

Chapitre 3.8 - Les DIFFÉRENTS TYPES de LASERS

3.8 - 1 Introduction

On désigne en général les lasers par le nom du matériau actif utilisé (argon, CO₂, azote, etc ...). Au cours de la brève histoire du laser, de nombreux matériaux ont été testés et les lasers qui sont arrivés à un stade commercial se chiffrent par dizaines¹. Souvent, pour une application donnée, plusieurs types de lasers peuvent être utilisés. Les lasers étant des transformateurs énergétiques à faible rendement, on trouve peu de sources pour les applications où une grande puissance est nécessaire, comme en traitement de matériaux; le choix se limite alors au laser à CO₂, au laser à néodyme-YAG, au laser à excimère ou aux plus récemment, aux barrettes de diodes à semi-conducteur. Nous présentons ci-après les particularités de quelques uns des lasers les plus fréquemment utilisés.

On peut classer les lasers par la nature du matériau actif utilisé: gaz, solide ou liquide. La technique du pompage et la configuration du laser sont en effet étroitement liées au type de matériau actif utilisé: le pompage par décharge électrique est presque toujours utilisé pour les gaz alors que les solides sont pompés par voie optique.

Un milieu actif gazeux présente les avantages suivants par rapport à un matériau solide :

- le milieu reste homogène, même aux fortes puissances de rayonnement; l'effet de lentille thermique créé par le gradient d'indice dans le gaz chaud est négligeable;
- les collisions des atomes ou molécules du gaz avec les parois du tube contribuent à l'évacuation de l'énergie thermique ; le refroidissement peut être effectué à l'extérieur de la cavité par circulation du gaz;
- le volume de matériau actif peut être considérable; il est en effet possible de considérer une cavité de plusieurs mètres ou dizaines de mètres de long repliée plusieurs fois à l'aide de miroirs plans. Pour cette raison, les lasers continus les plus puissants, disponibles commercialement sont des lasers à gaz.

Les lasers à gaz présentent aussi des inconvénients. Ce sont des systèmes encombrants et fragiles. De plus, des tensions de plusieurs milliers de volts sont nécessaires à la création de la décharge. Parmi les lasers à gaz, on peut distinguer:

- les lasers à gaz neutre (exemple: laser He-Ne);
- les lasers à gaz ionisé ou laser ionique (exemple: laser à argon);
- les lasers moléculaires (exemple: laser à CO₂).

Les lasers à matériau actif solide sont d'une part les lasers à isolants dopés, d'autre part les lasers à semi-conducteur ou diodes laser.

Les lasers à isolants dopés, malgré une puissance maximale (environ 2 kW au lieu de 20 kW) inférieure à celle des lasers à gaz, sont très utilisés, en particulier à cause de leur grande commodité d'emploi et de leurs longueurs d'onde proches du visible. Une nouvelle catégorie de lasers a vu le jour avec l'utilisation de fibres optiques à cœur dopé comme matériau actif ; on les appelle lasers à fibre et cela concerne une grande variété de longueurs d'ondes émises, de puissances obtenues. De façon générale les lasers à fibre offrent des faisceaux de grande qualité, ce qui a permis de généraliser leur usage dans le domaine de l'usinage des matériaux.

Les diodes laser se distinguent de tous les autres types de lasers, par les processus physiques mis en jeu, par le dispositif de pompage et aussi par les caractéristiques de faisceau. Malgré des puissances émises relativement modestes (de l'ordre du watt), les diodes laser ont trouvé de nombreuses applications, en particulier dans le domaine des communications.

Des liquides sont parfois utilisés comme matériau actif; il s'agit en général de matériaux organiques en solution. Les lasers à colorants sont intéressants car le rayonnement émis peut être accordé en longueur d'onde.

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_types_de_laser

Parmi les lasers souvent cités pour leurs propriétés remarquables, il y a les lasers « femtoseconde ». En utilisant ce terme on souligne la brièveté des impulsions produites, une centaine de femtosecondes, voire moins. En pratique il peut s'agir de lasers à colorant ou de lasers à fibres.

3.8 - 2 Lasers à isolants dopés

3.8.2.1 - Introduction

La figure ci-après montre le schéma de principe d'une cavité de laser à isolant dopé. A l'intérieur de la cavité peuvent se trouver des composants actifs ou passifs servant à modifier les propriétés spatiales ou temporelles du faisceau en oscillation.

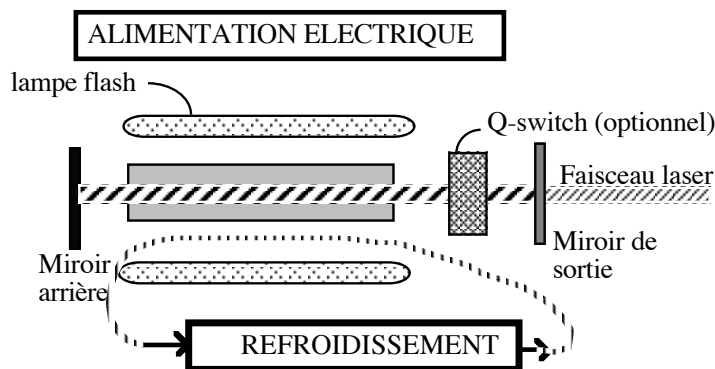


Fig. 3.8-1 : Laser à isolant dopé.

Le Q-switch ne sert que lorsque les impulsions doivent être beaucoup plus courtes que les impulsions de pompage.

3.8.2.1.1 Forme du barreau actif

Le matériau actif se présente soit sous la forme d'un barreau cylindrique entouré d'une ou plusieurs lampes à décharge immergées dans un liquide de refroidissement, soit sous la forme d'un barreau plan, à section rectangulaire ('slab' dans la littérature anglo-saxonne). Dans un barreau plan les rayons ne se propagent pas en ligne droite, mais suivent un cheminement en zig-zag par réflexion totale interne sur les faces (Fig. 2). Le barreau plan permet un pompage plus uniforme que le barreau cylindrique, les contraintes thermiques sont moins gênantes. En pratique, les performances sont quand même restées décevantes : la section rectangulaire du faisceau ne convient pas à toutes les applications, des effets de bords dus à la diffraction déforment le faisceau si la partie active du barreau n'est pas limitée, la cohérence spatiale reste mauvaise à cause des distorsions thermiques, la fabrication de barreaux de qualité optique satisfaisante est difficile et onéreuse. Une puissance continue supérieure à 2 kW peut cependant être obtenue [Hodgson.93]

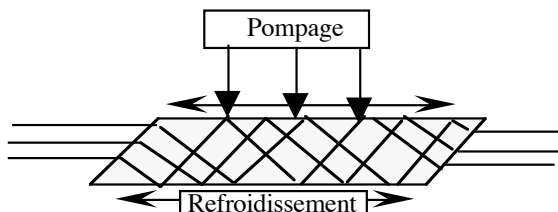


Fig. 3.8-2 : Propagation du rayonnement laser dans un barreau du type 'slab'.

Les rayons subissent une réflexion totale interne sur les faces du barreau. Le pompage et le refroidissement sont plus efficaces que dans le cas d'un barreau cylindrique.

Les barreaux des lasers solides présentent à forte puissance un gradient de température qui entraîne une détérioration du faisceau. Pour pallier cet inconvénient, deux nouvelles configurations ont été proposées : le matériau se présente soit sous forme d'un disque mince, soit sous forme d'une fibre optique.

3.8.2.1.2 La technique du pompage par lampes.

Le pompage des lasers à isolants dopés est assuré soit par des lampes à éclairs, soit par des diodes laser. Les lampes à éclairs permettent aussi bien le fonctionnement impulsionnel qu'une émission en continu. Pour une bonne efficacité du pompage, l'ensemble lampes+barreau actif est enfermé dans une enceinte remplissant deux fonctions :

- d'une part les faces polies de l'enceinte réfléchissent la lumière des lampes vers le barreau,
- d'autre part l'enceinte contient le liquide de refroidissement, indispensable à des puissances moyennes de quelques dizaines de watts ou plus. La stabilité des caractéristiques du faisceau en sortie (longueur d'onde, puissance, profil spatial, ..) dépend de façon critique de la stabilité en température. Une température de fonctionnement trop importante met en danger aussi bien les lampes de pompage que le barreau. Diverses configurations sont utilisées pour la géométrie de l'enceinte. La figure qui suit montre un exemple d'enceinte couramment utilisée, en forme de double ellipse à foyer commun. Le barreau est placé au foyer commun des deux ellipses; les lampes de pompage sont placées aux deux autres foyers.

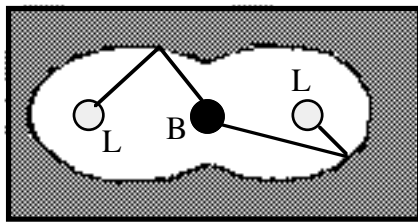
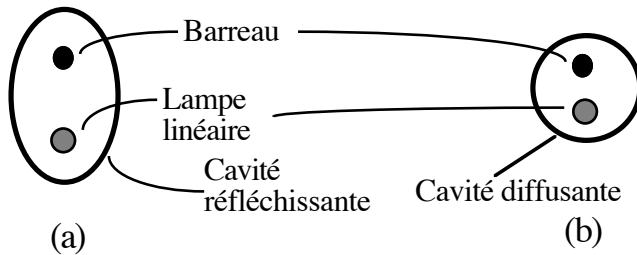


Fig. 3.8-3 : Laser solide pompé par lampe

a) Coupe transversale d'une enceinte bi-elliptique de laser à isolant dopé.

L = Lampe de pompage; B = Barreau actif.



b) Les 2 autres configurations de pompage par lampes souvent utilisées : la cavité elliptique à une lampe (a) et la cavité diffusante.

3.8.2.1.3 La technique du pompage par diodes

Le pompage par diode laser présente plusieurs avantages. D'une part, le spectre du rayonnement émis par les diodes correspond mieux que celui des lampes (krypton, xénon) aux bandes d'absorption des matériaux actifs courants. D'autre part, les diodes ont un meilleur rendement et sont moins fragiles que les lampes. Les lasers solides pompés par diodes voient leur puissance augmenter régulièrement ; le cap du kW a déjà été franchi.

3.8.2.1.4 Les matériaux actifs.

De nombreuses combinaisons d'ions de métaux de transition ou de terres rares et de matrices cristallines ont été testées avec succès dans une cavité laser mais seuls quelques matériaux comme le rubis, le YAG, un grenat dopé au néodyme ou le verre dopé au néodyme, l'alexandrite et, plus récemment, le saphir dopé au titane, ont atteint le stade commercial. Le tableau ci-après indique quelques matériaux actifs et leurs longueurs d'onde d'émission laser [Messenger.90].

Matériau	Rubis	Nd :YAG	Nd: YLF	Cr,Tm: YAG	Ho,Tm: YAG	Cr,Tm, Ho:YAG	Cr,Er: YSGG	Er:YLF	Er:YAG
Longueur d'onde	0,694	1,064	1,053	2,014	2,091	2,1	2,79	2,8	2,94

Tableau : Quelques matériaux actifs et leurs longueurs d'onde laser (en μm).

3.8.2.2 - Laser à rubis

Dans un laser à rubis, le matériau actif est formé par 0,01 à 0,05% d'ions Cr^{3+} dans une matrice cristalline d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). La longueur d'onde du rayonnement émis est $0,69 \mu\text{m}$. Trois niveaux d'énergie interviennent dans l'émission laser. Le niveau bas de la transition laser étant aussi le niveau fondamental, un pompage de grande intensité est nécessaire pour obtenir l'inversion de population. Le rendement est environ égal à 0,2%; le fonctionnement en continu n'est possible qu'à très basse température. En régime impulsif, les impulsions présentent un profil temporel très irrégulier : une impulsion de pompage d'environ une milliseconde donne naissance à une impulsion laser constituée d'une succession de brèves impulsions d'une durée voisine de la microseconde. L'énergie maximale des impulsions obtenues varie de 1 joule en monomode transverse à plusieurs dizaines de joules en "multimodes". En régime déclenché, on peut obtenir des impulsions de quelques dizaines de nanosecondes.

Le laser à rubis est utilisé pour le perçage de certains matériaux. On l'utilise également pour faire des hologrammes d'objet en mouvement, pour lesquels l'emploi d'un laser continu n'est pas envisageable.

3.8.2.3 - Laser à Néodyme-YAG

Dans un laser à Néodyme-YAG, le matériau actif est constitué par des ions Nd^{3+} distribués de façon homogène dans un grenat d'yttrium-aluminium ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$); le néodyme forme environ 0,7% en poids du matériau. Le YAG est un cristal isotrope de grande dureté qui se prête bien au polissage et possède une bonne conductivité thermique. On sait également fabriquer des barreaux cylindriques de YAG d'une dizaine de centimètres de longueur ayant une bonne qualité optique.

Le laser à Nd-YAG, comme tous les autres lasers solides, fait appel à un pompage optique. Les sources de pompage utilisées sont des lampes à éclair ou des tubes à décharge continue. Le pompage est réalisé à l'aide de lampes au xénon pour les faibles puissances et de lampes au krypton pour les puissances supérieures à une dizaine de watts.

Environ 2% de l'énergie électrique alimentant les lampes de pompage sont effectivement transformés en rayonnement laser. La principale raie d'émission du Néodyme-YAG est centrée sur la longueur d'onde de $1,06 \mu\text{m}$; d'autres raies peuvent être obtenues : $0,94 \mu\text{m}$, $1,05 \mu\text{m}$, $1,3 \mu\text{m}$, $1,7 \mu\text{m}$, $2,1 \mu\text{m}$. Le profil temporel dépend du mode de fonctionnement choisi. Le fonctionnement en continu est possible, même à des puissances moyennes élevées.

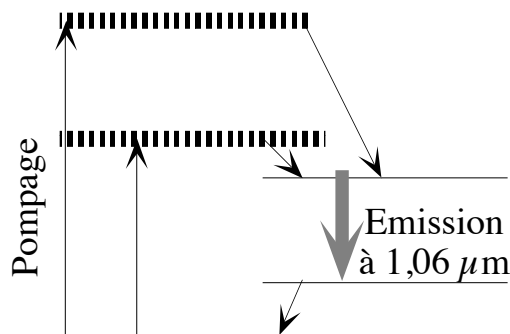


Fig. 3.8-4 : Niveaux d'énergie du Néodyme dans un cristal de YAG.

En mode impulsif lent, le laser à Néodyme-YAG génère des impulsions dont la durée peut en général être ajustée entre 0,1 ms et 10 ms. L'énergie des impulsions peut atteindre la centaine de joules. En fonction de l'application, on peut réaliser des impulsions isolées ou un train d'impulsions de fréquence pouvant atteindre 200 Hz environ. Il faut alors trouver un compromis entre l'énergie par impulsion et le taux de récurrence. Le tableau 5-2 résume les différents régimes d'utilisation des lasers à Nd:YAG.

La puissance moyenne maximale que peut fournir un laser à Nd^{3+} :YAG commercial, peut atteindre 6000 W. La figure 5 montre les principaux éléments d'un ensemble laser destiné à des applications industrielles. Pour obtenir de fortes puissances le volume du matériau actif doit être augmenté. Des barreaux de grande dimension seraient fragiles et sont difficiles à fabriquer ; aussi les fabricants utilisent-ils plusieurs enceintes de pompage à l'intérieur de la cavité. La figure 6 montre une configuration de laser solide de forte puissance.

Le laser à Nd:YAG est utilisé en "mode déclenché" pour certaines applications comme le marquage. Le matériau actif est alors pompé de façon continue ; un modulateur acousto-optique, placé entre le barreau actif et le miroir arrière, ferme périodiquement la cavité. On obtient ainsi un train d'impulsions dont la durée

à mi-hauteur est égale à environ 50 ns; le taux de répétition est variable. Dans ce mode de fonctionnement, on limite la puissance moyenne à une valeur comprise entre 1 et 30 watts, ce qui est suffisant pour obtenir des puissances crêtes élevées du fait de la brièveté des impulsions.

Les paramètres d'un laser à Nd:YAG sont interdépendants. La figure 7 montre un exemple de relations entre quelques paramètres, dans le cas d'un laser déclenché, excité en continu.

Mode de fonctionnement	Relaxé	Continu	Déclenché Pompage impulsionnel	Déclenché Pompage continu
Énergie d'impulsion	10 mJ à 100 J		0,1 à 1 J	environ 10^{-3} J
Puissance crête	quelques KW		5 à 50 KW	
Puissance moyenne	3 kW	20 W en TEM ₀₀ à 6 kW en multi-mode	30 W	5 à 50 W
Fréquence de répétition	1 à 500 Hz		20 à 50 Hz	0,5 à 2 kHz
Durée des impulsions	0,5 à 10 ms		10 à 40 ns	40 à 50 ns
Divergence du faisceau	2 à 10 mrd	1 mrd en TEM ₀₀ à 30 mrd en multi-mode	2 à 10 mrd	2 à 10 mrd
Qualité de faisceau	5 à 20	5 à 100	1-3	1-3

Tableau: Quelques caractéristiques de lasers à Nd:YAG.

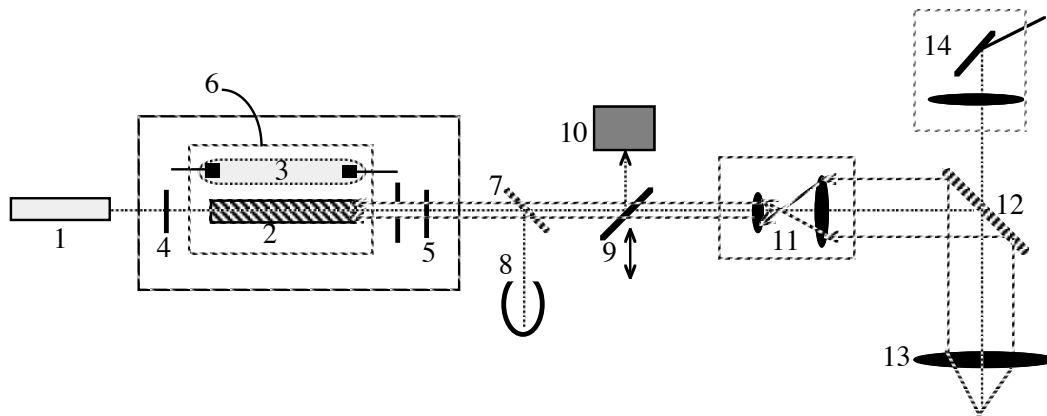


Fig. 3.8-5 : Les principaux composants d'un ensemble laser Nd:YAG de puissance.

1: laser à HeNe d'alignement ; 2: Barreau de Nd:YAG ; 3: lampe de pompe ; 4: Miroir arrière totalement réfléchissant à $1,06 \mu\text{m}$; 5: Miroir de sortie (Transmission de 10 à 30 %) ; 6: Enceinte de pompe refroidie ; 7: Miroir faiblement réfléchissant ; 8: Joulemètre ; 9: Miroir escamotable ; 10: Puits thermique ; 11: Agrandisseur de faisceau ; 12: Miroir totalement réfléchissant à $1,06 \mu\text{m}$ et partiellement transparent dans le visible ; 13: Lentille de focalisation ; 14: Système de visualisation de la zone de travail.

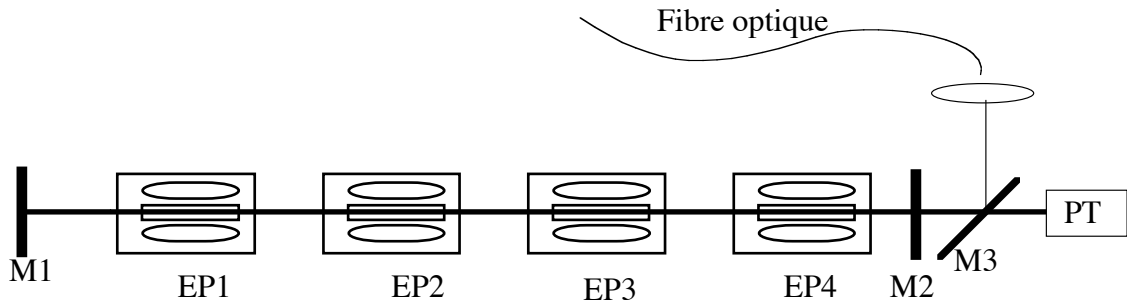


Fig. 3.8-6 : Exemple de cavité de laser Nd:YAG de puissance contenant plusieurs enceintes de pompage (EP) contenant chacune un bareau et deux lampes.

M1 et M2 : miroirs de cavité, M3 : Miroir de renvoi vers une fibre optique ou vers un puits thermique (PT) .

Puissance moyenne maximale	450 W
Energie maximale d'impulsion	50 J
Puissance crête	20 kW
Fréquence des impulsions	300 Hz
Durée d'impulsions	0,1 à 20 ms
Diamètre du faisceau	9 mm
Refroidissement à 2 circuits par eau. Consommation	1-18 l/mn
Alimentation électrique - puissance nécessaire	20 KVA

Exemple de caractéristiques d'un Laser à Nd:YAG de 450 W - (modèle KLS 522 de LASAG AG)

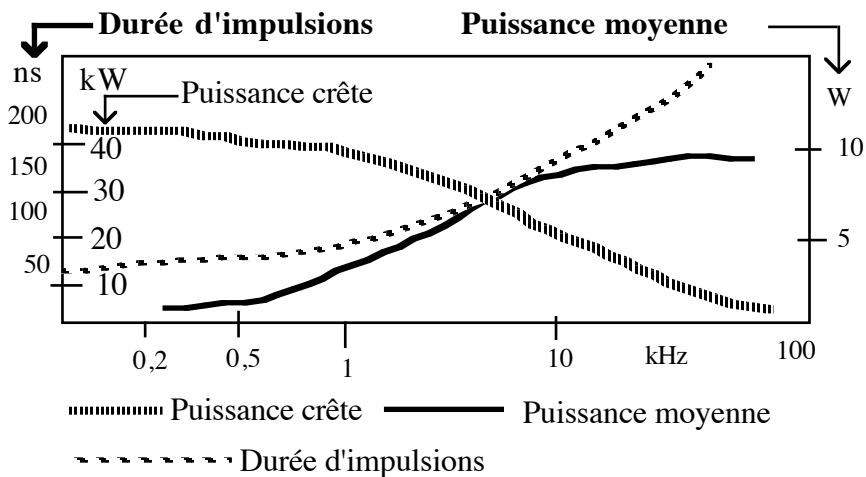


Fig. 3.8-7 : Laser à Nd:YAG déclenché et excité en continu. Puissance crête des impulsions, puissance moyenne et durée des impulsions en fonction de la fréquence de répétition des impulsions [²].

3.8.2.4 - Laser à néodyme-verre

² "Optique et Télécommunications"; A. COZANNET, J. FLEURET, H. MAITRE, M. ROUSSEAU; Ed. Eyrolles , 1981.

Les ions Nd^{3+} peuvent être placés dans un autre matériau que le YAG pour former un matériau actif. Le verre est parfois utilisé parce qu'il absorbe mieux que le YAG, l'énergie du pompage et supporte mieux les grandes densités de rayonnement. Il est également possible d'obtenir des barreaux de Nd:verre de grandes dimensions, ce qui est intéressant pour la réalisation d'amplificateurs d'impulsions de grande énergie : 1000 J en quelques millisecondes et en faisceau multimode. La longueur d'onde du rayonnement émis est $1,06 \mu m$, comme pour le YAG. En régime déclenché, il est possible d'obtenir une centaine de joules en 20 ns, soit une puissance crête de $5.10^9 W$.

3.8.2.5 - Laser à alexandrite

L'alexandrite est un cristal de $BeAl_2O_4$ dopé à 0,01 % par des ions Cr^{3+} . Le laser à alexandrite, semblable au laser à rubis, est aussi qualifié de laser vibronique; ce qualificatif vient du fait que le niveau inférieur de la transition active est élargi par des niveaux de vibrations (Fig. 5-8). La largeur du niveau permet un ajustement de la fréquence de transition entre $0,7$ et $0,81 \mu m$. Les énergies d'impulsions varient entre 0,1 J et quelques Joules avec une fréquence de répétition pouvant aller à une centaine de Hertz. Pour l'usinage des matériaux, l'alexandrite présente par rapport au Nd:YAG, l'avantage d'une longueur d'onde plus courte et donc mieux absorbée par les matériaux. Le perçage de matériaux comme le cuivre et l'aluminium se fait mieux avec un laser à alexandrite qu'avec un laser à Nd-YAG [Puglio.83]. Cependant les lasers à alexandrite ne sont pas aussi courants que les lasers à Nd:YAG, en particulier parce que les barreaux d'alexandrite sont plus fragiles et plus onéreux que les barreaux de YAG. Le rendement reste limité à environ 0,5% et la puissance maximale à une centaine de watts.

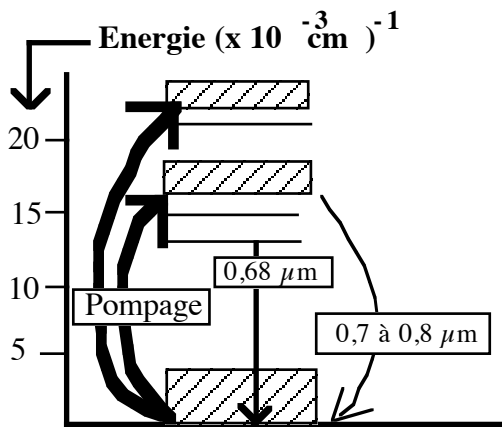


Fig. 3.8-8 : Diagramme d'énergie des ions Cr^{3+} de l'alexandrite.

Les rectangles hachurés représentent les bandes d'énergie des électrons du cristal. L'émission laser est possible à $0,68 \mu m$ et sur une bande s'étalant entre $0,7$ et $0,8 \mu m$.

3.8.2.6 - Laser à Titane saphir

Le saphir dopé au titane est un matériau actif présentant des propriétés semblables à celle de l'alexandrite. En introduisant de l'oxyde de titane (Ti_2O_3) dans de l'alumine (Al_2O_3) en fusion, certains ions Al^{3+} sont remplacés par des ions Ti^{3+} . Le niveau électronique inférieur de l'ion Ti^{3+} dans le matériau ainsi formé est élargi par les vibrations, ce qui a pour effet de créer une bande d'absorption et une bande d'émission relativement larges.

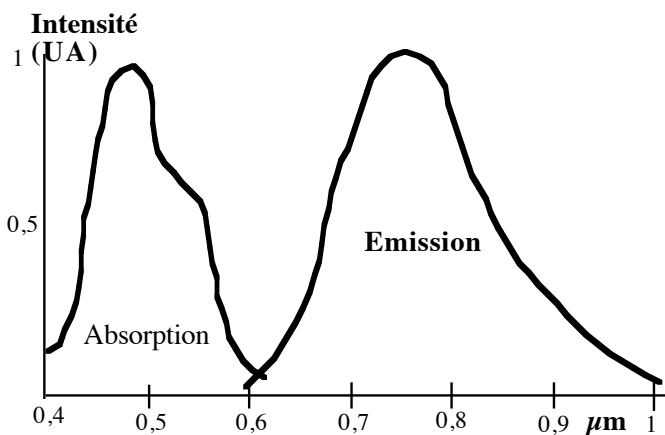


Fig. 3.8-9 : Spectre d'absorption et d'émission du Ti:saphir

[Koechner.88]

Le laser à Ti:saphir émet un rayonnement accordable entre 0,7 μm et 0,9 μm ; la puissance nominale peut atteindre 10 Watts en continu. La bande d'absorption centrée dans le vert permet d'utiliser un laser à argon comme source de pompage. La large bande d'émission en fait également un laser performant pour la génération d'impulsions ultra-courtes par synchronisation des modes axiaux et susceptible de remplacer les lasers à colorant organiques pour le proche infra-rouge.

3.8.2.7 Laser à disque.

Les lasers à Nd :YAG à barreau cylindrique présentent une mauvaise qualité de faisceau à forte puissance due au gradient thermique. Une nouvelle configuration de cavité a été développée par l' *Institut für Strahlwerkzeuge* de Stuttgart, dans laquelle le barreau actif est remplacé par un disque de quelques dizaines de microns d'épaisseur placé sur un substrat qui sert de diffuseur thermique. Le matériau utilisé est le YAG , le dopage peut être fait avec le néodyme ou l'ytterbium. Le pompage est effectué à l'aide de lasers à diodes émettant à 0,8 μm . Un dispositif optique particulier permet jusqu'à 16 passages du faisceau de pompage dans le milieu amplificateur. Le rendement obtenu est donc élevé, jusqu'à 40% en émission continue à 100 W. L'évacuation de la chaleur se fait par la face, il n'y a donc pas formation de lentille thermique.

Le laser à émet à une longueur d'onde voisine de 1 μm . La puissance émise peut dépasser le kilowatt. La qualité de faisceau est voisine de 1 alors que les lasers solides de plus de 100 W à barreaux ont un coefficient M^2 compris entre 10 et 100 suivant la puissance.

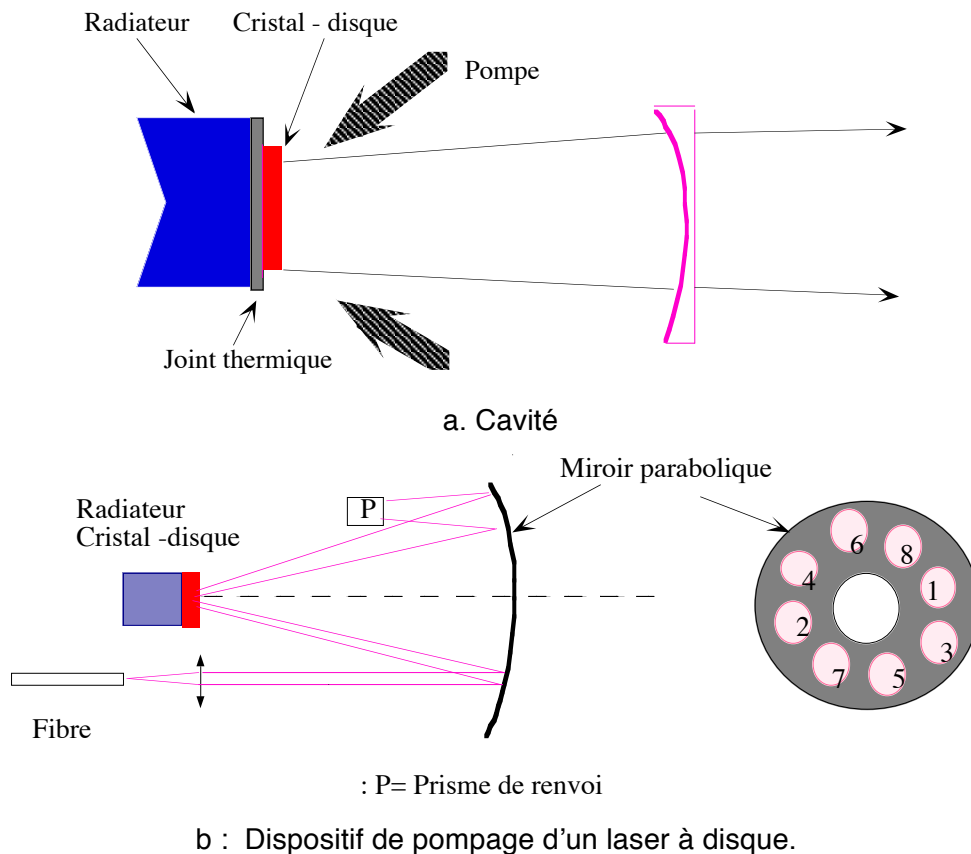


Fig. 3.8-10 : Laser à disque.

Le matériau actif se présente sous la forme d'un disque de faible épaisseur, permettant ainsi l'évacuation rapide de la chaleur.

Exemple de caractéristiques de laser à disque (*TrueDisk* de la société *Trumpf*)

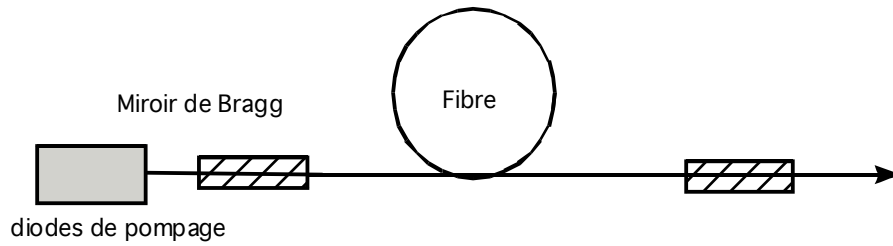
		TD 2002	TD 4002	FD 6002	TD 8002
Puissance	W	2000	4000	6000	8000
Qualité de faisceau	mm.mrad	8	8	8	8

Dia. de la fibre de distribution	μm	200	200	200	200
Puissance électrique consommée	kW	12	19	25	32
Temp. eau de refroidissement	°C	5-19	5-19	5-19	5-19
Consommation d'eau	m ³ /h	1,3	2,3	2;8	3,3

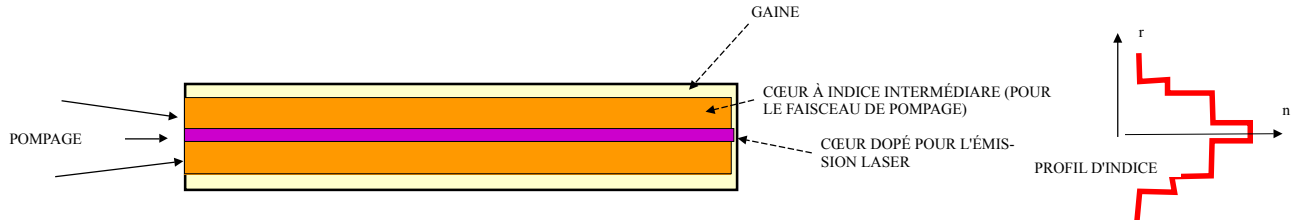
3.8.2.8 Laser à fibre.

Un autre moyen d'éviter le phénomène de lentille thermique consiste à utiliser le cœur d'une fibre optique comme milieu actif. Le principe a été proposé dès 1964 [Koestl.64]. Des systèmes de faible puissance ont été réalisés vers 1980 ; la forte puissance a pris de l'ampleur au début des années 2000 grâce aux progrès technologiques dans le domaine des diodes laser. En utilisant de l'Ytterbium comme matériau actif, le spectre d'émission se situe dans une bande comprise entre 1030 et 1100 nm avec un maximum à une longueur d'onde de 1070 nm. En dopage à l'Erbium, les longueurs d'onde se situent entre 1530 nm et 1610 nm. D'autres matériaux peuvent être utilisés pour le dopage : le neodymium, le dysprosium, le thulium.

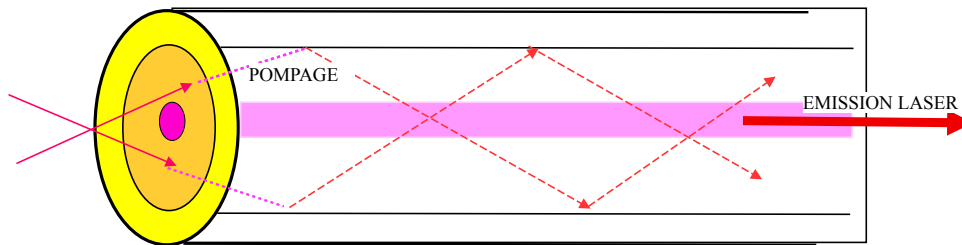
Le pompage est étalé sur une longueur importante et la chaleur peut être évacuée sur les côtés. Ces lasers offrent d'excellentes qualités de faisceau : le coefficient de qualité M^2 reste inférieur à 1,1 pour des puissances allant jusqu'à 100 W. Le pompage est réalisé à l'aide de lasers à diodes. En combinant un grand nombre de diodes pour le pompage la puissance obtenue dépasse les 10 kW. Le principe d'un laser à fibre est montré sur le schéma ci-après.



a) Schéma de principe d'un laser à fibre.



b) Géométrie de la fibre à double cœur et profil d'indice correspondant. La gaine intérieure sert à guider le faisceau de pompage. Le cœur sert de matériau actif et confine le faisceau émis.



c) Le faisceau de pompage est guidé par le cœur intermédiaire, et passe ainsi à travers le cœur central, dopé, où a lieu le phénomène d'amplification.

Fig. 3.8-11 : Laser à fibre

3.8 - 3 Lasers à semi conducteurs (ou lasers à diodes)

3.8.3.1 - Effet laser dans les semi-conducteurs

Un laser à semi-conducteur présente une structure identique à celle d'une diode utilisée en électronique pour ne permettre le passage du courant que dans un seul sens. Le matériau actif est formé par une jonction entre un semi-conducteur du type p et un semi-conducteur de type n (composés III-V, comme AsGa ou AlAsGa). La cavité est formée par clivage du cristal ; le pouvoir de réflexion de l'interface de GaAs-air étant d'environ 32 %, la réflexion de Fresnel suffit pour entretenir l'oscillation. L'excitation est obtenue par injection de porteurs dans la jonction polarisée en direct. Des paires électron-trou sont créées. La recombinaison d'un électron et d'un trou s'accompagne soit d'un phonon (vibration dans le cristal), soit de l'émission d'un photon [Cozannet.81]. L'énergie du photon émis est égale à la différence d'énergie entre le haut de la bande de conduction et le bas de la bande de valence.

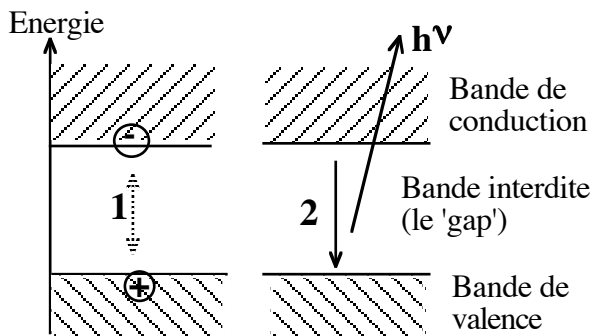


Fig. 3.8-12 : Émission de lumière dans une jonction entre deux matériaux semi-conducteur.

- 1 : Création d'une paire électron-trou
- 2 : Recombinaison de la paire avec émission d'un photon.

Dans une jonction simple, ou homojonction, le courant de jonction doit être intense pour que l'effet laser soit observé. Avec une jonction simple à base de GaAs c'est une densité de courant de $4 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ qui est nécessaire pour que l'effet laser soit observé. Le fonctionnement en continu n'est pas possible dans de telles conditions. Des astuces technologiques ont permis la réalisation de lasers à semi-conducteur fonctionnant en continu à la température ordinaire. Elles consistent à utiliser un dopage différent pour la jonction et pour les zones voisines ; la jonction est en GaAs tandis que les zones voisines sont en $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Dans ces conditions on observe un fort confinement électronique des porteurs dans la couche active. Ceci est obtenu parce que la bande interdite est plus grande pour $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ que pour GaAs. De même la différence d'indice (indice plus grand pour GaAs que pour $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) permet d'obtenir un effet de guidage. Les porteurs de charge et l'onde émise sont confinés dans la partie active, c'est-à-dire sur une épaisseur d'environ 1/10 à 3/10 de micron.

Un exemple de structure à hétérojonction est montré sur la figure ci-après.

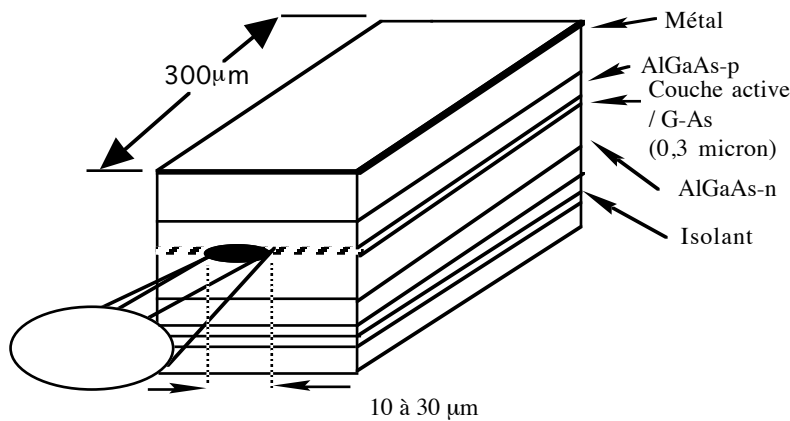


Fig. 3.8-13 : Structure d'un laser à semi-conducteur à hétérojonction.

Les faces clivées et polies du semi-conducteur forment la cavité résonnante.

Le laser est formé d'un empilement de couches épitaxiées. La couche active de Ga As de type p, se trouve entre deux couches de confinement de AlGaAs. D'autres couches, permettent de chaque côté le contact avec les électrodes. Sous l'action d'une polarisation directe de 1.5 V environ, des électrons sont injectés dans la couche active et se recombinent avec les trous qui s'y trouvent. La recombinaison des porteurs est accompagnée de l'émission de photons. Ces photons sont confinés dans la zone active, qui joue également un rôle de guide d'onde, grâce à la discontinuité d'indice avec les couches voisines. La cavité résonnante est formée par les extrémités clivées du semi-conducteur; la différence d'indice importante entre le matériau et l'air permet d'obtenir une réflexion suffisante pour la rétroaction.

La cavité peut être configurée différemment : à miroirs externes, à modulations d'indice, à miroirs de Bragg.

- une cavité à miroir externe permet d'obtenir un meilleur confinement spatial.
- La rétro action peut être assurée par une modulation périodique d'indice dans la direction de propagation (voir schéma). On parle de miroir de Bragg ; la réflexion est alors distribuée sur la longueur de la zone modulée de période spatiale $\Lambda = m \frac{\lambda}{2}$ (m nombre entier, λ , longueur d'onde) . Cette cavité présente une meilleure sélectivité spectrale qui peut aller jusqu'au fonctionnement monomode.
- Dans un laser à cavité verticale ou à émission de surface, le rayonnement s'échappe perpendiculairement à la surface ; ce type de cavité est adapté à la réalisation de matrice de lasers à une dimension (barrette) ou à deux dimensions (réseaux).

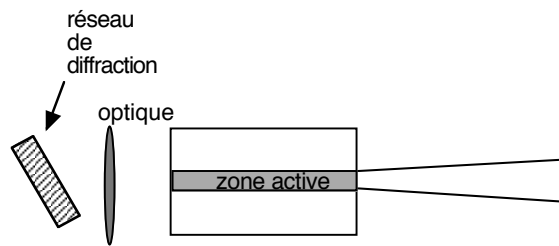


Fig. 3.8-14 : Cavité à optique externe. Le réseau permet de réduire le spectre.

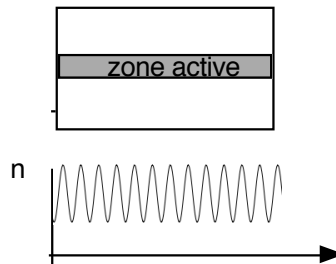


Fig. 3.8-15 : Fibre à réseau de Bragg. L'indice de la zone active varie périodiquement le long de son axe : une onde réfléchiée est générée par cette modulation.

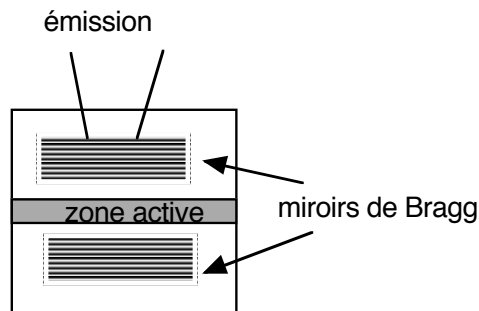


Fig. 3.8-16 : Laser à émission de surface ('cavité verticale').

Grâce à une zone active réduite, de section $5 \mu\text{m} \times 0,3 \mu\text{m}$ environ, le fonctionnement continu est obtenu avec un courant de quelques centaines de milliampères seulement.

Caractéristiques typiques des lasers à semi conducteur.

Les lasers à semi-conducteur se caractérisent par les propriétés suivantes :

- un rendement élevé, proche de 50%,
- compacité et solidité. Le matériau actif est solide ; l'insertion dans les dispositifs électroniques est facile.
- émission dans une large gamme de longueurs d'onde, entre $0,3 \mu\text{m}$ et $30 \mu\text{m}$
- accordabilité en longueur d'onde en utilisant une cavité extérieure et des éléments dispersifs comme un réseau.

Les figures ci-après montrent quelques courbes caractéristiques des lasers à semi conducteur : la puissance de sortie en fonction du courant d'excitation, le spectre, le diagramme d'émission.

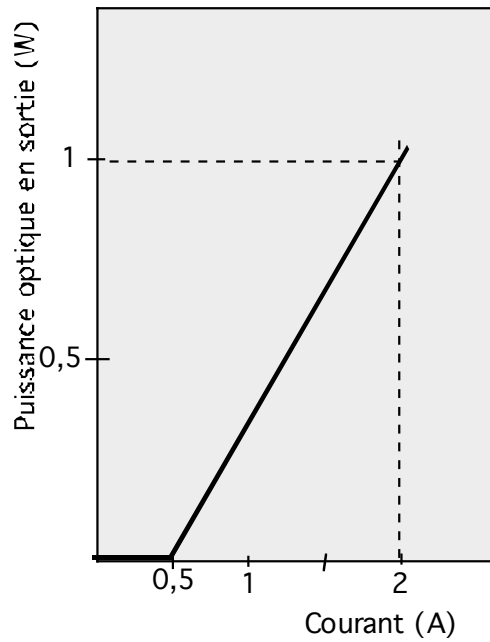


Fig. 3.8-17 : Allure caractéristique de la courbe puissance de sortie en fonction du courant d’excitation. La courbe présente un seuil de courant en dessous duquel la puissance émise est quasi nulle.

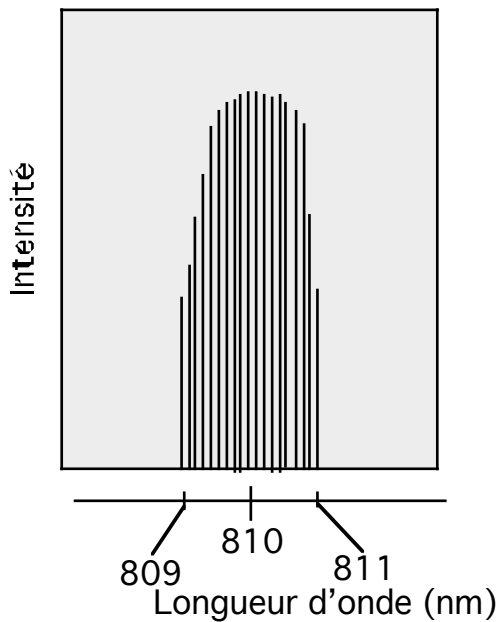


Fig. 3.8-18 : Spectre d’émission. De nombreux modes longitudinaux peuvent osciller simultanément.

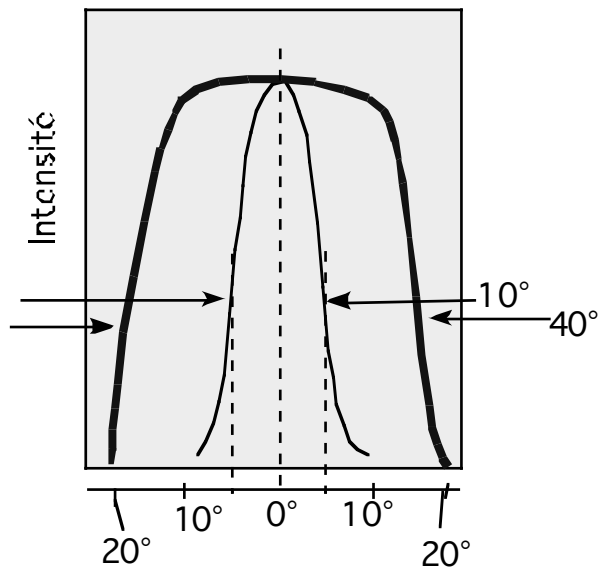


Fig. 3.8-19 : Diagramme spatial d’émission. Le diagramme est asymétrique : les divergences sont différentes dans le plan et perpendiculairement au plan de la jonction.

Les lasers à semi-conducteur sont essentiellement utilisés dans les communications et pour la lecture des disques optiques. Ils sont en effet modulés très facilement et peuvent être intégrés sur un même circuit avec d’autres composants électroniques. Ils sont légers, solides mais leur rayonnement est plus divergent (0,3 à 0,5 rd) que ceux des autres lasers. Les puissances obtenues varient de quelques mW à quelques W (25 W obtenus une diode de la société Spectra Diode Labs). La gamme de longueurs d’onde disponibles s’étale entre 300 nm et 3000 nm. Les lasers à semi-conducteur ont trouvé de nombreuses applications en instrumentation

industrielle; avec l'augmentation de puissance attendue, ils sont amenés à remplacer d'autres types de lasers, comme le laser à HeNe, pour des applications de plus en plus nombreuses. Ils sont en particulier de plus en plus utilisés comme source de pompage de certains lasers solides comme le Nd:YAG et les lasers à fibre dopées Erbium ou Ytterbium.

Un inconvénient qui pourrait disparaître dans l'avenir réside dans la nature des matériaux : l'effet laser n'est pas facile à obtenir dans les matériaux semi conducteur utilisés en électronique, le silicium et le germanium. L'intégration complète des circuits électroniques et photoniques ne se fait que lentement en raison de cette difficulté.

3.8.3.2 - Diodes laser de puissance

La réalisation de diodes laser de forte puissance impose des contraintes plus grandes que pour les diodes destinées aux télécommunications ou aux mesures [Vol.98] . D'une part l'efficacité optique/électrique doit être optimisée pour atteindre environ 45% ; d'autre part l'utilisation de traitements réfléchissants permet d'extraire la totalité de la puissance émise à travers une seule face.

On peut associer, par soudage du substrat, plusieurs diodes sur un même substrat pour former une barrette et obtenir des puissances importantes, les rendant utilisables pour le pompage de lasers solides (isolants dopés comme le Nd:YAG). Les diodes peuvent fonctionner en continu ; des puissances de quelques dizaines de Watts peuvent être obtenues. Le fonctionnement en impulsions est aussi possible. C'est le mode de fonctionnement approprié pour le pompage des lasers solides ; les impulsions ont alors une durée de quelques 0,1 à 0,2 milliseconde. La puissance émise par une barrette peut atteindre une centaine de watts crête.

Pour augmenter la puissance totale émise, on peut associer plusieurs barrettes sur un support offrant une bonne conductivité thermique. Le 'stack' ainsi obtenu permet de générer des puissances de 350 W et 1,5 kW. Avec de telles puissances des opérations d'usinage et de soudage de matériaux peuvent être envisagées. La puissance totale pourrait atteindre 4 kW dans l'avenir. La qualité de faisceau est cependant médiocre : la tache de focalisation, suivant l'optique utilisée, varie entre $1 \times 3 \text{ mm}^2$ et $2 \times 5 \text{ mm}^2$ avec une densité de puissance d'environ 20 kW.cm^{-2} .

3.8 - 4 Lasers à gaz

3.8.4.1 - Introduction

Un milieu actif gazeux présente les avantages suivants par rapport à un matériau solide:

- le milieu reste homogène jusqu'aux grandes irradiances de rayonnement;
- l'énergie thermique est évacuée par collision des atomes ou molécules avec les parois du tube; le refroidissement est amélioré par circulation rapide du gaz;
- le volume peut être considérable, par exemple sous la forme d'un tube de plusieurs dizaines de mètres de longueur; pour cette raison, les plus grandes puissances continues sont fournies par des lasers à gaz.

Les lasers à gaz présentent aussi des inconvénients. Ce sont des systèmes encombrants. De plus, des tensions de plusieurs milliers de volts sont nécessaires à la création de la décharge. Parmi les lasers à gaz, on distingue :

- les lasers à gaz neutre (exemple: laser He-Ne);
- les lasers à gaz ionisé ou laser ionique (exemple: laser à argon);
- les lasers moléculaires (exemple: laser à CO₂).

3.8.4.2 - Le laser à hélium-néon

Le laser à hélium-néon, dont le rayonnement rouge ($\lambda=0,6328 \text{ }\mu\text{m}$) est bien connu, a été développé dès 1961 dans les laboratoires Bell par Javan, Bennett et Herriott [Javan.61] et commercialisé au cours de la même année. C'est encore aujourd'hui le laser le plus couramment utilisé dans les applications où une grande puissance n'est pas nécessaire: métrologie, alignement. Cependant, les lasers à diode dont les performances s'améliorent rapidement peuvent déjà remplacer les lasers à He-Ne pour certaines applications.

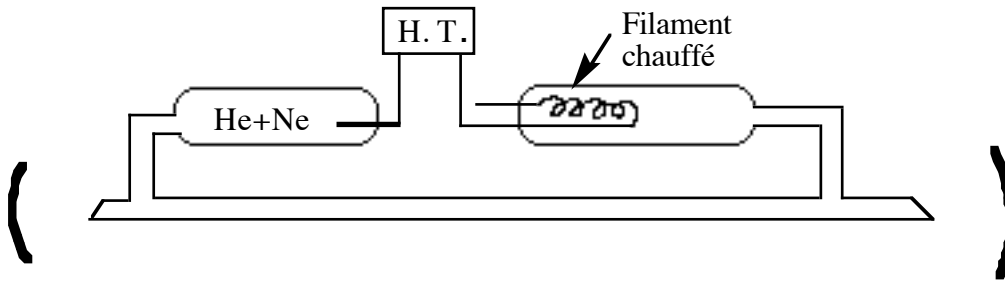


Fig. 3.8-20 : Laser à hélium-néon.

Le filament chauffé sert à produire les électrons de la décharge d'excitation

Le milieu actif d'un laser à He-Ne est composé d'un mélange d'hélium (90%) et de néon (10%) contenu dans un tube sous une pression voisine du Torr. L'alimentation électrique se compose d'un transformateur et d'un redresseur de tension. La tension d'excitation qui est une fonction des dimensions du tube et de la pression du gaz, est voisine de 1300 V. Une résistance placée en série avec le tube, permet de limiter le courant de décharge. L'alimentation du tube comprend également un circuit fournissant les 3000 V nécessaire à l'amorçage de la décharge.

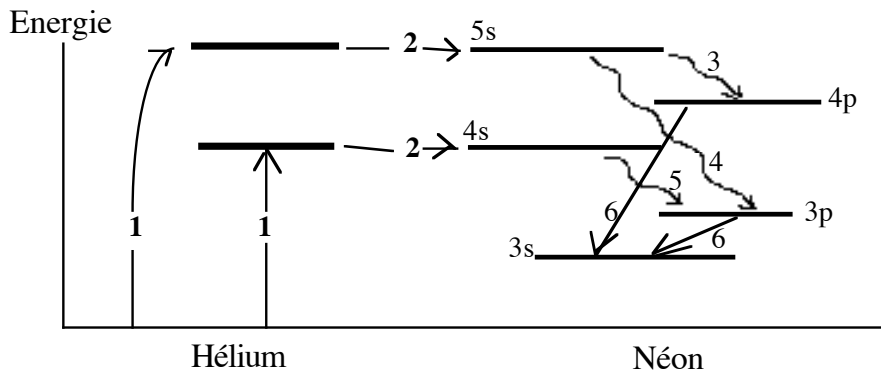


Fig. 3.8-21 : Niveaux d'énergie des atomes d'hélium et de néon.

1: transitions de l'atome d'hélium par excitation électronique; 2: transfert résonnant de l'énergie d'excitation de He à Ne; 3: transition à longueur d'onde de 3,39 μm ; 4: transitions à 0,6328 μm ; 5: transition à 1,15 μm ; 6: transitions rapides non radiatives; 7: transitions par collisions avec les parois du tube.

Pour expliquer le principe du fonctionnement du laser à He-Ne, considérons le diagramme des niveaux d'énergie montré sur la figure ci-dessus. Les atomes d'hélium sont excités facilement par les collisions avec les électrons. Deux des niveaux supérieurs d'énergie de l'hélium, coïncident avec des niveaux de l'atome de néon. Lors des collisions entre He et Ne, l'énergie d'excitation de He est transférée vers Ne. La structure d'énergie de l'atome de néon est plus complexe que celle de l'atome d'hélium. Le néon possède en particulier plusieurs paires de niveaux entre lesquels une inversion de population s'établit si la décharge est suffisamment intense. Plusieurs transitions peuvent donner lieu à un effet laser; les longueurs d'onde correspondantes sont 0,543 μm , 0,594 μm , 0,633 μm , 1,152 μm et 3,39 μm . Le retour des atomes vers le niveau fondamental se fait par deux transitions successives dont la dernière est accélérée par la collision des atomes avec les parois du tube. En diminuant le diamètre du tube, le nombre de collisions est augmenté; l'avant-dernier niveau est ainsi rapidement dépeuplé et l'inversion de population se fait plus facilement. La pression P du gaz et le diamètre d du tube sont reliés par [Ready.78] :

$$P(\text{Torr}) \times d(\text{mm}) \approx 3.2$$

On augmente le volume de gaz en utilisant un tube qui présente des protubérances aux extrémités. En pratique, la puissance maximale des lasers à He-Ne commercialisés reste limitée à 50 mW mais peut atteindre 150 mW. Les modèles les plus courants fournissent des puissances de 0.5, 1, 2, 5, 10 ou 20 mW.

Les parois du tube d'un laser à He-Ne jouent aussi le rôle de diaphragme. Le mode transverse TEM₀₀ est favorisé et la divergence reste inférieure à 1 mrad. La cavité des lasers He-Ne est formée de deux miroirs collés directement sur les extrémités du tube. Les miroirs peuvent aussi être fixés sur des montures indépendantes, en particulier dans les lasers à polarisation linéaire dont le tube se termine par des fenêtres de Brewster.

Exemple de caractéristiques d'un Laser à HeNe de 5 mW ($\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$)

Puissance :	5 mW
Polarisation	rectiligne
Distance entre modes longitudinaux	400 MHz
Temps de stabilisation au démarrage	15 mn
Dérive de puissance	1,5 %
Diamètre du faisceau à e ⁻²	0,9 mm
Divergence	1 mrad
Alimentation électrique	30 W

3.8.4.3 - Les lasers à gaz ionisé: argon, krypton

Le laser à argon est un laser ionique; en effet la transition laser a lieu entre les niveaux d'énergie de l'ion Ar⁺. L'excitation est obtenue par collision avec les électrons d'un courant de décharge d'une densité égale à plusieurs centaines d'ampères par cm². L'ion Ar⁺ se caractérise par un diagramme d'énergie comportant de nombreux niveaux. L'inversion de population peut être obtenue entre plusieurs paires parmi ces niveaux. Les lignes d'émission les plus souvent utilisées sont: 514 nm (vert), 488 nm (bleu). Il est également possible de faire fonctionner le laser à 351, 364, 457, 476 ou 496 nm. Lorsque la cavité est formée de miroirs à large bande de réflexion, plusieurs raies oscillent simultanément. Pour sélectionner une longueur d'onde, on utilise un prisme dans la cavité comme indiqué sur Fig. 22.

Le faisceau a un diamètre de 1 mm environ à la sortie du laser et une divergence de 0,6 mrad. Le laser à argon est essentiellement utilisé en recherche scientifique et en métrologie mais c'est aussi le laser qui offre la plus grande puissance continue dans le visible bien que le rendement ne soit que de 0,05% environ. Les modèles commercialisés permettent d'obtenir jusqu'à 30 W. Le refroidissement est fait par air sur les modèles de puissance inférieure à 50 mW et par eau sur les autres modèles. On utilise également le fonctionnement en blocage de modes. En éjectant des impulsions de la cavité à l'aide d'un dispositif électro-optique, on obtient des impulsions dont la puissance crête est de l'ordre du kilowatt. Le laser à argon est utilisé dans l'industrie électronique pour le traitement thermique des semi-conducteurs.

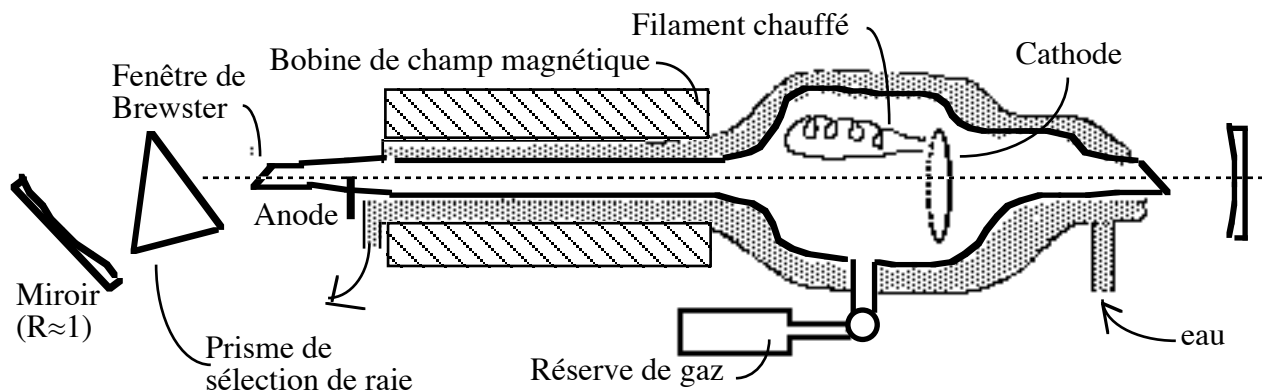


Fig. 3.8-22 : Laser à argon.

Le prisme sert à sélectionner une longueur d'onde particulière. Le réglage de longueur d'onde se fait par rotation de l'ensemble prisme+miroir arrière.

Le laser à **krypton** est très semblable au laser à argon, et dispose également de plusieurs lignes d'émission, dont les principales sont dans le rouge (677 nm) et dans le jaune (568 nm).

Le laser à **hélium-cadmium** est un autre laser ionique commercialisé. Il peut émettre quelques mW à 325 nm et quelques dizaines de mW à 441,6 nm.

3.8.4.4 - Lasers à vapeurs métalliques

Certains matériaux métalliques comme le cuivre ou l'or présentent à l'état de vapeur des transitions donnant lieu à l'effet laser. Le matériau actif est introduit dans un tube réfractaire, dans lequel on fait d'abord le vide et que l'on chauffe ensuite jusqu'à une température suffisamment élevée pour provoquer la vaporisation du métal (environ 1000°). Les lasers à vapeurs métalliques émettent un faisceau impulsif (fréquence de 5 à 20 kHz); les impulsions ont des énergies de quelques millijoules et une durée de 20 à 50 ns. La puissance moyenne atteint une centaine de watts.

Les lasers à vapeurs de cuivre offrent deux transitions principales, l'une à 510,5 nm, l'autre à 578,2 nm ; ce faisceau vert, obtenu avec un rendement d'environ 1% est utilisé dans les applications de séparation isotopique des matériaux radioactifs. Des essais fructueux dans le domaine de l'usinage et du traitement des matériaux ont été réalisés. Les lasers à vapeurs métalliques peuvent aussi être utilisés comme sources d'éclairage dans la photographie ultra rapide ou comme source de pompage dans l'amplification d'impulsions issues de lasers à colorants organiques.

3.8.4.5 - Les lasers moléculaires (CO₂, CO)

3.8.4.5.1 Principe de fonctionnement du laser à CO₂

Le laser à CO₂ est devenu le laser d'usinage par excellence. Ce laser permet, grâce à un rendement de l'ordre de 10%, d'obtenir des puissances de plusieurs dizaines de kilowatts. Les densités de puissance obtenues après focalisation sont suffisantes pour vaporiser ou faire fondre la plupart des matériaux connus. Les lasers à CO₂ fonctionnent en réalité avec un mélange de CO₂, d'azote et d'hélium. L'énergie du rayonnement émis provient d'une transition entre deux niveaux d'énergie de vibration de la molécule de gaz carbonique. Cette molécule, composée d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène peut vibrer selon les trois différents modes indiqués sur la figure.

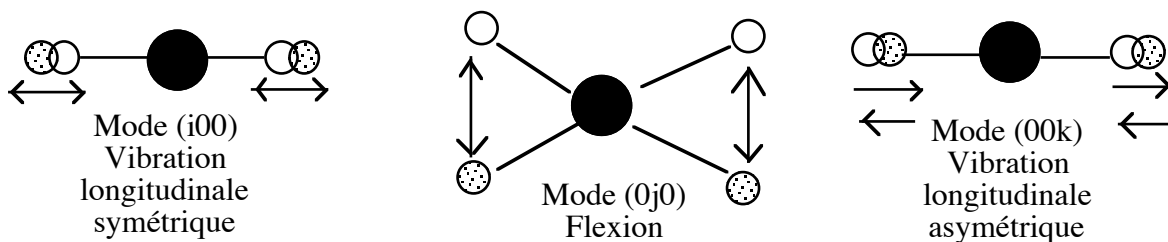


Fig. 3.8-23 : Les trois modes de vibration de la molécule de gaz carbonique.

L'énergie de vibration est quantifiée: l'énergie d'un mode de vibration ne peut changer que par quantités discrètes. Un état quelconque de vibration de la molécule est noté ijk ; l'état de repos de la molécule est noté 000. La figure 23 montre la disposition relative de différents modes de vibration suivant leur énergie. Le rayonnement à 10,6 microns utilisé en usinage, naît de la transition de l'état 001 à l'état 100.

La figure ci-après montre également le premier niveau d'énergie de vibration de la molécule d'azote. L'énergie de ce niveau est sensiblement le même que l'énergie du mode 001 de la molécule de CO₂. La molécule d'azote, présente dans les collisions avec les électrons, a une section efficace plus grande que celle de la molécule de CO₂ et l'énergie d'excitation de l'azote est facilement transférée au dioxyde de carbone.

Au mélange N₂-CO₂, on ajoute de l'hélium afin d'accélérer le retour des molécules de CO₂ à l'état de repos, ainsi qu'un refroidissement rapide.

Excitation du mélange CO₂-N₂-He. Le pompage est obtenu par une décharge électrique qui excite essentiellement l'azote. L'énergie d'excitation de l'azote est transférée aux molécules de CO₂ lors des collisions avec celles-ci. Les molécules de CO₂ perdent ensuite leur énergie par émission d'un photon IR à 10,6 μm (transition de 001 à 100) ou à 9,6 μm (transition de 001 à 020). Le choix de la ligne d'émission dépend de l'utilisation visée ; les matériaux plastiques en particulier absorbent bien à la longueur d'onde de 9,6 μm. L'étape suivante est le passage des molécules vers le niveau 010 par transition non radiative. Pour éviter un encombrement du niveau 010, on ajoute de l'hélium au mélange CO₂-N₂. La désexcitation du niveau 010 du CO₂ par collision avec He, est en effet très rapide. Il en résulte une amélioration du rendement global.

Plusieurs solutions existent pour la circulation du gaz et sont décrites ci-après :

- le tube scellé avec ou sans guide d'onde pour les faibles puissances (quelque Watts à une dizaine de Watts),
- le flux axial lent pour les puissances moyennes (quelques centaines de Watts),
- le flux axial rapide pour les fortes puissances (1 à quelques kW),
- le flux transverse pour les fortes à très fortes puissances (dizaines de kW).

La composition du mélange gazeux (CO₂,N₂,He) dépend de la technologie utilisée et du fabricant. Pour le flux lent et le flux axial rapide, elle est de 1 à 9% de CO₂, 13 à 35 % de N₂ et 60 à 85% d'He. Dans le cas du flux transverse, on ajoute aussi de l'oxygène.

Les impuretés contenues dans le mélange, en particulier la vapeur d'eau et les hydrocarbures, peuvent perturber le fonctionnement du laser. Un niveau de pureté de 99,995% est exigé pour un fonctionnement correct.

La décharge électrique d'excitation peut être **longitudinale** ou **transversale**. La décharge longitudinale est utilisée pour les lasers de faible et moyenne puissance. La pression du mélange doit rester faible (100 millibars ou moins) afin de maintenir une bonne stabilité. Aux faibles puissances le refroidissement du gaz est obtenu par conduction vers les parois du tube qui est refroidi par un liquide. Aux plus fortes puissances, une circulation du gaz à travers des échangeurs thermiques est nécessaire. La décharge transversale permet de réduire le volume de la cavité en faisant passer le faisceau plusieurs fois à travers l'espace de décharge. La cavité peut aussi être instable. La pression du gaz peut être supérieure à 100 millibars.

La décharge électrique d'excitation du mélange gazeux peut être **continue** ou **impulsionnelle**. La décharge continue est réalisée par l'application d'une haute tension entre deux électrodes placées à l'intérieur du mélange gazeux (Fig. 25.a).

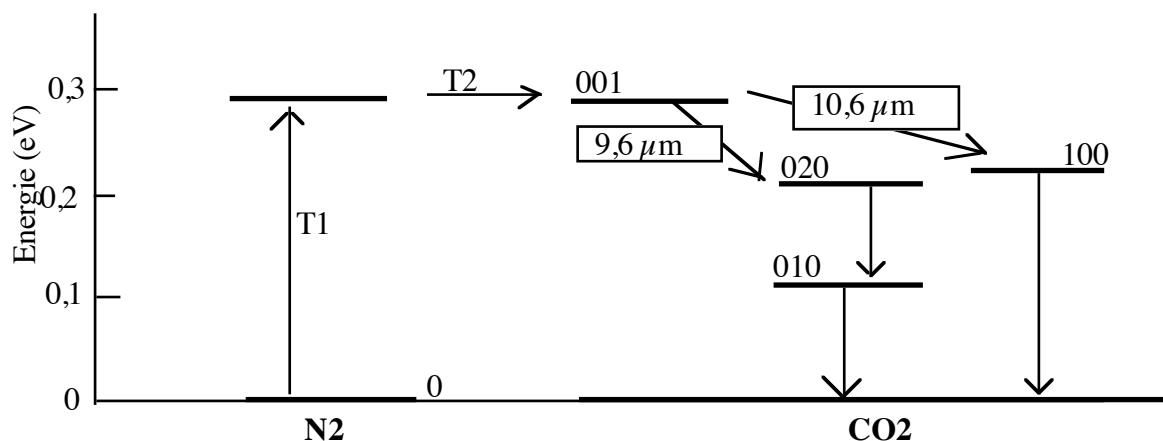


Fig. 3.8-24 : Les niveaux d'énergie des molécules de gaz carbonique et de d'azote.

L'azote est excité par collisions avec les électrons de la décharge (transition T1 sur le dessin). Les atomes d'azote excité transfèrent leur énergie aux molécules de CO₂ au repos lors de collisions (transitions T2).

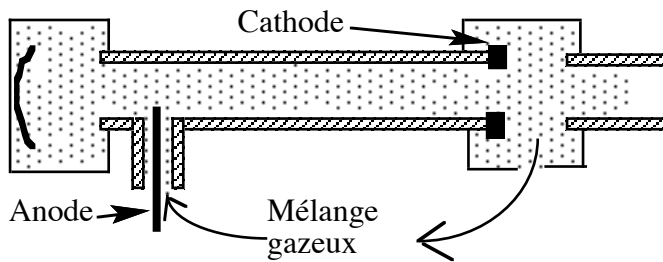
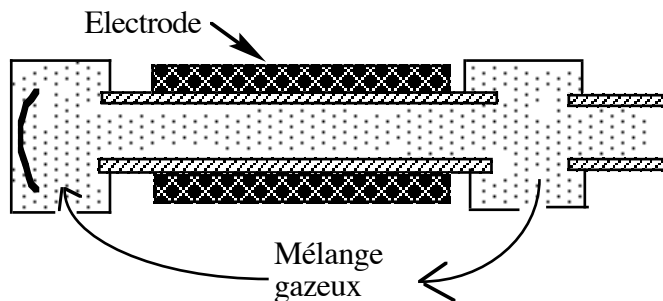


Fig. 3.8-25 : laser à CO₂

a) Excitation par décharge continue. Les électrodes se présentent sous la forme d'une anode linéaire et d'une cathode annulaire en contact avec le mélange gazeux



b : Excitation par décharge R.F.. Les électrodes sont situées à l'extérieur du mélange gazeux.

Pour les lasers de grande puissance, ce dispositif présente deux inconvénients :

- nécessité d'une très grande tension (supérieure à 10 kV),
- contamination progressive des électrodes et apparition de points chauds dans la décharge. La qualité du faisceau obtenu avec ce type de décharge reste donc limitée. Les modèles les plus récents (après 1985) de lasers à CO₂ de forte puissance font appel à une excitation par une onde radio (13 ou 27 MHz). La figure 25 montre la disposition des éléments d'excitation dans les cas d'une décharge continue (a) et d'une décharge R.F.(b). La décharge R.F. présente plusieurs avantages par rapport à la décharge continue :

- une meilleure stabilité;
- une plus grande densité de puissance (jusqu'à 5W/cm³) par unité de volume de décharge grâce au changement périodique rapide de polarité des électrodes dans la décharge R.F. (la décharge continue favorise l'ionisation du gaz et la création d'un arc électrique);
- une plus faible tension de décharge (environ 1 kV au lieu de 10 à 20 kV) nécessaire pour maintenir l'effet laser, la séparation entre les électrodes étant réduite au diamètre du tube;
- une excitation plus homogène du mélange gazeux et donc une meilleure qualité de faisceau;
- l'absence de contact entre les électrodes et le mélange gazeux, ce qui facilite les opérations de maintenance et réduit la détérioration du gaz;
- la possibilité de passer très rapidement d'une émission continue à une émission impulsionnelle, très utile pour certaines opérations d'usinage.

Comme inconvénient, il faut remarquer que les ondes R.F. peuvent introduire des perturbations dans les circuits de commande et doivent en conséquence être soigneusement isolées.

La décharge R.F. peut être continue ou impulsionnelle. En régime continu les variations de puissance sont limitées à 75 à 100 % de la puissance maximale. Une plus grande plage de variation est obtenue avec une excitation impulsionnelle.

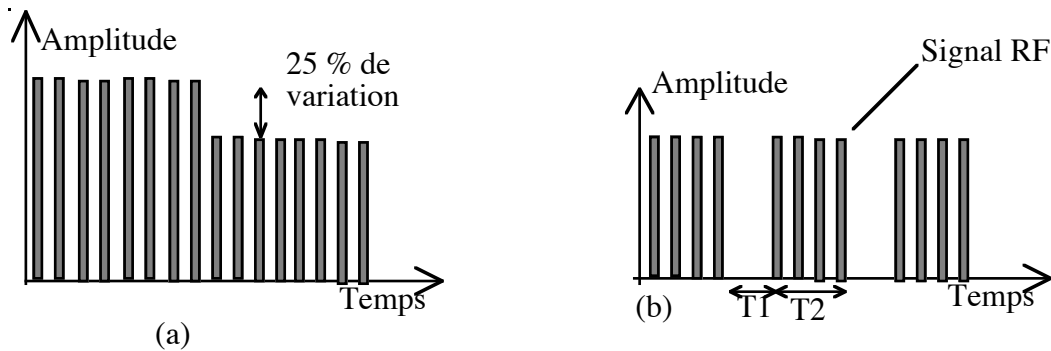


Fig. 3.8-26 : Signal d'excitation par décharge R.F..

(a) Décharge continue. La plage de variation du signal est limitée à 25 %. b) Décharge impulsionnelle. L'intensité de l'excitation est ajustée par modification de la durée T2 des impulsions et par la fréquence du signal de modulation ($F=1/(T1+T2)$)

Exemple de caractéristiques d'un laser à CO₂ (Modèle Rofin-Sinar 5000)

Puissance maximale :	5000 W (7000 W en configuration spéciale).
La puissance est utilisée à partir de 10 % de la puissance maximale.	
Fréquence des Impulsions:	0 à 20 kHz.
Largeur des impulsions:	20 μ s à continu.
Puissance crête en superimpulsion:	5 fois la puissance nominale continue.
Diamètre du faisceau:	35 mm.
Divergence du faisceau:	1,5 mrd.
Stabilité de pointage:	0,15 mrd.
Modes:	TEM ₁₀ à faible puissance. TEM ₂₀ à la puissance maximale.
Polarisation:	Linéaire à 45 °.
Consommation horaire de gaz:	He: 100 l, N ₂ : 45 l, CO ₂ : 5 l.
Pureté requise pour les gaz:	99,996 %
Technologie:	Flux axial rapide. Le gaz se déplace suivant l'axe du tube à une vitesse proche de celle du son.
Excitation :	Radio-fréquence à 27,12 MHz.

3.8.4.5.2 Laser à CO₂ de faible puissance à tube scellé

Il existe des lasers à CO₂ de quelques dizaines de watts à tube scellé. Le mélange gazeux constitué d'environ 10% de CO₂, 40% de N₂ et 50% de He, est enfermé dans un tube sous faible pression. La puissance fournie par ce type de laser est proportionnelle à la longueur du tube et se situe entre 0,5 et 1 watt par centimètre. L'excitation est obtenue par une décharge électrique continue. Le gaz est partiellement décomposé par la décharge. Des électrodes spéciales permettent de catalyser la réaction inverse et de maintenir la composition du mélange. Une durée de vie de plusieurs milliers d'heures est ainsi obtenue.

3.8.4.5.3 Laser à CO₂ à guide d'onde

Dans leur version la plus compacte, les petits lasers à CO₂ ont une structure en guide d'onde. Un tube en oxyde de béryllium ou en céramique de 1 mm de diamètre environ est utilisé à la fois pour confiner la décharge et guider le faisceau. Les puissances obtenues sont de quelques watts à 40 W avec des lasers d'une dizaine de centimètres de longueur. Les lasers à CO₂ à guide d'onde présentent aussi l'avantage de pouvoir être ajustés en fréquence sur une largeur de l'ordre du Gigahertz. Cette particularité est intéressante pour certaines applications en métrologie. Le schéma d'un laser à guide d'onde est donné sur la figure. La décomposition du CO₂ et la contamination du tube fixent une limite à la durée de vie du laser.

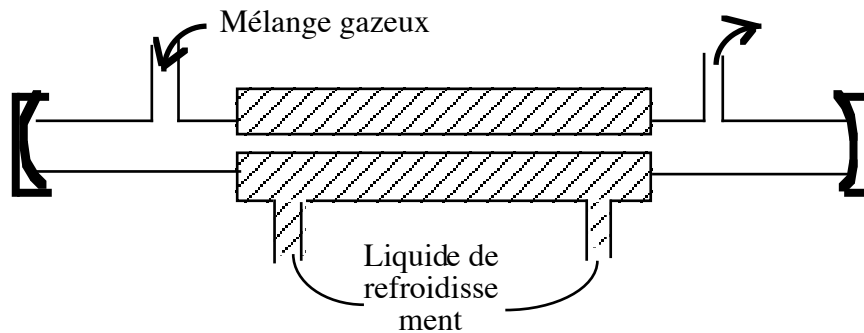


Fig. 3.8-27 : Laser à CO₂ à guide d'onde.

3.8.4.5.4 Laser à CO₂ de moyenne puissance à flux axial lent

Ces lasers fonctionnent suivant le même principe que les lasers de faible puissance à tube scellé. La longueur du tube détermine la puissance émise par le laser, soit environ 75 W par mètre de tube. Pour les puissances supérieures à 50 W, on utilise un dispositif de circulation du gaz le long du tube. Le flux est nécessaire pour extraire de la cavité les produits de dissociation du dioxyde de carbone et des autres contaminants. A cause de la lenteur du flux, le gaz s'échauffe ; un refroidissement par circulation d'eau ou d'huile est utilisé. Les lasers à flux axial lent fournissent des puissances de quelques centaines de watts: ils sont utilisés pour usiner les matériaux non métalliques, et certains métaux en tôles de faible épaisseur.

Le rendement des lasers à CO₂ étant en pratique compris entre 8 et 15%, un système de refroidissement est nécessaire sur les lasers de forte et moyenne puissance. Dans les lasers à flux axial lent, le gaz chaud diffuse naturellement vers les parois du tube. Il suffit donc de faire circuler un liquide le long des parois du tube pour évacuer la chaleur.

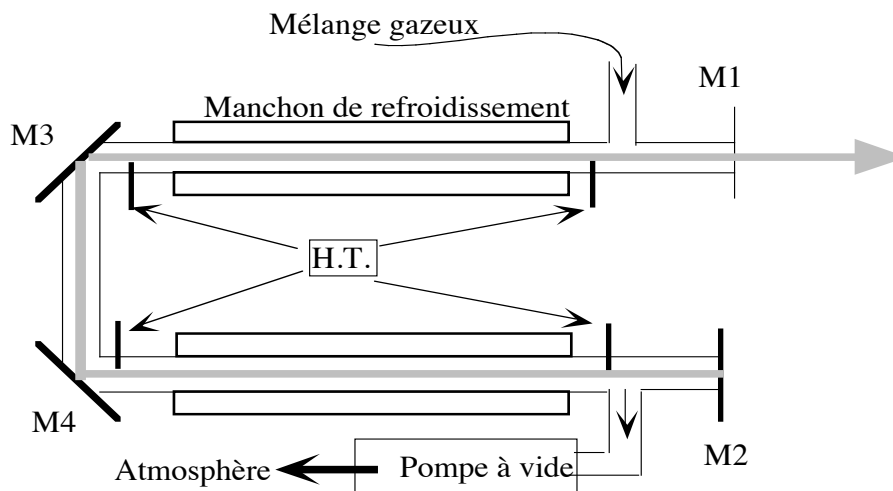


Fig. 3.8-28 : Schéma d'un laser à CO₂ à flux axial lent.

M₁ : miroir de sortie M₂ : miroir à réflexion totale, M₃, M₄ : miroirs de renvoi, H.T. : Alimentation à haute tension.

3.8.4.5.5 Laser à CO₂ de grande puissance à flux axial rapide

Il existe un autre procédé pour refroidir rapidement le laser, c'est la méthode du flux rapide. Le gaz chaud est remplacé de façon continue par du gaz froid. Si la circulation du gaz est suffisamment rapide, la diffusion vers les parois du tube est négligeable et le refroidissement peut être réalisé à l'extérieur du tube.

Nous avons déjà mentionné le problème de la décomposition du CO₂ lors des collisions. Les produits de décomposition, en particulier le monoxyde de carbone ont une action néfaste sur l'émission laser. D'autre part, l'efficacité du laser est augmentée si les molécules ayant atteint le niveau bas de la transition, sont évacuées rapidement. Pour ces deux raisons les lasers à flux rapide de gaz permettent d'obtenir des puissances plus élevées sous des volumes réduits. La puissance émise par le laser ne dépend plus de la longueur de la cavité, mais du débit de gaz.

3.8.4.5.6 Laser à CO₂ de grande puissance à flux transverse

La technologie du flux transverse permet d'obtenir des puissances de 1 à 20 kilowatts en continu sous un encombrement réduit. La circulation rapide du gaz a aussi l'avantage d'assurer un refroidissement rapide, le gaz échauffé étant remplacé par un mélange neuf. Cette technologie est utilisée pour les très grandes puissances (20 kW). Pour les puissances de quelques kilowatts, la technologie de la 'cavité du type SLAB' est utilisée.

Type de laser	Guide d'onde	Flux axial lent	Flux axial rapide	Cavité SLAB	Flux transverse rapide
Puissance	5 à 20 W	10 W à 1 kW	1 à 5 kW	1 à 3 kW	10 à 40 kW
Divergence	10 mrd	1 à 2 mrd	1 à 3 mrd	1 à 3 mrd	1 à 5 mrd
Diamètre du faisceau	1 mm	5 à 10 mm	10 à 15 mm	10 à 20 mm	10 à 40 mm

Tableau: Principales caractéristiques des faisceaux de lasers à CO₂

3.8.4.5.7 Laser à CO₂ 'SLAB'

La recherche de la puissance et de la compacité a abouti à un modèle de cavité hybride, les cavités 'slab' dans lesquelles la géométrie particulière des électrodes permet à la fois de confiner le rayonnement en oscillation et le refroidissement du mélange gazeux. La figure ci-après montre la cavité 'Slab' [³].

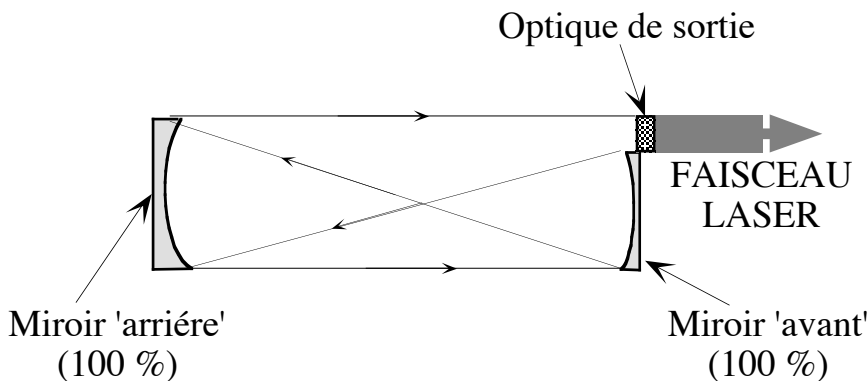
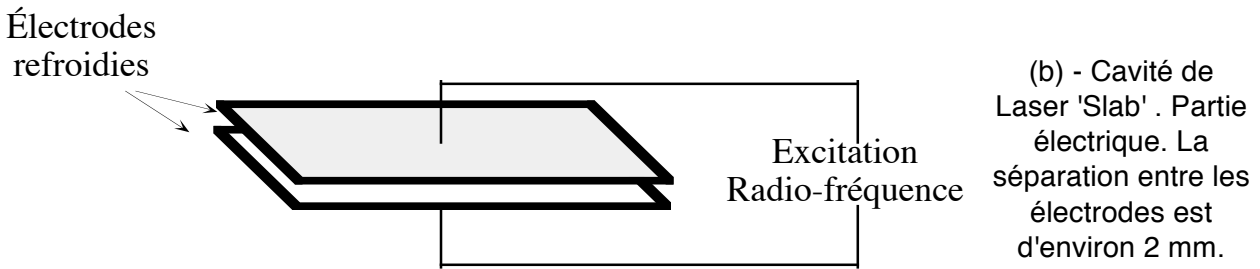


Fig. 3.8-29 : Cavité de Laser 'Slab'
a - Partie optique

³ "Sealed carbon dioxide lasers achieve new power levels" - Kurt Bondelie, Laser Focus World, August 1996, p95-100



La cavité est constituée de 2 miroirs sphériques de rayons de courbure différents et à réflexion totale. Le rayonnement en oscillation à l'intérieur de la cavité remplit le volume compris entre les miroirs. Le faisceau sort à côté de l'un des miroirs à travers une optique de mise en forme qui confère au faisceau en sortie une allure quasi-cylindrique. La puissance émise est ici proportionnelle au volume confiné entre les électrodes. Les modèles existants produisent des faisceaux de puissance entre une centaine de Watts et des valeurs supérieures au kW. La qualité de faisceau est satisfaisante (M^2 de 1,2 à 1,5).

L'excitation utilisée avec les cavités est du type radio-fréquence. Les électrodes de forme rectangulaire, comme la cavité, sont refroidies. La grande surface de contact avec le gaz permet un refroidissement efficace. Ces électrodes servent également de guide pour le rayonnement en oscillation.

3.8.4.5.8 Lasers à CO₂ TEA impulsions

La décharge électrique est très difficile à réaliser et à maintenir dans le mélange gazeux pour une pression supérieure à environ 1/10^e de la pression atmosphérique; le mélange a en effet tendance à se transformer en arc électrique, peu favorable à l'établissement d'une inversion de population. Il est cependant possible d'obtenir l'effet laser dans un gaz à pression atmosphérique en excitant le milieu par décharge transverse pendant un temps court, voisin de la microseconde. Afin d'éviter la formation d'un arc électrique, on préionise le mélange gazeux à l'aide d'étincelles produites par microdécharges tout le long du tube. On produit alors une impulsion laser de 1 à quelques dizaines de joules, suivant la fréquence de répétition. La durée des impulsions peut être ajustée entre une fraction de microseconde à une dizaine de microsecondes ; en régime de blocage de modes axiaux, une durée de 10 ns peut être obtenue. La puissance moyenne fournie est inférieure à 100 W mais la puissance crête dépasse le mégawatt. Ces lasers sont connus sous le nom de laser TEA (excitation transverse à pression atmosphérique) et trouvent des applications dans le domaine du marquage.

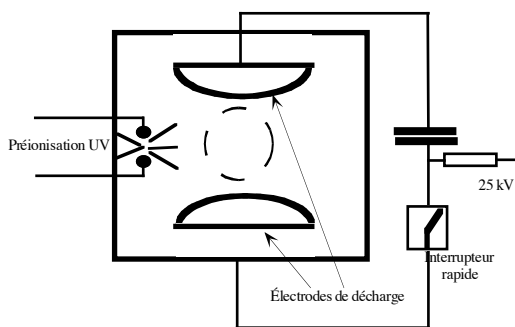


Fig. 3.8-30 : Schéma de principe d'une cavité de laser à CO₂ TEA.

3.8.4.5.9 Laser à CO₂ du type G.D.L.

Les lasers G.D.L. (Gaz Dynamic Laser) ont été développés pour la génération de rayonnement continu de puissance très élevée (jusqu'à 100 kW). Ces lasers ne sont pas commercialisés. Leur originalité réside dans la technique de pompage. Le gaz, porté à haute température est éjecté à travers une fente étroite. Après son injection, le gaz refroidit rapidement; les niveaux de basse énergie sont dépeuplés plus rapidement et une inversion de population est ainsi réalisée. Une cavité résonnante disposée près de la sortie des gaz, permet d'obtenir l'effet laser.

3.8.4.5.10 Lasers à CO

L'oxyde de carbone peut être également utilisé comme matériau actif pour la génération de faisceau laser de grande puissance dans l'infrarouge. La longueur d'onde du rayonnement émis ($\lambda = 5 \mu\text{m}$) est plus intéressante que celle du CO_2 pour l'usinage et le traitement de matériaux. Il est possible d'obtenir un faisceau de forte puissance. Cependant la fiabilité des lasers à CO est encore trop faible pour les applications industrielles. De plus la nécessité d'un refroidissement par azote liquide complique leur utilisation et la rend très onéreuse.

3.8.4.6 - Les lasers à excimères

Le matériau actif est un mélange de d'halogène et de gaz rare qui, en présence d'excitation, se combinent pour former des molécules qui n'existent que pendant un temps très bref (inférieur à la microseconde) dans l'état excité : ArF^* , KrF^* , XeF^* , XeCl^* (le symbole * indique que la molécule n'existe que dans l'état excité) [Pummer, 1985]. L'émission laser a lieu entre un état excité, fortement lié et un état fondamental instable. Seul le fonctionnement impulsif est possible. Le rayonnement émis se situe dans l'U.V. (193 nm pour ArF^* , 248 nm pour KrF^* , 308 nm pour XeCl^* , 350 nm pour XeF^*). Les énergies d'impulsions sont de quelques dizaines de millijoules à 1 joule ; leur durée peut être ajustée entre quelques nanosecondes à quelques centaines de nanosecondes. La fréquence de répétition peut être ajustée autour d'une centaine de Hz ; des fréquences plus élevées (jusqu'à 8 kHz) ont été obtenues dans les laboratoires. La puissance moyenne atteint 150 W avec les modèles déjà commercialisés. Le rayonnement U.V. étant bien absorbé par les matériaux, les lasers à excimères complètent la gamme des lasers d'usinage. Ces lasers sont déjà utilisés pour le recuit des semi-conducteurs et le marquage des substrats de silicium.

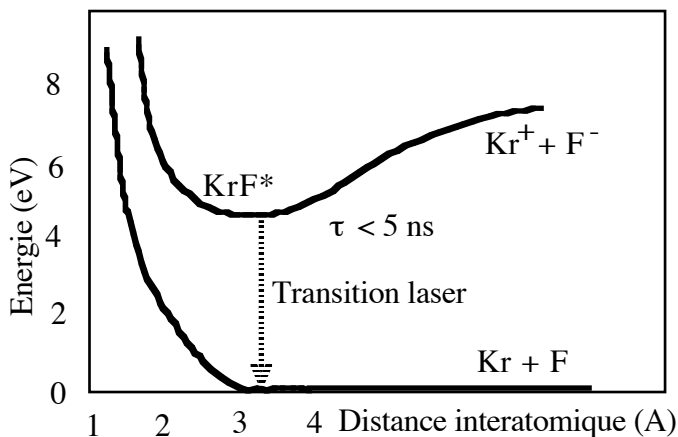


Fig. 3.8-31 : Énergie potentielle de l'ensemble diatomique $\text{Kr}+\text{F}$ en fonction de la distance interatomique.

L'énergie reçue lors d'une collision avec un électron de la décharge permet aux 2 atomes de s'ioniser et de s'associer pour former une molécule polaire, mais cette association ne dure que quelques nanosecondes.

Le pompage du milieu actif a lieu par décharge électrique dans le mélange des gaz actifs (Kr et F par exemple) en présence d'un troisième gaz, en général de l'hélium ou du néon. Un mélange typique dans le cas du KrF est constitué par du Fluor (pression partielle de 4 mm de Hg), du Krypton (pp de 120 mm de Hg) et de l'hélium (pp de 2400 mm de Hg). La composition diffère pour les autres mélanges, mais le gaz halogène ne représente qu'une quantité bien inférieure au pour-cent. L'efficacité du laser dépend de façon critique de la pureté des gaz qui doit être meilleure que 99,99%. Le gaz halogène, très réactif, est en général disponible sous forme d'un mélange constitué de plus de 95% d'hélium. Les collisions de la décharge provoquent la création d'une molécule excitée d'halogénure du gaz rare (KrF), qui ne peut subsister que pendant une dizaine de nanosecondes avant de se décomposer et céder son énergie sous la forme d'un photon. La figure 31 montre le diagramme énergétique d'un excimère.

A cause de la faible durée de vie de la molécule excimère, la décharge ionisante doit être rapide. Celle-ci est obtenue par claquage du gaz entre deux électrodes distantes de 2 à 3 cm et soumises à une tension de 20 à 30 kV. La cavité et le dispositif électrique d'excitation couramment utilisés sont représentés sur la figure 32.

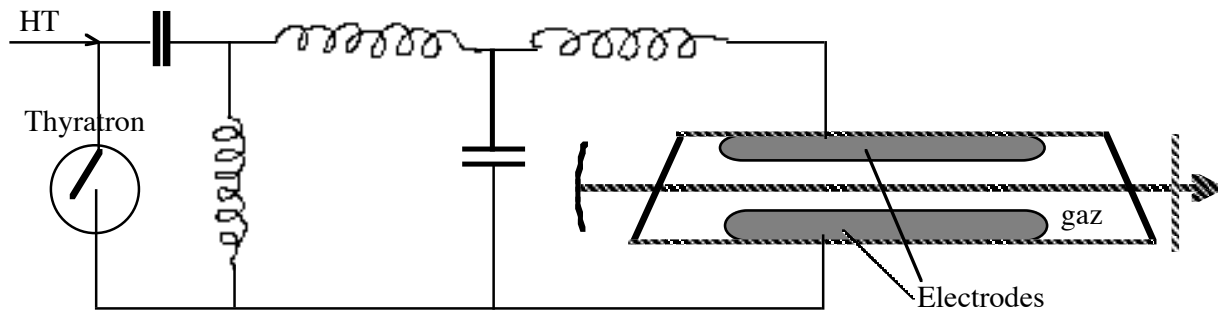


Fig. 3.8-32 : Cavité de laser à excimère et alimentation électrique.

Les lasers à excimères présentent un coefficient d'amplification important (entre 0,05 à 0,15 cm⁻¹). Ce sont essentiellement des sources superradiantes (le rayonnement est obtenue par amplification de l'émission spontanée pendant un seul passage dans la cavité) ; en pratique, une faible rétroaction optique est utilisée pour entretenir l'oscillation. Le miroir de sortie de la cavité est donc constitué d'une lame non traitée de MgF2 réfléchissant 8% du rayonnement incident. Ce gain important permet également l'utilisation d'une cavité instable.

Les caractéristiques des impulsions doivent être examinées soigneusement pour évaluer les possibilités d'un laser à excimère [Hecht.92]. Les fabricants privilégient suivant le cas, soit l'énergie d'impulsion, soit la fréquence de répétition. L'énergie d'impulsion diminue avec l'augmentation de la fréquence. Lorsqu'une puissance moyenne maximale est souhaitée, il convient de choisir comme milieu actif KrF (248 nm) ou XeCl (308 nm) ; XeCl présente également l'avantage d'une plus grande durée de vie du mélange gazeux.

Exemples de caractéristiques d'un laser à excimère (Laser à excimère - Lambda Physic)				
Milieu actif	ArF	KrF	XeCl	XeF
Longueur d'onde(nm)	193	248	308	351
En. max par impulsion(mJ)	100	250	125	100
Fréq. max de répétition (Hz)	200	200	200	200
Puiss. max. stabilisée (W)	20	50	25	20
Durée d'impulsion (ns)	17	25	20	14
Fluctuations de l'énergie d'imp.(%)	8	5	4	6
Dimensions du faisceau (mmxmm)	------(23,5±0,1) x(7,5±0,1) -----			
Divergence (mrd)(7±1) x(2±0,3) -----			

3.8 - 5 Laser à colorant liquide

De nombreux colorants organiques sont utilisés comme matériaux actifs. Leur bande spectrale d'absorption et de fluorescence sont larges mais le spectre laser peut être limité par des filtres dans la cavité. La longueur d'onde du rayonnement émis peut être ajustée sur la largeur de fluorescence du colorant qui s'étale sur plusieurs dizaines de nanomètres.

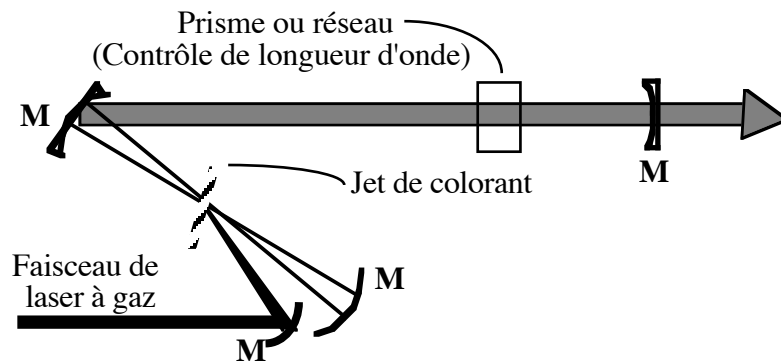


Fig. 3.8-33 : Laser à colorant pompé par faisceau laser

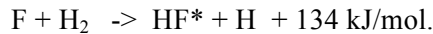
En utilisant successivement plusieurs colorants, il est ainsi possible d'obtenir l'émission laser à une longueur d'onde quelconque entre 0,36 et 1 micron. Les lasers à colorants sont utilisés avec un pompage optique (Fig. 5-24). Les sources de pompage utilisées sont : lampe à décharge, laser à argon, laser à azote, laser à Nd-YAG à fréquence doublée. Le type de fonctionnement, continu ou pulsé, dépend de la source de pompage. Les puissances obtenues dépendent de l'intensité de pompage et de l'efficacité du colorant. Un laser à rhodamine pompé en continu par un laser à argon, peut délivrer un rayonnement de puissance comprise entre quelques milliwatts et 1,5 watt.

Outre l'accord en fréquence, le large spectre émis par les colorants organiques, permet également par blocage des modes axiaux, la génération d'impulsions de durée inférieure à la picoseconde. Les lasers à colorants sont utilisés essentiellement pour la recherche scientifique et la métrologie.

3.8 - 6 Autres lasers

3.8.6.1 - Lasers chimiques

Il est possible d'obtenir un effet laser en utilisant l'énergie exothermique de certaines réactions chimiques. Une puissance continue supérieure à 5 kW dans le proche infra-rouge peut être obtenue en mettant en œuvre la réaction suivante :



Les gaz sont injectés à l'aide d'une tuyère dans l'espace compris entre les deux miroirs formant la cavité optique.

Les lasers chimiques mettent utilisent des gaz très réactifs et nécessitent une technologie très particulière difficile à implanter dans un laser d'usage courant.

3.8.6.2 - Laser à électrons libres

Un laser à électrons libres est constitué d'une structure magnétique périodique ou onduleur dans laquelle circulent des électrons provenant d'un accélérateur linéaire ou d'un anneau de stockage. Une cavité optique est installée parallèlement à l'onduleur. Le rayonnement émis par les électrons déviés périodiquement de leurs trajectoires par le champ magnétique est amplifié dans la cavité optique. Un effet laser peut ainsi être obtenu. La longueur d'onde dépend de l'énergie des électrons injectés dans la structure.

Les lasers à électrons libres permettent d'accorder la fréquence du rayonnement sur une plage spectrale s'étendant de 0,1 à 100 μm . Ces lasers nécessitent néanmoins une installation très complexe. Les lasers à électrons libres sont utilisés pour la recherche en biologie et en physique des surfaces solides [Brau.87].

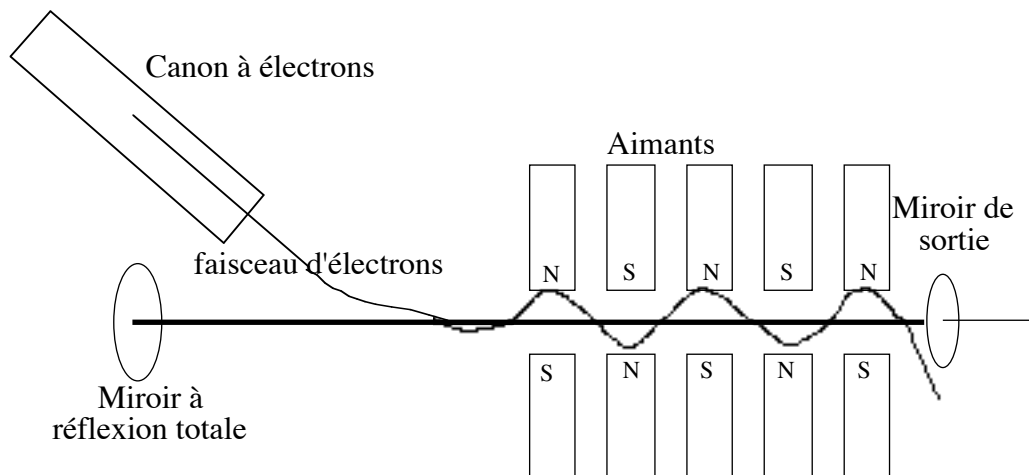


Fig. 3.8-34 : Fig. 5-27 : Schéma de principe d'un laser à électrons libres.

Le passage du faisceau d'électrons entre une série d'aimants dont les pôles sont alternés s'accompagne de l'émission de rayonnement suivant la direction perpendiculaire à celle du déplacement des électrons.

3.8.6.3 - Laser à rayons X

Il existe des prototypes de lasers fonctionnant dans le domaine des rayons X, à des longueurs d'onde 100 fois inférieures à celles du rayonnement visible. Le matériau actif peut être du sélénium comme dans le cas du laser du Laboratoire de Livermore aux Etats-Unis, ou un plasma dense composé d'électrons libres et d'atomes ayant perdu plusieurs électrons [Matthews.89]. Les conditions pour obtenir une inversion de populations à des énergies aussi élevées, sont difficiles à réaliser et le laser à rayons X pour lequel existent déjà des applications, n'existe encore que sous la forme de prototype.

3.8 - 7 Bibliographie

- [Brau.87] "Recent developments in free-electron lasers" ; C. A. Brau, Laser Focus World, Fevrier 1987, p40-46
- [Bondelie.95] "Sealed carbon dioxide lasers achieve new power levels" - Kurt Bondelie, Laser Focus World, August 1996, p95-100
- [Cozannet.81] A. Cozannet, J. Fleuret, H. Maître, M. Rousseau; Optique et Télécommunications, Eyrolles, 1981
- [Hecht.92] "Excimer lasers produce powerful ultraviolet pulses", J. Hecht, Laser Focus world, June 1992, p63
- [Hodgson.93] "Performance of 2,3 kW Nd:YAG slab laser system"; N. Hodgson, S. Dong, Q. Lü, Opt. Lett., Vol 18, N°20, p1727, Oct. 1993
- [Javan.61]. A. Javan, W.R. Bennett, D.R. Herriott, Phys. Rev. 6, 106, 1961
- [Koechner.88] W. Koechner, Solid State Laser Engineering, Springer Verlag, 2nd edition (1988)
- [Koestl.64] KOESTLER Charles J., SNITZER Elias. Amplification in a Fiber Laser. Applied Optics, vol. 3, No. 10, p. 1182-1186, October 1964.
- [Matthews.89] "Les lasers à rayons X mous", D. Matthews, M. Rosen, Pour la Science, n°136, p70, Janv/ 1989
- [Messenger.90] "Solid-state lasers develop new capabilities"; H. W. Messenger; Laser Focus World, August 1990
- [Puglio.83] J. T. Puglio, G. A. Gomba; Alexandrite challenges YAG for metal working, Laser Applications, Vol. 2, N°5, p.67, may 1983
- [Pummer,85] H. Pummer, "The excimer laser : 10 years of fast growth" ; Photonics Spectra, p 73, May 1985
- [Ready.78] J. F. Ready, Industrial Applications of Lasers, Academic Press, p 71, 1978
- [Vol.98] - G. Volluet, J-P Hirtz, (Thomson), "Les diodes laser de puissance. Conception et performances" - Optique et photonique, N°3, p 38-44, 1998

3.8 - 8 Webographie

http://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_différents_types_de_laser