

Partie 1 Histoire, Principes de base, modélisation et différents types du LASER

1. Introduction

L.A.S.E.R.: acronyme signifiant : **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation ou « Amplification Lumineuse par une Emission de Rayonnement Stimulée ». Il s'agit de la transformation d'une énergie d'origine quelconque en une énergie lumineuse ayant des propriétés particulières de cohérence. L'émission laser est une lumière **monodirectionnelle**, **monochromatique**, **cohérente**. Les lasers sont omniprésents dans la vie scientifique mais aussi dans la vie courante, simples dans leur principe, mais exemples-type d'application de la physique quantique.

2. Photométrie

2.1. Faisceau de lumière

Le faisceau est constitué d'un grand nombre de photons.

2.2. Energie transportée E_T

Énergie transportée par le faisceau, c'est la somme des énergies E_{ph} de chaque photon

$$E_T = \sum E_{ph} \quad (1)$$

2.3. Flux ou puissance optique

C'est l'énergie totale ramenée à l'unité de temps et elle donnée par :

$$F = E_T / T \quad (2)$$

2.4. Fluence

C'est la quantité d'énergie par unité de surface (S):

$$I = E_T / S \quad (3)$$

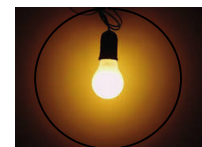
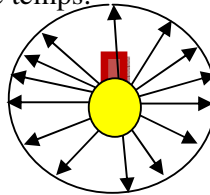
2.4. Débit de fluence

C'est la fluence ramenée à l'unité de temps:

$$I = I / T = F / S \quad (4)$$

2.5. Directivité du faisceau

La source classique est **Divergente**.



La lampe est placée à une distance R. La zone éclairée par la lampe à cette distance est une **Sphère** de surface donnée par:

$$S = 4 \pi R^2 \quad (5)$$

Par contre, le laser est **Monodirectionnel** et presque parallèle (**faible divergence**). La surface éclairée est la surface du **cercle** tracée sur un obstacle et ayant un rayon **r**. Cette surface est donnée par :

$$S = \pi r^2 \quad (6)$$

2.6. Comparaison de débit de fluence d'une source classique et d'un laser

Pour effectuer cette comparaison un exemple est nécessaire.

Exemple : si l'on s'intéresse à la puissance reçue à 2 mètres = 200 cm

- Une lampe de $F=100$ W (sphère $R=200$ cm) aura un débit de fluence de :

$$I = F/S = 100W / (4 \pi \times (200cm)^2) = 0,199 \text{ mW cm}^{-2}$$

- Un laser He-Ne de 1 mW (cylindre $r = 2 \text{ mm} = 0.2 \text{ cm}$) aura un débit de :
 $I = F/S = 10^{-3} \text{ mW} / (\pi \times (0.2 \text{ cm})^2) = 7.96 \text{ mW cm}^{-2}$

Le laser a plus de débit de fluence qu'une lampe malgré que la lampe dégage une puissance optique ou un flux 10^5 plus grande que celle délivrée par le laser He-Ne.

Une protection visuelle est donc nécessaire lors de l'utilisation de lasers.

2.7. Monochromaticité

La monochromaticité signifie de même couleur, mais qui s'emploie même en dehors du spectre visible : Il s'agit donc de rayonnements de même longueur d'onde.

- Dans un spectre théorique, on ne voit qu'une bande pour une couleur.
- Dans un spectre réel, il existe une bande de faible **largeur spectrale**.

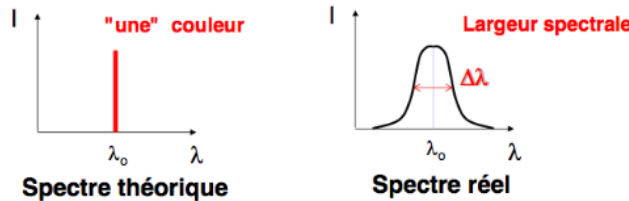


Figure 1. Spectre théorique et réel d'un laser

2.8. Comparaison de spectres

La lumière émise par les lampes 'classiques' est composée de nombreuses longueurs d'ondes, même les spots de couleur ou les lampes à vapeur métallique présentent un spectre étalé. L'émission laser se caractérise par une faible largeur spectrale.

2.9. Relations de phase

Les lampes classiques émettent des rayonnements de longueur d'onde différentes et dont les phases sont toutes indépendantes les unes des autres.

Les lasers émettent des rayonnements de longueur d'onde identique, tous en phase et qui le caractérise sur toute leur trajectoire.

2.10. Addition de signaux

La figure 2 montre l'addition des signaux à fréquences identiques mais leurs phases sont différentes.

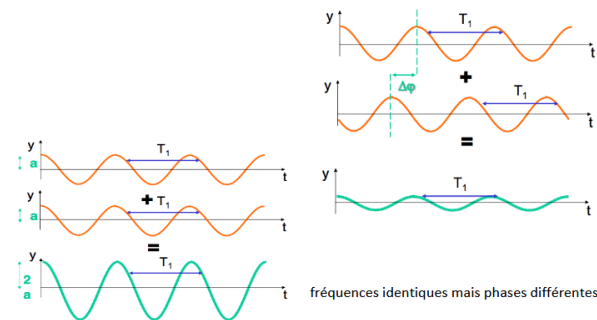


Figure 2. Addition de deux signaux de même fréquences mais de phases différentes.

3. Propriétés du laser

Le laser est une émission présentant à la fois **une cohérence spatiale** et **une cohérence temporelle** :

- Emission **monodirectionnelle**, de **faible divergence** et de **phase identique**
- Emission **monochromatique** avec une **largeur spectrale faible**.

Ces deux cohérences permettent une densité de puissance (débit de fluence) élevée.

3.1. Modèle atomique de Bohr

Un photon incident, dont l'énergie est suffisante ($h\nu \geq E_L - E_K$) pourra être absorbé, l'énergie perdue permettant le passage d'un électron de la couche K à la couche L (apport extérieur d'énergie). Le retour à l'équilibre (retour de l'électron sur la couche K), avec libération d'énergie sous $h\nu_2$ émission de photons peut se produire selon plusieurs modes :

- L'émission peut être spontanée : émission de photons de directions ou de phases quelconques.
- L'émission peut être stimulée : émission de photons en phase et dans une même direction

4. Historique

Le laser s'est peu à peu imposé dans notre vie sans que nous en soyons forcément conscients. Incontournable dans la fabrication d'objets aussi divers que les smartphones, les écrans LCD, les cellules photovoltaïques ou l'Airbus A380, il est tout aussi indispensable au fonctionnement d'Internet et joue un rôle crucial en médecine. En 2007, plus de 800 millions de lasers ont été fabriqués dans le monde.

La production du premier laser a nécessité des idées clés pour en arriver.

4.1. Première idée : Emission stimulée

Dans un article de 1917 intitulé « Zur Quanten theorie der Strahlung¹ », Albert Einstein donne une interprétation de la loi du rayonnement du corps noir de Planck. Pour résoudre ce problème, il décrit les échanges d'énergie entre matière et rayonnement par les processus connus à l'époque, c'est-à-dire l'émission spontanée et l'absorption. Mais ces processus ne suffisent pas, et il a l'idée lumineuse d'ajouter un nouveau processus : **l'émission stimulée**.

4.2. Deuxième idée : Inversion de population

Pour obtenir cette lumière cohérente, il faut exciter massivement les atomes. Il faut que dans un échantillon, la population d'atomes excités devienne supérieure à la population d'atomes non excités. On appelle cela « réaliser une **inversion de population** ». C'est la découverte du pompage optique, en 1950, par le physicien Alfred Kastler, qui donne une première méthode pour réaliser cette inversion de population. Le pompage optique permet d'exciter un grand nombre d'atomes, et ouvre ainsi la porte à la réalisation d'un rayonnement cohérent.

4.3. Troisième idée : La cavité Fabry-Perot

Dans son cahier de laboratoire et en Novembre 1957, Gourdon Gould intitule sa page : « Some rough calculations on the feasibility of the LASER : Light Amplification by

Stimulated Emission of Radiation. » Puis autour d'un schéma dont la figure 2 s'est inspirée, il écrit : « Conceive a tube terminated by optically flat partially reflecting mirrors». C'est le principe de la cavité Perot-Fabry : piéger la lumière selon une seule direction spatiale en lui faisant faire des allers-retours entre deux miroirs. On remarque aussi la première apparition de l'acronyme LASER.

On sait donc maintenant de quoi sera constitué un laser : d'une part, un milieu amplificateur qui génère le rayonnement par émission stimulée, et d'autre part, une cavité qui joue le rôle de « circuit » de réaction de l'oscillateur. Le laser, contrairement à ce que laisse entendre son nom, n'est donc pas simplement un amplificateur, mais bien un oscillateur du domaine optique. Ce principe est illustré par la figure 2. La cavité est un filtre à bande étroite qui assure la réinjection « en phase » vers l'entrée de l'amplificateur d'une partie du signal amplifié.

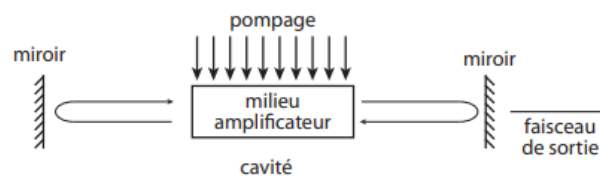


Figure 3. Représentation schématique d'un oscillateur du domaine optique

En février 1958, Arthur Schawlow, un ami de Charles Townes, travaillant aux Bell Labs, trouve lui aussi la solution. A. Schawlow et C. Townes ne réagissent pas comme des « inventeurs », mais comme des chercheurs : ils approfondissent leur idée, écrivent un article et le soumettent à Physical Review, la plus prestigieuse revue de physique de l'époque. Leur article est publié en décembre 1958. Intitulé « Infrared and optical masers », il a un impact considérable sur la communauté scientifique.

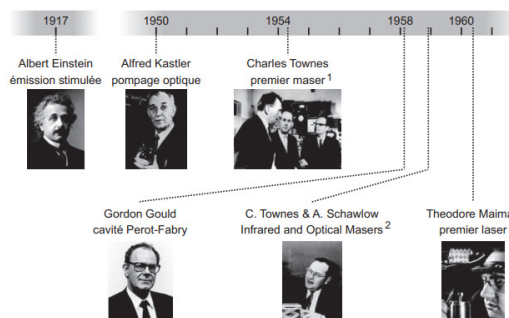


Figure 4. Principales étapes de l'histoire des lasers

Résumé sur les masers

A l'Institut de Physique Lebedev, à Moscou, Nikolay G. Basov et Aleksandr M. Prokhorov présentent publiquement le principe du maser dès 1952, lors d'une conférence organisée par l'Académie des Sciences, à Moscou. Leurs résultats théoriques furent publiés en septembre 1954, et ils réalisèrent leur premier maser en 1955. Maser est l'acronyme de Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, c'est-à-dire amplification d'un rayonnement micro-onde par émission stimulée

4.4. La course au laser

Dès la parution de l'article de C. Townes et A Schawlow, démarre ce qu'on appelle alors la course au laser. Il reste à trouver l'atome ou la molécule qui permettra d'obtenir un rayonnement cohérent dans le visible. Cette course dure près d'un an et demi. Finalement T. Maiman, chercheur aux Hughes Research Laboratories⁶, qui observe le premier faisceau laser, le 16 mai 1960. Theodore Maiman a l'expérience des masers, notamment ceux fonctionnant avec des rubis. Et c'est avec ces mêmes rubis qu'il réalise un petit laser qui tient dans la main. L'inversion de population est réalisée grâce à un petit flash d'appareil photo, et le laser émet un faisceau pulsé rouge. Pour un laboratoire privé, une telle « première » est importante, mais avant toute annonce publique, T. Maiman doit publier ces résultats. L'article est soumis en juin à Physical Review Letters, une toute nouvelle revue qui publie les articles les plus marquants soumis à Physical Review. L'éditeur de cette revue passe à côté de l'importance de cette découverte, et refuse de publier l'article. T. Maiman soumet alors un résumé de 300 mots à la revue Nature, qui l'accepte. Mais les Hughes Research Laboratories ne veulent plus attendre pour annoncer la découverte, et ils organisent une conférence de presse le 7 juillet, un mois avant la parution de l'article de Nature. La réalisation du premier laser fait la une du **New York Times**. Intitulé « Light Amplification claimed by Scientist », on y trouve notamment une soi-disant photo du laser de Maiman.

5. Interactions lumière – matière

5.1. Principe de fonctionnement du LASER

Pour mieux comprendre ce principe, on utilise les systèmes à 3 niveaux d'énergie: N_1 atomes occupent le niveau fondamental d'énergie E_1 , N_2 atomes occupent le niveau excité d'énergie E_2 . N_3 atomes occupent le niveau excité d'énergie E_3 .

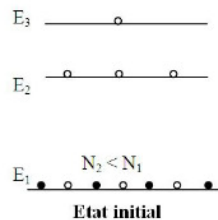


Figure 5. Système à trois niveaux d'énergie

5.1.1. Pompage

Les atomes éclairés par un «flash» sont excités en grand nombre par absorption et les électrons passent au niveau E_3 .

Donc le nombre N_3 supérieur le nombre N_1 (La transition $E_1 E_3$ doit être très absorbante).

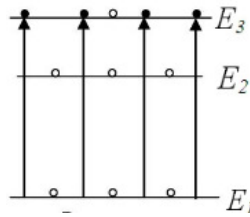


Figure 6. Pompage

5.1.2. Inversion de population

Les atomes se désexcitent rapidement du niveau E_3 au niveau E_2 qui est métastable (durée de séjour sur E_2 relativement longue). Le niveau E_2 se peuple donc au détriment du niveau E_1 qui se dépeuple (les atomes ont été « pompés » de E_1 vers E_3).

Inversion de population est une transition non radiative.

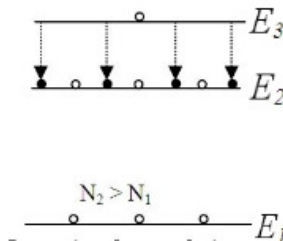


Figure 7. Inversion de population

5.1.3. Emission stimulée

Des photons d'énergie $h\nu_{1,2}$ produits par désexcitation spontanée d' E_2 à E_1 interagissent avec des atomes excités au niveau E_2 : Il en résulte une émission stimulée (induite) de photons d'énergie $h\nu_{1,2}$ qui vont à leur tour produire une émission stimulée de photons.

Remarque: Le système à 3 niveaux exige que plus de la moitié des atomes du niveau fondamental soit pompée.

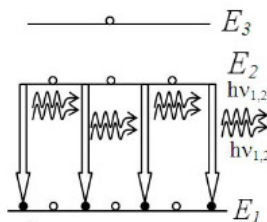


Figure 8. Inversion de population

La figure 9 résume les trois étapes nécessaires pour la production du laser à partir d'un système à trois niveaux.

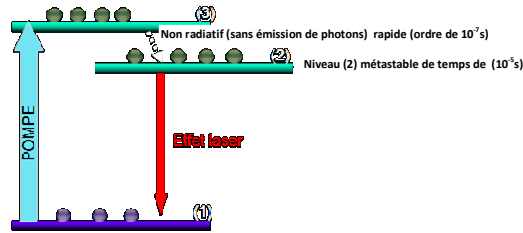


Figure 9 Production du laser à partir d'un système à trois niveaux.

Il existe des mécanismes qui permettent des transitions non radiatives (sans rayonnement), c'est-à-dire des transitions n'impliquant pas de lumière. L'excès d'énergie est ensuite dissipé d'une autre manière : dans la plupart des cas, sous la forme de **phonons**, qui sont associés aux vibrations du réseau d'un solide. Dans les liquides, des phénomènes similaires peuvent se produire, mais rarement dans les gaz, où les atomes ou les molécules ne sont pas en contact avec les autres la plupart du temps et ont donc à peine une chance de dissiper l'énergie d'excitation de manière non radiative.

Les transitions non radiatives sont essentielles pour le fonctionnement de nombreux supports de gain laser à semi-conducteurs: elles facilitent souvent la population du niveau laser supérieur, si le pompage se produit à un niveau plus élevé, et elles aident aussi souvent à dépeupler le niveau laser inférieur et ainsi éviter les pertes de réabsorption.

Définition : Un phonon désigne un quantum d'énergie de vibration dans un solide cristallin : lorsqu'un mode de vibration du cristal de fréquence définie ν cède ou gagne de l'énergie, il ne peut le faire que par paquets d'énergie $h\nu$, h étant la constante de Plank.

Il existe aussi un système à 4 niveaux permettant de produire le laser il est montré dans la figure 10.

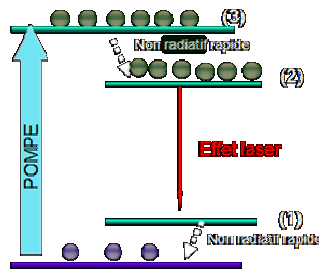


Figure 10. Système à 4 niveaux

L'intérêt majeur du système à 4 niveaux par rapport à celui à 3 niveaux est qu'il n'existe pas de seuil de pompage dans un 4 niveaux, contrairement à un 3 niveaux. En gros, dans un 3 niveaux, il va falloir pomper suffisamment fort pour induire une inversion de population suffisante, qui est "détruite" lors de l'émission stimulée. L'inversion de population et l'émission stimulée sont en compétition directe.

Dans un 4 niveaux, ce n'est plus le cas, et le moindre apport d'énergie au milieu amplificateur provoque une inversion de population suffisante pour que le laser fonctionne.

6. Condition d'amplification dans le laser

Soit un système à trois niveaux de la figure 11.

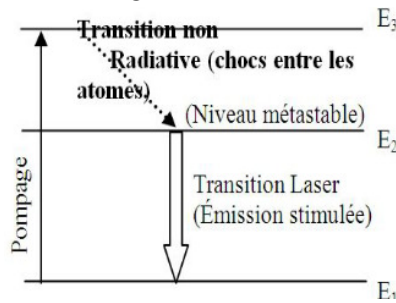


Figure 11 Système à trois niveaux

- ✓ Le nombre de photons absorbés est proportionnel à N_1 soit $K_1 \cdot N_1$ (K_1 constante d'absorption)
- ✓ Énergie absorbée par les atomes est $E_a = K_1 \cdot N_1 \cdot h\nu_{1,2}$
- ✓ Nombre de photons émis (stimulation et désexcitation) est proportionnel à N_2 soit $K_2 \cdot N_2$ (K_2 constante d'émission)
- ✓ Énergie émise par les atomes est $E_e = K_2 \cdot N_2 \cdot h\nu_{1,2}$ (K_2 constante d'émission)
- ✓ Énergie échangée entre rayonnement et atomes: $\Delta E = K_2 \cdot N_2 \cdot h\nu_{1,2} - K_1 \cdot N_1 \cdot h\nu_{1,2}$ avec $K_1 \approx K_2 = K$, l'énergie échangée $\Delta E = K \cdot h\nu_{1,2} \cdot (N_2 - N_1)$ où: $\nu = c/\lambda$.
- ✓ A la température ambiante $N_2 \approx 0$ et N_1 maximal donc $\Delta E < 0$. Par conséquent, le rayonnement s'affaiblit. La quasi-totalité des atomes occupant le niveau fondamental, Un photon incident a plus de chance d'être absorbé que de provoquer une émission stimulée.
- ✓ Température élevée $N_2 \approx N_1$ donc $\Delta E = 0$: Rayonnement constant. Le niveau excité devient aussi peuplé que le niveau fondamental. L'émission stimulée compense l'absorption mais cela n'est pas suffisant.
- ✓ Si $N_2 > N_1$ alors $\Delta E > 0$: Le rayonnement gagne de l'énergie. Il y a plus d'atomes sur le niveau excité que sur le niveau fondamental, l'émission stimulée dépasse alors l'absorption.

Conclusion

Pour amplifier le rayonnement il faut créer **une inversion de population** (nombre d'électrons à l'état excité $N_2 > N_1$ nombre d'électrons à l'état fondamental) qui est obtenue par «pompage» optique.

Exemple de laser rubis

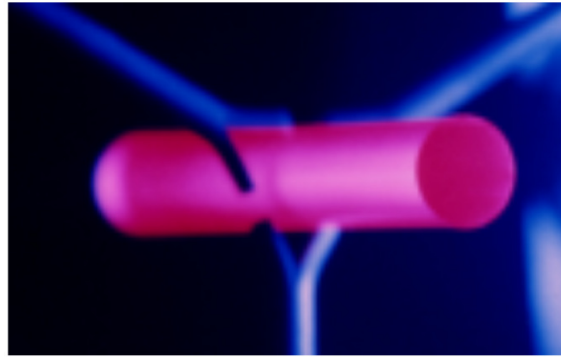


Figure 12 La lumière d'une lampe ultraviolette excite les atomes de chrome du rubis qui re-émet une lumière rouge à 6943 Å.

Le rubis présente deux bandes d'absorption dans le bleu et le vert favorables au "pompage optique" et une bande dans l'ultra-violet. La figure 13 montre le spectre d'absorption du rubis.

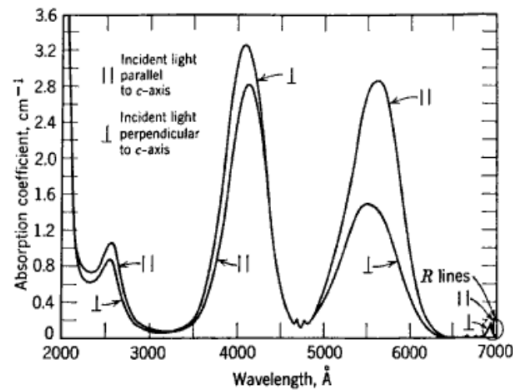


Figure 13 Spectre d'absorption du rubis.

La figure 14 montre les niveaux quantiques principaux du rubis.

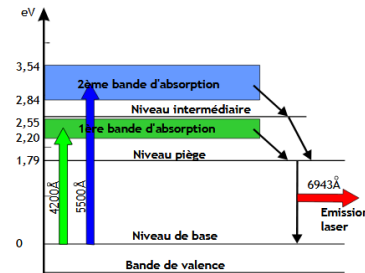


Figure 15 Niveaux quantiques principaux du rubis.

Dans la figure 16 montre les différentes étapes de la production du laser sont montrées : pompage optique, inversion de population et émission stimulée.

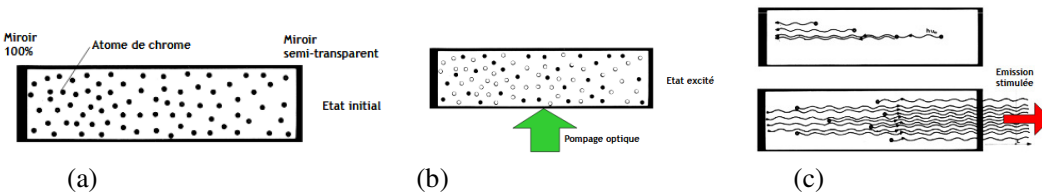


Figure 16 Emission stimulée dans un Crystal laser par pompage optique.
 (a) Etat initial (b) Etat Excité (c) Emission stimulée

En plusieurs allers-retours entre les deux miroirs, une sélection de direction et de longueur d'onde s'opère. Seuls les **photons alignés selon l'axe** et **monochromatiques** vont rester dans la cavité. Quand le signal est suffisamment intense, le miroir de sortie laisse passer le faisceau.

La divergence du faisceau et le coefficient d'amplification dépendent du nombre d'allers-retour dans la cavité optique avant ouverture du miroir.

Durée d'impulsion: 10^{-3} à 10^{-15} s.

L'émission peut être:

Emission continue

Usage de système 4 niveau appelé aussi laser à 4 niveaux qui est caractérisé par :

- ✓ Emission continue d'une durée de 1s
- ✓ puissance de l'émission: $P=100$ watts

Emission pulsée

Usage de système 4 niveau appelé aussi laser à 4 niveaux qui est caractérisé par :

- ✓ Emission pulsée de fréquence $F_r = 5$ Hz
- ✓ Puissance considérée = puissance moyenne: $P_m = P_c \times t \times F_r$.

Avec P_c étant la puissance de la crête et aussi la puissance d'une impulsion.

Pour une même énergie délivrée, plus **l'impulsion est brève, plus la puissance est considérable** d'où l'intérêt considérable des lasers femtoseconde (1 femtoseconde = $1 \text{ fs} = 10^{-15}$ seconde).

7. Different types of lasers

7.1. Laser solide

La puissance des lasers solides peut être considérable mais leur faisceau n'est pas rigoureusement monochromatique (cohérence médiocre) et leur rendement faible.

Exemple : Laser à rubis

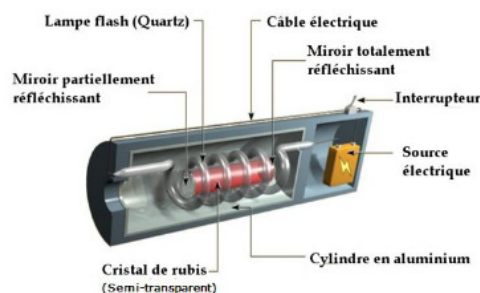


Figure 17. Laser rubis

La cavité est constituée du cristal cylindrique constitué d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 dopé avec 0,05% d'ions chrome Cr^{+3} constituant le milieu actif.

*L'excitation est produite par un tube au néon, alimenté par une haute tension, qui s'enroule en hélice autour du cristal.

*Elle fait passer les ions Cr^{+3} du niveau fondamental E au niveau excité E" (absorption dans le vert). Le retour spontané du niveau E" au niveau E n'a pas lieu.

*Les ions passent rapidement du niveau E" à un niveau E' sans émission de rayonnement (échange d'énergie par chocs entre les atomes). Le niveau E' a une durée de vie assez longue (1ms au lieu de 10ns). Un grand nombre d'ions Cr^{+3} se retrouvent dans ce niveau: il y a une inversion de population.

7.2. Lasers à liquides

L'utilisation de colorants organiques (xanthène, coumarine...) permet d'obtenir une émission de fréquence variable en utilisant un réseau de diffraction.

7.3. Lasers à semi-conducteurs

Les diodes lasers permettent d'obtenir des sources peu intenses, mais miniaturisées. Le rôle des miroirs semi-réfléchissants est dévolu à l'air ambiant.

7.4. Lasers à gaz

IL en existe trois types :

7.4.1. Gaz atomique

Exemple : Laser Hélium-Néon (He-Ne) fonctionnant une longueur d'onde de $\lambda = 632 \text{ nm}$ qui est le rouge

Le mélange gazeux est à basse pression (environ $1/1000^{\text{ème}}$ pression atmosphérique). Le pompage (excitation) est produit par une décharge électrique qui porte les atomes He dans l'un ou l'autre de ses deux premiers niveaux excités qui sont métastables.

La figure 18 montre les différentes étapes du laser He-Ne.

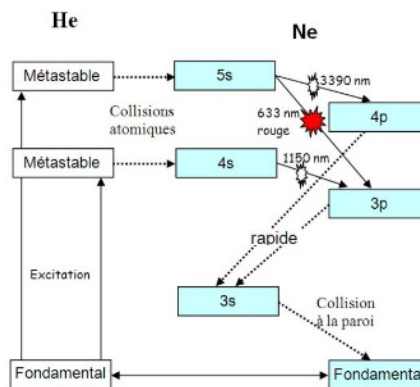


Figure 18 Différentes étapes du laser He-Ne.

Les collisions entre l'hélium métastable et le néon dans son état fondamental apportent de l'énergie aux atomes de Néon peuplant ainsi le niveau excité 5s à longue durée de vie. Il en résulte une inversion de population pour les atomes de Néon.

L'émission stimulée se fait entre le niveau 5s et le niveau 3p du Néon. Finalement les atomes

Ne reviennent au niveau fondamental par désexcitation non radiative.

7.4.2. Gaz ionisé

Exemple: Laser Argon Ion (Ar^+) fonctionnant des longueurs d'onde allant de 480nm à 500nm qui est bleu-vert

7.4.3. Gaz moléculaire

Exemples : Laser Gaz Carbonique (CO_2) fonctionnant une longueur d'onde de 10600 nm en IR.