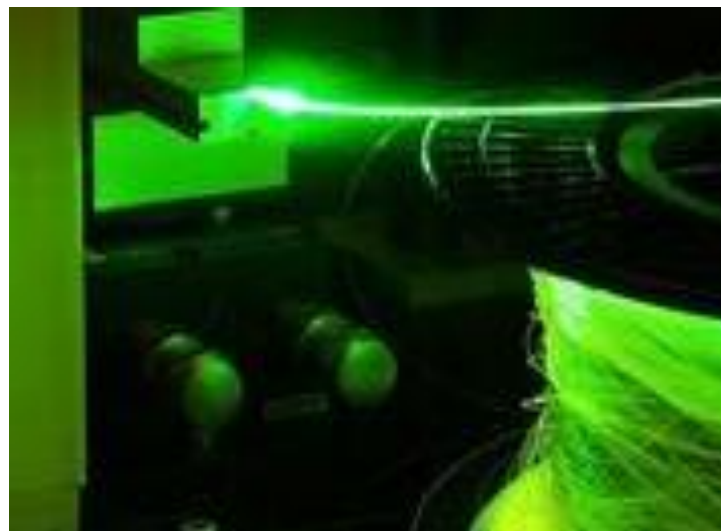
➤ LASER chimiques: Ils fonctionnent avec une réaction chimique et sont utilisés dans l'armement car ils sont très puissants et possèdent une longueur d'onde énorme de l'ordre d'environ 3000 nm ($3,0 \times 10^{-6}$ mètre).

Exemple de LASER Chimique :



➤ LASER à fibre: Les Laser à fibre émettent de 1050 nm à 2200 nm ($1,05 \times 10^{-6}$ à $2,2 \times 10^{-6}$ mètres), leurs sources d'excitation peuvent être un autre laser ou une diode. Leurs utilisations sont dans l'usinage ou le soudage.

Exemple de LASER à fibre en action :



CHIRURGIE RÉFRACTIVE

La chirurgie réfractive regroupe les opérations des yeux au laser destinées à réduire leur dépendance à une correction optique en lunettes ou lentilles de contact. Elle permet de corriger de manière définitive la vision des patients dont l'œil, dit amétrope, présente un défaut optique (amétropie) provoquant un flou visuel permanent. Les amétropies opérables comportent : myopie, hypermétropie, astigmatisme, presbytie. Ces défauts optiques traduisent le fait que les rayons lumineux captés ne sont pas ou pas tous focalisés dans le plan de la rétine (voir : œil et optique, introduction). Après l'intervention, le patient devient emmétrope : il bénéficie d'une indépendance accrue voire totale à sa correction en lunettes ou lentilles.

Le LASIK et les techniques de laser de surface (PKR) sont les actes les plus pratiqués pour corriger la vision, et elles représentent même parmi les opérations des yeux parmi les plus pratiquées dans le monde, toutes spécialités confondues. La chirurgie des yeux à visée réfractive est effectuée sous anesthésie locale, en ambulatoire (pas d'hospitalisation) et de le plus souvent de manière bilatérale (en chirurgie réfractive au laser excimer, les deux yeux sont opérés le même jour dans la grande majorité des cas). Quand l'indication est bien posée, c'est une chirurgie très sûre. On estime à 16 millions le nombre d'intervention LASIK réalisées aux USA ces dernières années. La Food and Drug Administration (FDA) a récemment conclu à l'efficacité et l'innocuité du LASIK pour la correction de la myopie, l'hypermétropie, l'astigmatisme.

Les opérations des yeux à visée réfractive exigent un bilan préopératoire soigneux, une technique de correction chirurgicale précise et moderne. Une information claire, loyale et objective doit être délivrée au patient par le chirurgien, conformément au règles d'éthique. Tous les yeux ne sont pas opérables, et les résultats de la chirurgie dépendent non seulement de la qualité technique de l'acte effectué, mais aussi du choix pertinent de l'indication chirurgicale.

De nombreuses pages de ce site sont consacrées à la description des techniques de chirurgie réfractive et leurs indications, qui doivent tenir compte des caractéristiques de la vision humaine. Les aspects les plus fondamentaux, comme l'étude des lasers excimères ou femtoseconde, ainsi que les profils d'ablation des lasers à excimères sont abordés dans la rubrique « Recherche et Education ». Vous y trouverez des explications détaillées des principes et technologies qui régissent la chirurgie réfractive.

Pour un LASER Excimer (traitement pour corriger la myopie et l'astigmatisme).

Le mot excimer est une contraction du terme « dimère excité ». Le milieu d'excitation des lasers excimer est gazeux et composé de gaz rares (Helium, Argon, Krypton etc.) ou d'halides (Fluorine, Brome, etc.). Les gaz rares occupent la dernière colonne à droite dans le tableau de classification périodique des éléments, et les halides l'avant-dernière. Ces éléments sont à l'état naturel peu enclins à s'assembler, sauf sous certaines conditions physiques qui doivent être réunies dans la cavité laser (haute pression, décharges électriques) : ils peuvent alors former un **dimère excité**. A proprement parler, un dimère est l'assemblage de deux

atomes identiques, et on devrait plutôt employer le terme « exiplexe » pour caractériser l'assemblage de deux monomères différents.



La chirurgie cornéenne au laser (LASIK, PKR) est la plus pratiquée en chirurgie réfractive.

Diode laser

Une diode laser est un composant optoélectronique à base de matériaux semi-conducteurs.



Diode LASER

Elle émet de la lumière monochromatique cohérente (une puissance optique) destinée, entre autres, à transporter un signal contenant des informations (dans le cas d'un dispositif de télécommunications) ou à apporter de l'énergie lumineuse pour le pompage de certains lasers (lasers à fibre, laser DPSS) et amplificateurs optiques (OFA, *Optical Fiber Augmenter*). La diode laser est un composant essentiel des lecteurs et graveurs de disques optiques, dans ce cas elle émet le faisceau lumineux dont la réflexion sur le disque est détectée par une photodiode ou un phototransistor.

Elle trouve aussi son application dans les systèmes électroniques de mesure de distance, de vitesse, de guidage et de pointage précis.

Caractéristiques :

Ses caractéristiques sont proches de celles des lasers conventionnels. La plus faible longueur de la cavité, quelques centaines de micromètres au lieu de quelques dizaine de centimètres, entraîne une plus grande divergence du faisceau et des raies d'émission plus éloignées les unes des autres, ce qui favorise la création de lasers monomodes (une seule raie d'émission) par filtrage. Les états énergétiques se répartissent dans la structure de bandes du semi-conducteur à la place d'états énergétiques bien définis dans un gaz, par exemple, impliquant l'émission de raies moins fines.

Les avantages sont sa compacité, sa facilité de modulation à des fréquences élevées, ses faibles tensions de service et puissance consommée grâce à des rendements de l'ordre de 30% au lieu de 3% pour les autres types de laser.

Selon la puissance et la longueur d'onde d'émission de la diode laser, celle-ci peut représenter un réel danger pour la vue et provoquer des brûlures irréparables de la rétine.

Principe de fonctionnement

Comme tout laser, une diode laser fonctionne avec un milieu amplificateur (augmentation dans les semi-conducteurs par émission stimulée), d'une structure résonante (cavité de Fabry-Pérot ou autre types) et d'un processus de pompage (courant électrique).

Les matériaux composés : Exemple du GaAs

L'émission lumineuse est basée sur le phénomène de l'électroluminescence qui comprend l'émission d'un photon par recombinaison d'une paire électron-trou et le peuplement de la bande de conduction par injection d'un courant. La longueur d'onde d'émission est donnée par l'application du principe de conservation de l'énergie : celle du photon sera approximativement égale à la largeur de la bande interdite du matériau.

Un autre principe inévitable de la physique est la conservation du moment lors d'une recombinaison ou d'une absorption ; cela entraîne l'obligation d'utiliser des matériaux dits «à gap direct» : le minimum de la bande de conduction est à la verticale du maximum de la bande de valence dans l'espace des moments. L'arséniure de gallium (GaAs) possède cette propriété et fut le premier utilisé avec succès. On l'appelle un composé binaire III-V car Ga appartient à la colonne III du tableau périodique des éléments et As à la colonne V. Avec une largeur de bande interdite de 1.424 eV, il génère une longueur d'onde de 870 nm.

Structure de base :

Une diode laser est une jonction de semi-conducteurs, comme une diode électroluminescente classique. Elle possède trois zones caractéristiques : une couche de confinement de type n, une zone active et une couche de confinement de type p. Les couches de confinement permettent d'optimiser l'utilisation du courant dans la diode et d'augmenter le rendement. La zone active est constituée d'un guide d'onde encadrant le lieu de l'émission laser : matériau massif ou quantique (puits, boîtes ou fil). Quand cette diode est polarisée en direct, elle laisse passer un fort courant qui peuple la bande de conduction et peut réaliser l'inversion de population. En réalité, une couche intermédiaire d'indice optique supérieur joue le rôle de guide optique, comme dans une fibre. Les extrémités sont clivées et donnent des faces idéalement planes jouant le rôle de miroirs semi-réfléchissants, créant la cavité résonante. Le dioptré entre le semi-conducteur d'indice 3.5 à peu près et l'air d'indice 1 possède ainsi un coefficient de réflexion de 30%. Ce coefficient peut être diminué sur les deux côtés par l'application d'un revêtement

anti-réfléchissant afin d'obtenir une puissance de sortie plus importante. Suivant le domaine d'application, on ajoute soit une lentille de focalisation par exemple pour les pointeurs ou les lecteurs, soit un asservissement en température ou en courant et une fibre amorce pour les applications télécoms et de spectroscopie. La puce optoélectronique est, dans ce dernier cas, montée sur un radiateur puis sur un module Peltier "butterfly". Le contact supérieur est connecté à la source de courant par un procédé de bonding.

Création du rayonnement cohérent

La condition d'émission laser s'obtient simplement en écrivant les conditions de résonance :

- Le gain sur un aller-retour doit être supérieur aux pertes.
- Le déphasage sur un aller-retour doit être un multiple de 2π .

On obtient ainsi le gain seuil et l'espacement en longueur d'onde entre les différentes raies.

Cet espacement est l'**Intervalle Spectral Libre ISL** (ou **FSR** en anglais, pour **Free Spectral Range**).

Sur un aller-retour, le déphasage s'écrit : $2nk_0L$ avec $k_0 = 2\pi\nu/c$

Où :

- n est l'indice du matériau,
- k_0 est la norme du vecteur d'onde,
- ν est la fréquence du champ optique,
- c est la vitesse de la lumière dans le vide,
- L est la longueur de la diode laser.

La valeur de l'ISL se calcule par conséquent de la manière suivante :

$$ISL_\nu = \nu_{m+1} - \nu_m \quad \text{avec} \quad \nu_m = \frac{mc}{2nL}$$

Soit : $ISL_\nu = \frac{c}{2nL}$ ou encore, par rapport à la longueur d'onde :

$$ISL_\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \times ISL_\nu = \frac{\lambda^2}{2nL}$$

On voit surtout que plus la diode laser est courte, plus les longueurs d'onde d'émission sont espacées.

Comportement statique :

Modes lumineux d'une diode.

Comportement dynamique

Effets de chirp "qui sera détaillé dans le chapitre suivant", bande passante, dans des applications à haute fréquence de modulation, la principale étant les

télécommunications, la diode laser est utilisée comme convertisseur de l'information électrique vers optique. Cette modulation haute fréquence induit des effets non linéaires et des limitations qui vont être décrites ci-après :

La bande passante est la fréquence maximale d'utilisation d'une diode, c'est-à-dire la limitation dynamique intrinsèque au composant. Ce facteur est directement relié au temps de déplétion de la jonction ainsi qu'à l'arrêt de l'inversion de population. Dans les dispositifs de transmission actuels dits transceiver (ensemble Diode Laser + Peltier + couplage optique + boîtier) la Bande passante exploitée est de 10 GHz. Le futur sera constitué de dispositifs à 40 GHz.

Applications

Les Diodes laser sont numériquement les plus courantes type de laser, avec des ventes en 2004 d'environ 733 millions de diodes lasers, bien plus que des 131000 d'autres types de lasers.

Ces diodes laser sont beaucoup utilisés dans les télécommunications car ils sont aisément modulés et deviennent des sources lumineuses couplées pour des fibres optiques de communication. Elles sont utilisées dans divers instruments de mesure, par exemple, les télémètres. Un autre usage est en lecteur de code-barres. Lasers visibles, le plus souvent de couleur rouge, mais également verte, sont habituelles, comme les pointeurs laser. Les diodes laser de basses mais aussi de hautes puissances sont beaucoup utilisées dans l'industrie de l'imprimerie comme sources de lumière pour la numérisation d'images (entrée) mais aussi pour la fabrication de plaque d'impression de très haute vitesse et haute résolution (sortie). Des diodes laser infrarouge et rouge sont courantes dans les lecteurs de CD, CD-ROM et la technologie DVD. Les diodes lasers de couleur violette sont utilisées en HD DVD et la technologie Blu-ray. Des diodes laser de haute puissance sont utilisées dans des applications industrielles telles que le traitement thermique, le plaquage, le soudage et pour le pompage d'autres d'autres lasers.

En général, les applications des diodes laser peuvent être classées de différentes façons. La majorité des applications de la diode laser peut être servie par des grands lasers à l'état solide ou par des oscillateurs optiques paramétriques, mais c'est la capacité à produire en masse de diodes lasers à faible coût qui les rend principales pour applications grand public. Des diodes lasers ont des applications à presque l'ensemble des domaines d'activité qui attire une attention actuellement. Vu que la lumière a des propriétés différentes (la puissance, la longueur d'onde et la qualité spectrale, la qualité de faisceau, la polarisation, etc), il est intéressant de classer les applications par ces propriétés principales.

De nombreuses applications de diodes laser se servent essentiellement de la propriété de "l'énergie dirigée" d'un faisceau optique. Dans cette catégorie, on peut inclure l'imprimante laser, les lecteurs de codes à barres, la numérisation d'image, les enlumineurs, l'enregistrement optique des données, la combustion d'allumage, la chirurgie au laser, de l'industrie de tri, de l'industrie d'usinage, et les armes à

énergie dirigée. Certaines de ces applications font leur apparition tandis qu'énormément sont familiers à la société généralement.

Les applications qui utilisent la propriété de "cohérence" de la lumière générée par des diodes laser sont la mesure de distance par interférométrie, l'holographie, la communication cohérente et le contrôle cohérent de réactions chimiques.

Les applications se servant de la capacité à "générer des ultra-courtes impulsions de lumière" par la technique connue sous le nom de "mode de verrouillage" comprennent la distribution d'horloge pour des circuits intégrés de haute performance, la production de signaux arbitraires pour des ondes aux fréquences de radio, l'échantillonnage photonique pour la conversion analogique-numérique, et les dispositifs de multiple accès à la division de code optique pour les communications sécurisées.

Les différents types de diode Laser

- Guide d'onde enterré
- Guidage par le gain
- VCSEL : Lasers à cavité verticale émettant par la surface
- Diode laser à silicium

Comprendre les relations de conjugaison de Descartes et de grandissement :

L'image d'un objet peut être floue, éloignée, grande, inversée, selon la position de l'observateur par rapport à la lentille.

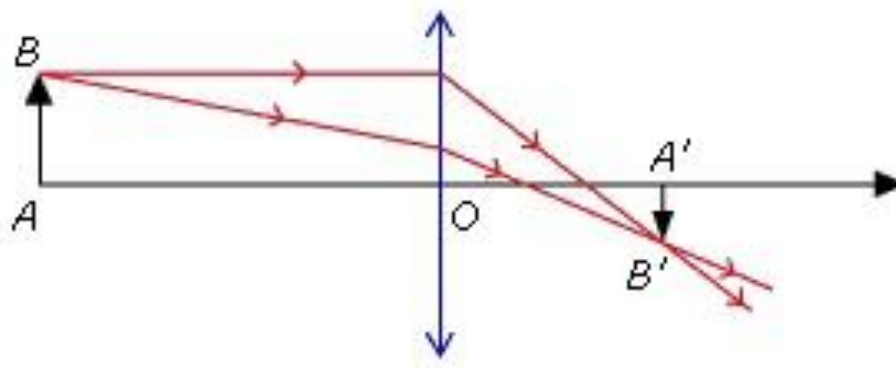
Ces différentes positions obéissent à différentes règles :

- la relation de conjugaison, établie par Descartes, qui permet de déterminer la position de l'image.
- la relation du grandissement.

Quels renseignements nous donnent ces relations ?

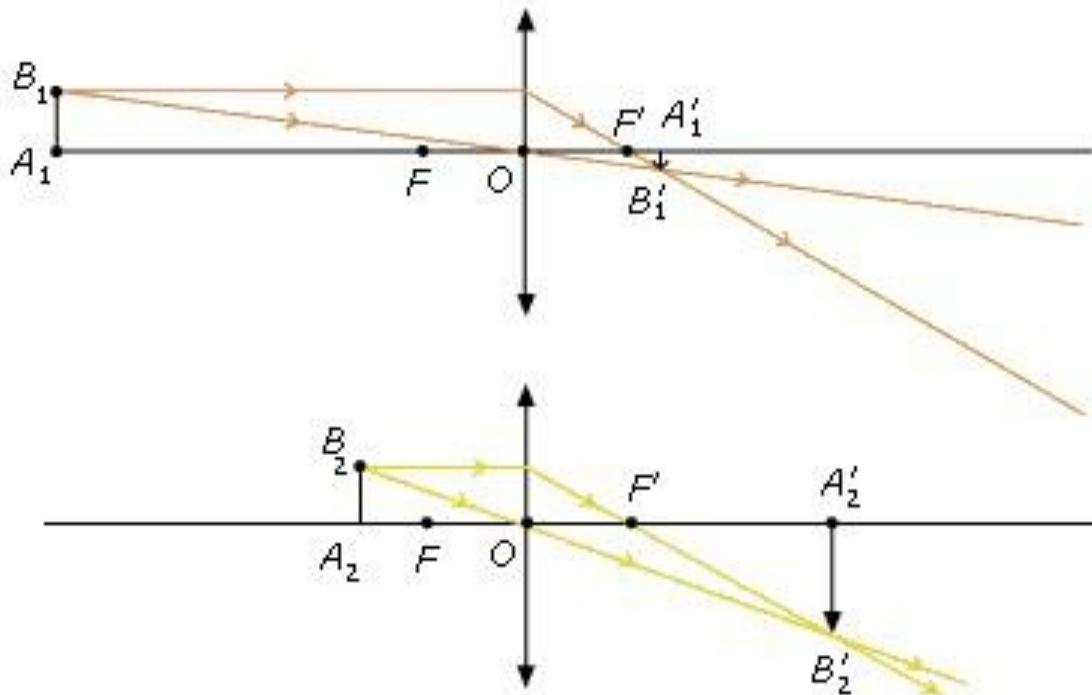
Image d'un objet situé avant le plan focal objet

Lorsqu'un **objet** est fortement éloigné d'une **lentille convergente**, il existe une **position unique** pour laquelle son **image** apparaîtra **nette**, mais **inversée**, sur un écran :



L'objet AB et son image A'B' sont dits **conjugués**.

Par ailleurs, plus l'objet sera **proche de F** , plus son image sera **éloignée de F'** en tendant vers l'infini :



Lorsque l'objet est **placé en F** , son **image** sera projetée à l'**infini**.

Relation de conjugaison de Descartes :

L'**axe optique** principal est **orienté** dans le sens de **propagation de la lumière** (en général de la gauche vers la droite).

La position de l'objet sur l'axe optique principal est notée A et celle de l'image, A' . Ces deux places sont déterminées respectivement par les valeurs algébriques $\overline{OA}$ et $\overline{OA'}$.

L'objet se trouvant avant le centre optique O , $\overline{OA}$ est négatif. Au contraire, l'image se situant après O , $\overline{OA'}$ est positif.

La formule de **conjugaison de Descartes** permet de **déterminer** la **distance** $\overline{OA'}$ qui sépare l'image de l'objet du centre optique O : $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OF'}}$, avec les distances en mètres.

$\overline{OF'}$, notée aussi f' , est une caractéristique de la lentille, appelée **distance focale** de la lentille. Remarque : pour une lentille convergente, $f' = \overline{OF'} > 0$.

Application :

Un objet AB est situé à 5,0 m devant une lentille convergente de distance

focale f' de 80 cm. Quelle sera la position de l'image A' de A ?

Attention aux unités : la conjugaison de Descartes doit être exprimée en mètres.

On a $\overline{OA} = -5,0$ m (cette valeur est négative car A est en arrière de la lentille) et $\overline{OF'} = 0,80$ m.

En appliquant la relation, on obtient :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = -\frac{1}{5} + \frac{1}{0,8} = 1,05 \text{ m}^{-1}$$

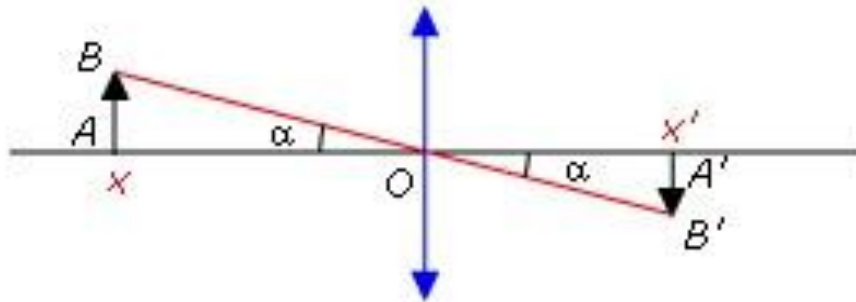
d'où $\overline{OA'} = 0,95 \text{ m} = 95 \text{ cm}$.

Relation de grandissement

Le **grandissement** γ est le rapport des tailles de l'objet AB et de son image $A'B'$:

$$\gamma = \frac{A'A'}{AB}, \text{ avec } AB \text{ et } A'B' \text{ en mètres et } \gamma \text{ sans unité.}$$

On peut lier le grandissement γ aux positions $\overline{OA}$ et $\overline{OA'}$ de l'objet et de son image :



$$\gamma = \frac{A'A'}{AB} = \left| \frac{X'}{X} \right|$$

Si on applique la relation de Thalès : $\frac{A'A'}{AB} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \gamma$

- Si $\frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$ est positif, alors l'image est droite (c'est-à-dire dans le même sens que l'objet).
- Si $\frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$ est négatif, alors l'image est inversée par rapport à l'objet.

L'essentiel

On peut obtenir une image réelle inversée après la lentille si l'objet est placé avant le foyer objet de la lentille convergente.

$\overline{OA}$ est l'apposition algébrique du point A par rapport au centre optique O . Si A est placé avant O , alors $\overline{OA} < 0$.

La **relation de conjonction de Descartes** s'écrit : $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OF'}}$

(Distance en **mètre**).

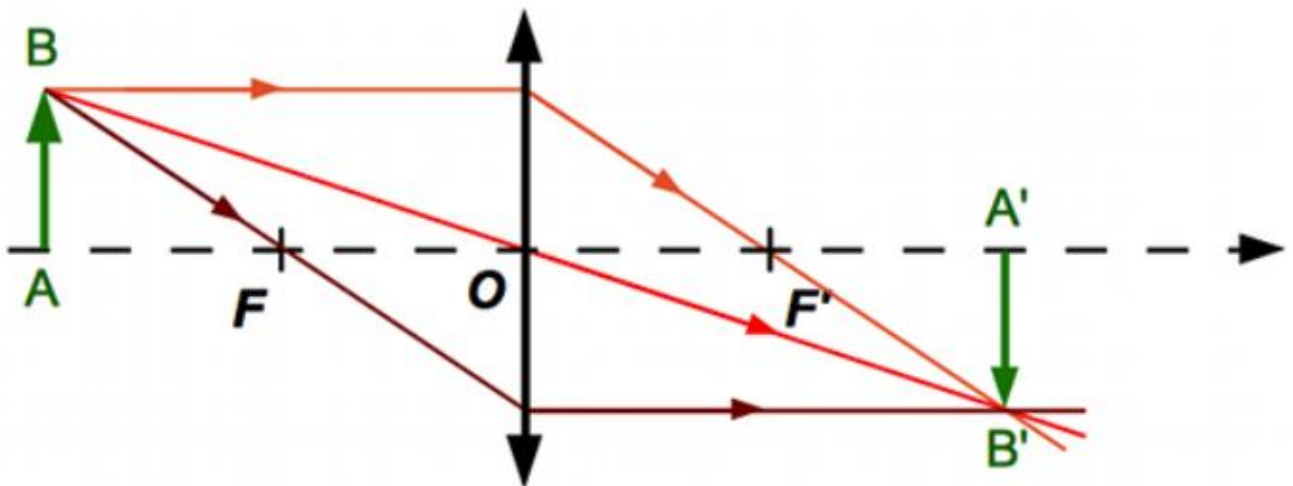
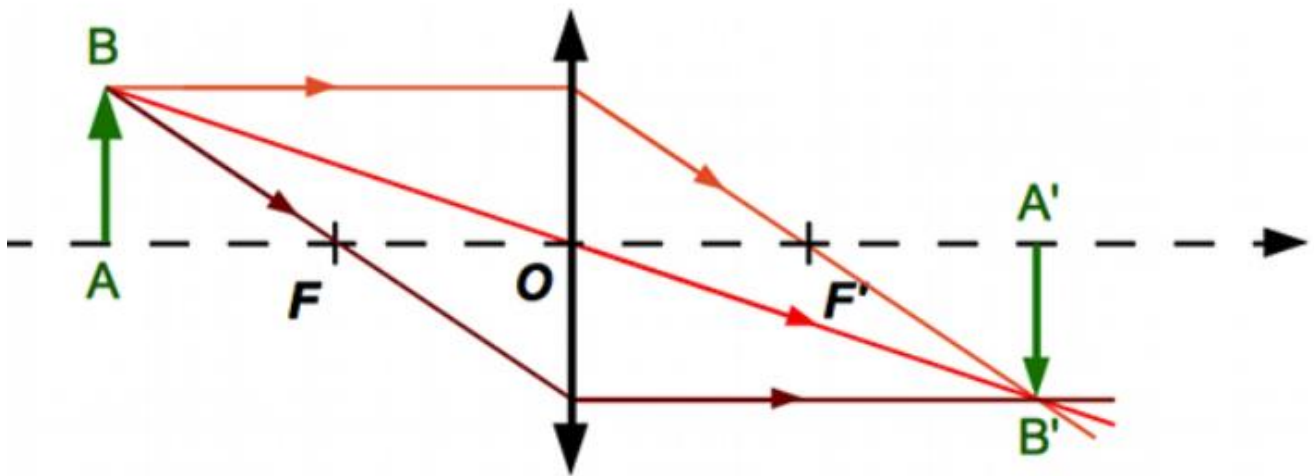
La **relation de grandissement** s'écrit : $\frac{A'B'}{AB} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \gamma$

($A'B'$ et AB en mètre, γ sans unité).

On a deux lois :

- Des rayons parallèles se croisent dans le plan focal
- &
- Un rayon passant par le centre de la lentille n'est pas dévié.

$$\frac{1}{x_i} - \frac{1}{x_o} = \frac{1}{f}$$

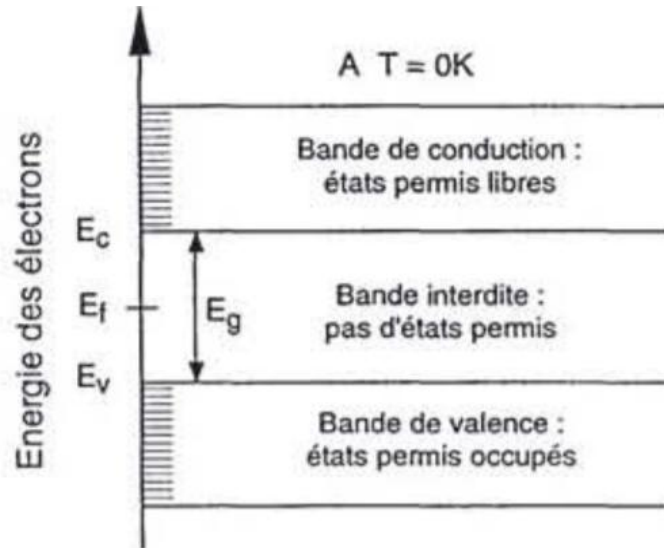


ÉMISSION DE RAYONNEMENT PAR LES SEMI-CONDUCTEURS 2.1 Densité

Densité d'états électroniques dans les semi-conducteurs: bandes d'énergie, niveaux d'impureté, trous.

Dans un solide cristallin parfait, assemblage régulier d'atomes aux nœuds d'un réseau tridimensionnel périodique, les états d'énergie des électrons sont repartis en

bandes permises et bandes interdites. Pour les isolants et les semi-conducteurs, à la température de 0 K, tous les états de la dernière bande contenant des électrons, appelée bande de valence (BV), sont occupés, tandis que les états de la bande immédiatement supérieure, appelée bande de conduction (BC), sont vides (voir Figure ci-après) :



Bandes d'énergies des semi-conducteurs à 0 K.

L'écart énergétique entre bande de valence et bande de conduction est appelé largeur de bande interdite (energy band gap ou simplement gap en anglais) et noté E_g . Il est mesuré le plus souvent en électronvolt

(1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule). C'est un paramètre fondamental déterminant les propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs. En particulier, il permet de distinguer quantitativement les isolants des semi-conducteurs, ces derniers ayant un gap inférieur à quelques eV. On peut rappeler à ce point que la relation entre l'énergie $h\nu$ des photons exprimée en eV et leur longueur d'onde λ exprimée en micron est donnée par :

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

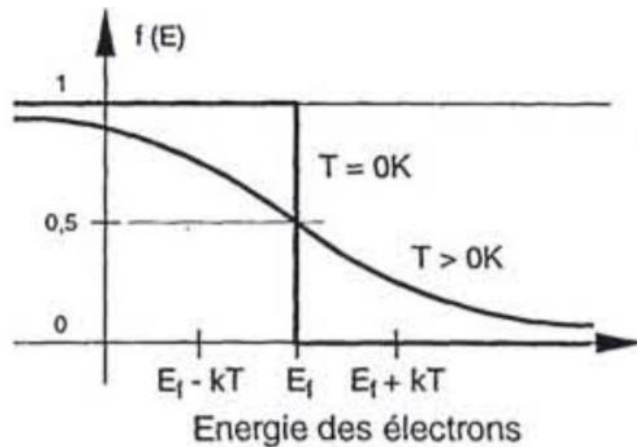
Les écarts à la perfection du réseau cristallin ont pour effet d'introduire des niveaux électroniques permis dans la bande interdite. En particulier certains atomes d'impuretés, différents de ceux constituant la matrice cristalline, peuvent être substitués volontairement à ceux-ci par dopage :

- Les donneurs, possédant un électron de plus sur leur couche périphérique, créent des niveaux voisins de la BC et peuvent lui céder cet électron permettant de modifier la conductivité du matériau sur plusieurs ordres de grandeur. On obtient ainsi un semi-conducteur de Type N.
 - Les accepteurs, possédant un électron de moins, créent des niveaux voisins de la BV et peuvent en recevoir un électron, libérant un état électronique. Ces états libres se comportent comme des charges positives, appelées trous, qui peuvent transporter du courant électrique. On obtient alors un semi-conducteur de type P.
- Occupation des états électroniques : statistique de FERMI.

Les électrons sont régis par la statistique de FERMI et la probabilité d'occupation des états d'énergie E est donnée à l'équilibre thermodynamique à une température T par la formule :

$$f(E) = 1/(1 + \exp((E - E_f)/kT))$$

où E_f est appelé niveau de FERMI et k est la constante de BOLTZMAN ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K). A la température ambiante de 300 K l'énergie kT vaut 26 meV, significativement plus petite que le gap des semi-conducteurs usuels (~ 1 eV). Les allures de la fonction de FERMI à 0K et à température non nulle sont représentées sur la figure ci-après:



Fonction de Fermi à $T = 0$ K et à $T > 0$ K

A $T = 0$ K, tous les états d'énergie inférieure à E_f (bande de valence) sont occupés, tous les états d'énergie supérieure à E_f (bande de conduction) sont libres. Il en résulte que le semi-conducteur est en fait isolant.

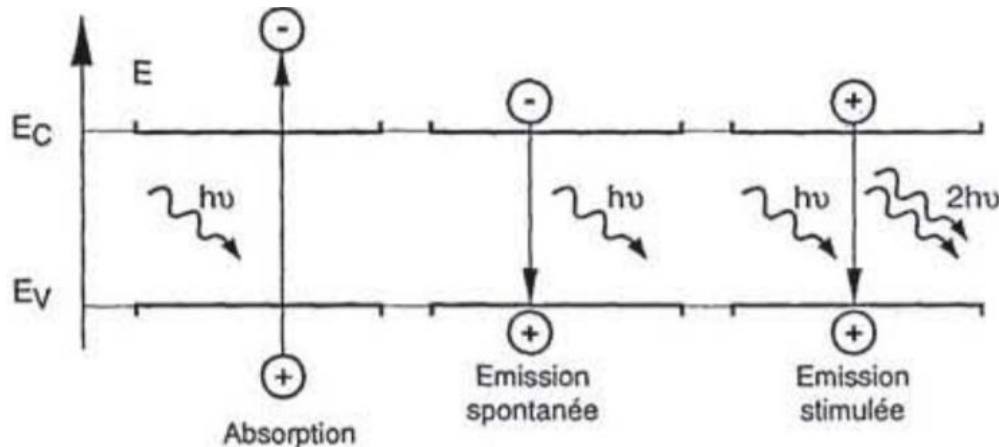
AT > 0 K quelques électrons ont libéré des états de la BV et occupent des états de la BC. Un semi-conducteur non-dopé ou intrinsèque peut ainsi conduire le courant, sa conductivité électrique due à la fois aux électrons et aux trous varie exponentiellement avec $-E_g/2kT$. Un matériau senti-conducteur peut être amené hors équilibre thermodynamique par différents moyens, et le plus souvent les populations d'électrons et de trous peuvent être considérées chacune comme en équilibre dans sa bande respective. En effet le temps de mise en équilibre des électrons entre eux et des trous entre eux (temps de relaxation intrabande) est de l'ordre de 10^{-12} s, alors que le temps de mise en équilibre des électrons avec les trous (temps de relaxation interbande ou durée de vie) est généralement supérieur à 10^{-9} s. Les fonctions de FERMI décrivant les occupations de la BC et de la BV comprennent alors des pseudo-niveaux de FERMI F_n et F_p distincts pour les électrons et pour les trous au lieu du niveau unique E_f .

Transitions entre états électroniques.

Les interactions entre rayonnement (photons) et matière (électrons) mis en jeu dans les diodes Laser sont représentées schématiquement sur la figure ci-après. On y distingue :

- l'absorption, où un photon incident cède son énergie à un électron de la BV et le fait "monter" dans la BC, créant une paire électron-trou, c'est un processus de génération radiative ;

- l'émission spontanée où un électron "redescend" spontanément sur un état libre de la BV, annihilant une paire électron-trou, c'est un processus de recombinaison radiative ;
- l'émission stimulée où un photon incident induit la recombinaison radiative d'une paire électron-trou. Le photon émis a la même phase et la même direction que le photon incident. C'est le mécanisme découvert par EINSTEIN en 1917 par lequel le rayonnement peut être amplifié et qui est exploité dans tous les types de LASER.



Absorption et émission de lumière dans un semi-conducteur

Deux conséquences résultent de ces processus :

- Seuls sont absorbés les photons d'énergie supérieure au gap : $h\nu \geq E_g$.
- Les photons émis ont une énergie légèrement supérieure ($\sim kT$) à celle du gap. L'émission spontanée peut être caractérisée par une vitesse d'émission spontanée qui mesure le nombre de photons émis par unité de temps et par unité de volume du semi-conducteur.