

LP Laser : principe et applications

Rebecca Fromentin

Avril 2021

Table des matières

1	Biblio	1
2	Plan	1
2.1	Intro	1
2.2	Création d'une lumière LASER	2
2.2.1	Caractéristiques de la lumière LASER	2
2.2.2	Milieu amplificateur : amplification de la lumière	2
2.2.3	Cavité : résonnateur optique	3
2.2.4	Fonctionnement du laser	3
2.3	Principales applications	3
2.3.1	Lecture de CD, DVD et Blu-Ray	4
2.3.2	Télémétrie laser	4
2.4	Ccl	4
3	Manip possible	4
4	Animation	4
5	Remarques/astuces de PiJa	4

1 Biblio

- Les lasers, Dangoisse
- J'intègre PC-PC*, Dunod
- http://www-lpl.univ-paris13.fr/pon/lumen/documents/Cours_complet.pdf
- X-ENS PC A 2015 sur la télémétrie LASER (je ne m'en suis pas servi mais ça pourra peut-être vous être utile)

2 Plan

Niveau : L3

PR : Modèle d'Einstein de l'interaction lumière-matière, quantification de l'énergie, inégalité de Heisenberg temps-énergie et élargissement spectral, distribution de Maxwell-Boltzmann, loi de Planck, états dégénérés, section efficace, interférences

2.1 Intro

Le LASER est partout dans notre vie quotidienne : codes-barres, chirurgie esthétique, lecture de CD/DVD/Blu-Ray, télémétrie ...

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, présentation rapide avec schéma des principaux constituants du LASER

Très court historique : ordre chronologique de l'invention de chacun des constituants, théorisation du LASER par Schawlow et Townes puis mise en pratique en 1960 par Maiman

2.2 Création d'une lumière LASER

Animation Tout est quantique

Rappels des processus d'interaction lumière-matière sur diapo (absorption, émissions stimulée et spontanée, coefficients d'Einstein associés ainsi que des taux de transitions pour émissions stimulée et spontanée, relations entre ces coefficients)

2.2.1 Caractéristiques de la lumière LASER

Milieu atomique en interaction avec un champ em. On ne va considérer que les niveaux atomiques responsables de la transition LASER.

On va chercher à obtenir un rayonnement puissant et cohérent, on va donc pour cela amplifier le rayonnement à l'aide d'une cavité et d'un milieu amplificateur, ce rayonnement provenant d'une émission stimulée réalisée à l'aide d'un pompage.

2.2.2 Milieu amplificateur : amplification de la lumière

On considère un milieu à élargissement spectral homogène

Equations de populations pour un système à 2 niveaux : $n = n_1 + n_2$ où n_i sont des densités volumiques de population

$$\frac{dn_2}{dt} = -(A_{21} + W_{21})n_2 + W_{12}n_1$$

$$\frac{dn_1}{dt} = (A_{21} + W_{21})n_2 - W_{12}n_1$$

où les W sont les taux de transitions (en s^{-1}) associés aux coefficients d'Einstein B

On fait un bilan de puissance sur un cylindre du milieu amplificateur (en considérant que l'émission spontanée est négligeable car émission isotrope)

ATTENTION : j'ai totalement passé sous silence le fait que l'émission spontanée est importante pour lancer le laser, ce qui n'est pas évident quand on la néglige si brutalement ... A garder dans un coin de sa tête ou à mentionner, idk

On obtient :

$$\frac{1}{I} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial z} \right) = \sigma(n_2 - n_1) \text{ où } \sigma \text{ est la section efficace}$$

On définit le coefficient d'amplification α en m^{-1} (qui est aussi le gain linéique) : terme de gauche de l'équation, et la différence de population Δn

On veut amplification donc $\alpha > 0$ d'où nécessité d'inversion de population

Résoudre le système d'équations en régime stationnaire pour le système à 2 niveaux pour obtenir une équation sur Δn : on met en évidence qu'on ne peut pas inverser un système à 2 niveaux ! (on peut aussi tracer n_1 et n_2 en fonction de I pour le montrer)

De plus, pour les systèmes qu'on peut inverser, condition d'amplification non réalisée à l'équilibre thermique (avec ordg de transitions énergétiques à comparer à l'énergie d'agitation thermique) : il va donc falloir pomper le milieu pour amener plus d'atomes sur 2 que sur 1

Ex du Laser Nd :YAG : calcul des équations de populations pour un système à 4 niveaux (sur slide) et on balance l'équation avec la différence de population obtenue en résolvant le système en régime stationnaire :

$$\Delta n = \frac{W_p \frac{N_0}{A} (1 - \frac{A}{\Gamma_1})}{1 + \frac{W}{A}}$$

Inversion de population réalisée si $\Gamma_1 > A$, ce qui est réalisé par hypothèse (transitions non radiatives rapides)

On définit Δn^0 la différence de population non saturée et α^0 le coefficient d'amplification non saturé tels que :

$$\frac{\Delta n}{\Delta n^0} = \frac{\alpha}{\alpha^0} = \frac{1}{1 + \frac{I}{I_s}}$$

On met en évidence le phénomène de saturation : Δn^0 et α^0 sont les valeurs max qu'on peut avoir

On définit le gain $G = \frac{I(l)}{I(0)}$ où l est la longueur du milieu amplificateur (MA) : on regarde l'intensité après et avant le MA et on veut que G soit positif.

Avec le bilan d'énergie sur le cylindre en régime stationnaire, on voit que α est proportionnel à la différence de population et que G évolue comme une exponentielle de la différence de population.

2.2.3 Cavity : résonateur optique

On veut que la cavité soit stable, ie qu'elle confine le rayonnement laser proche de l'axe optique.

On cherche les modes pouvant se propager : ce sont ceux qui se retrouvent en phase avec eux-mêmes comme un tour de la cavité (j'ai pris une cavité en anneau) : $\nu_p = \frac{pc}{d}$, p entier naturel, où d taille de la cavité

On pourrait tracer la répartition des modes qui peuvent se propager en fonction de la fréquence (peigne) pour que le schéma final avec le gain et les modes soit amené plus doucement plutôt que de tout balancer direct

Cependant cette cavité apporte des pertes : au niveau des miroirs surtout (en particulier celui qui transmet le rayon laser). On peut définir un coefficient de pertes α_p évalué pour le MA inactif et par unité de longueur du MA.

2.2.4 Fonctionnement du laser

Maintenant qu'on a étudié tous les éléments, mettons tout ça ensemble

Intensité après un tour de cavité : $I(d) = I(0) G e^{-\alpha_p l}$ où interviennent le gain du MA et les pertes de la cavité

Il faut donc $G > e^{\alpha_p l}$ pour avoir $I(d) > I(0)$: amorçage du laser (sinon tous les photons partent dans les pertes)

Ensuite en régime permanent : ajustement du gain pour compenser les pertes $G = e^{\alpha_p l}$ (car I augmente quand l'oscillation a démarré mais en parallèle G diminue car la différence de population également : saturation)

Courbes bilan (cf diapo)

Tr : Maintenant que le principe de fonctionnement du laser a été expliqué, voyons comment il a été exploité pour développer des instruments utiles au plus grand nombre mais également aux scientifiques et industriels.

2.3 Principales applications

Principales définitions concernant les faisceaux gaussiens (waist, longueur de Rayleigh, divergence) permettant de caractériser la lumière LASER. Modification d'un tel faisceau à travers une lentille et un doublet

afocal (utiles pour les applications que j'ai choisies)

Vite fait et sur slide

2.3.1 Lecture de CD, DVD et Blu-Ray

Codage binaire tel que 0 est "plat" (trou ou plateau) et 1 est un changement de relief (passage d'un trou à un plateau et vice-versa)

Un détecteur repère ces changements de relief en étudiant la réflexion d'un rayon laser : la taille des trous est choisie de sorte à avoir interférences destructives entre le rayon incident et réfléchi quand le rayon passe dans un trou, le détecteur peut donc repérer les variations d'intensité.

On cherche un rayonnement de plus faible longueur d'onde possible car longueur d'onde proportionnelle à la largeur du faisceau gaussien en sortie d'une lentille : on cherche à augmenter la capacité de stockage sur une même surface de disque.

2.3.2 Télémétrie laser

Exemple d'application du laser Nd-YAG mais en régime impulsif cette fois

Mesure de la distance Terre-Lune par temps de vol

Problèmes d'élargissement des faisceaux gaussiens : diamètre du faisceau en sortie du télescope de l'ordre de 10 mm qui arrive sur la Lune avec un diamètre de 150 km ! Or les récepteurs sur la Lune ont une taille de l'ordre du mètre, ce qui fait qu'il y a beaucoup de photons perdus (et rebelote pour le retour) ...

Utilisation de doublet afocal pour diminuer ce problème, mais toujours très peu de photons reçus : il faut regarder sur beaucoup d'impulsions pour en déduire la distance T-L

2.4 Ccl

J'ai traité ici du fonctionnement continu du laser, cependant on utilise également des lasers impulsifs (cf télémétrie). Il y a notamment des recherches pour créer de plus en plus courtes impulsions.

3 Manip possible

Laser en kit : je ne l'ai pas présenté et PiJa m'a dit que ça ne l'avait pas dérangé du tout qu'il n'y ait pas de manip. De toute façon je n'aurais pas trop su quoi en dire à part "voilà ça ressemble à ça un laser" ...

4 Animation

Fonctionnement vulgarisé : <https://toutestquantique.fr/laser/>

5 Remarques/astuces de PiJa

- C'était bien d'avoir choisi une cavité en anneau et pas une cavité linéaire : y a pas de soucis de 2 passages dans le MA pour un aller-retour dans la cavité etc ...
- J'ai considéré un MA à élargissement spectral homogène : cela va avoir tendance à abaisser la courbe de gain et donc il y aura au maximum 1 voire 2 modes qui vont pouvoir laser, contrairement au schéma que j'avais choisi dans mno diapo : il faudra en trouver un autre qui vérifie cette condition !
- J'ai ici traité d'applications beaucoup en lien avec les faisceaux gaussiens : il faut donc être calé dessus. Si on veut éviter cette notion, on peut parler de refroidissement Doppler, de spectroscopie ou d'absorption saturée

- J'étais short en temps à la fin pour les applications : libérer du temps sur l'explication du MA, par contre garder la présentation de la cavité et du fonctionnement complet comme ça (il y a déjà le strict minimum d'après PiJa)