

TP 1 Optique Anisotrope : Le Laser

Boris Alexandre Baudel - Master I Physique - Université du Maine

Decembre 2023

Introduction

Dans un monde où la technologie évolue rapidement, les lasers jouent un rôle important dans divers domaines, allant de la médecine à la communication. Ce travail pratique offre une immersion dans le fonctionnement des lasers, en particulier le laser YAG. Nous explorerons les principes fondamentaux de l'optique et du fonctionnement des lasers, en mettant l'accent sur la compréhension théorique et l'expérience pratique des caractéristiques uniques de ces dispositifs lumineux pour en finale en aboutir à sa fabrication.

Principe de base

Pour expliquer la plupart des interactions de la lumière avec la matière, une description quantique est nécessaire. Dans ce cadre, une onde lumineuse de fréquence ν (de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = \frac{c_0}{\nu}$) est composée de particules appelées photons. Chaque photon transporte une quantité d'énergie définie par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc_0}{\lambda_0} \quad (1)$$

où h représente la constante de Planck dont la valeur est :

$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s} \quad (2)$$

L'intensité d'un rayonnement lumineux est proportionnelle au nombre de photons qui le compose.

Transitions Électroniques

L'émission et l'absorption de lumière par la matière résultent de transitions entre les niveaux d'énergie électroniques des atomes ou des ions. Si E_1 et E_2 (avec $E_2 > E_1$) sont les énergies de deux niveaux atomiques 1 et 2, la fréquence ν du photon émis lors de la transition $2 \rightarrow 1$ est donnée par la relation :

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (3)$$

Population des Niveaux à l'Équilibre Thermique

En physique statistique, à l'équilibre thermique (atomes en contact avec une source à la température absolue T), le rapport des populations N_1 et N_2 d'atomes dans des états d'énergie E_1 et E_2 est lié à l'écart énergétique $E_2 - E_1$ par la relation :

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right) \quad (4)$$

où k_B est la constante de Boltzmann :

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1} \quad (5)$$

Comme $T > 0$ et $E_2 > E_1$, on a $N_2 < N_1$: les niveaux les plus énergétiques sont donc les moins peuplés. Dans les conditions considérées ici (transitions induites par de la lumière visible, à température ambiante), seul le niveau de plus basse énergie, appelé niveau fondamental, est peuplé (les autres niveaux sont dits excités).

Processus de Transition

Il existe trois types de transitions entre deux niveaux atomiques :

1. **Émission Spontanée** ($2 \rightarrow 1$) : Un atome excité d'énergie E_2 cède spontanément l'énergie $E_2 - E_1$ sous forme d'un photon. Ce processus a un caractère aléatoire marqué et est prépondérant dans les sources classiques.
2. **Absorption Induite** ($1 \rightarrow 2$) : Se produit lorsqu'une onde électromagnétique de fréquence $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ traverse un matériau, entraînant une absorption d'énergie et le passage des atomes du niveau 1 au niveau 2.
3. **Émission Induite** ($2 \rightarrow 1$) : Inverse de l'absorption induite, correspond à l'émission d'une onde stimulée ou induite par l'onde incidente de même fréquence. C'est le principe fondamental des lasers.

Temps de Vie

Si un milieu comporte N_2 atomes dans l'état 2 à l'instant t et $N_1 = N - N_2$ atomes dans l'état 1, alors la variation de N_2 pendant un intervalle de temps dt est définie par :

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 \quad (6)$$

où A_{21} est une constante caractéristique de la transition. Par intégration, on obtient :

$$N_2(t) = N_2(0) \exp(-A_{21}t) \quad (7)$$

Cette relation peut aussi s'écrire sous la forme :

$$N_2(t) = N_2(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (8)$$

où $\tau = \frac{1}{A_{21}}$ est le temps de vie du niveau 2. L'intensité lumineuse $I_L(t)$ est proportionnelle au nombre d'atomes quittant l'état E_2 par unité de temps, d'où :

$$I_L(t) = I_L(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (9)$$

Inversion de Population/Amplification Optique

Les évolutions des populations résultant des processus d'absorption induite et d'émission induite sont données par des relations similaires, avec des constantes caractéristiques spécifiques.

Constitution d'un Laser

Un laser est un oscillateur optique, composé d'un amplificateur optique (milieu actif amplifié par pompage) et d'une cavité optique résonnante, généralement formée de deux miroirs, dont l'un est légèrement transparent pour laisser sortir une partie du faisceau. Pour expliquer l'évolution des populations au cours du temps, et donc celle de l'intensité émise par un laser, il est nécessaire de considérer les trois processus de transition simultanément. Il apparaîtrait alors qu'il est possible d'obtenir un rayonnement plus intense que le rayonnement incident en favorisant l'émission stimulée. Ceci est possible si la population du niveau E_2 (niveau de plus haute énergie) devient supérieure à celle du niveau E_1 . Cette situation, appelée inversion de population, ne correspond pas à l'équilibre thermodynamique.

Systèmes à Trois et Quatre Niveaux

L'inversion de population n'est pas réalisable avec un système à deux niveaux, mais elle est possible avec des systèmes à trois ou quatre niveaux. Par exemple, pour des ions néodyme Nd^{3+} dans un cristal de YAG, un faisceau de pompage induit des transitions de l'état fondamental E_1 vers l'état excité E_4 . Cet état se désexcite rapidement vers l'état E_3 , qui devient plus peuplé que l'état E_2 vide, permettant ainsi l'amplification d'un rayonnement d'énergie $E_3 - E_2$.

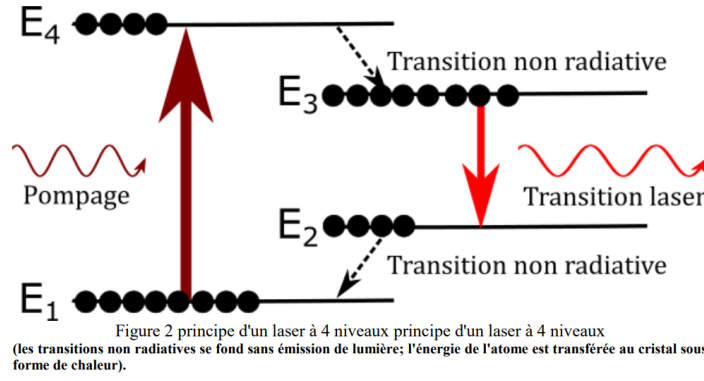


Figure 1: Principe d'un laser à quatre niveaux.

Complexité des Niveaux d'Énergie et Spectres d'Absorption

Les niveaux d'énergie des ions Nd^{3+} dans le YAG sont plus complexes, avec des états fondamentaux E_1 et excités E_4 multiples. Le spectre d'absorption se compose donc de plusieurs raies situées à des longueurs d'onde spécifiques, et de même pour les bandes d'émission.

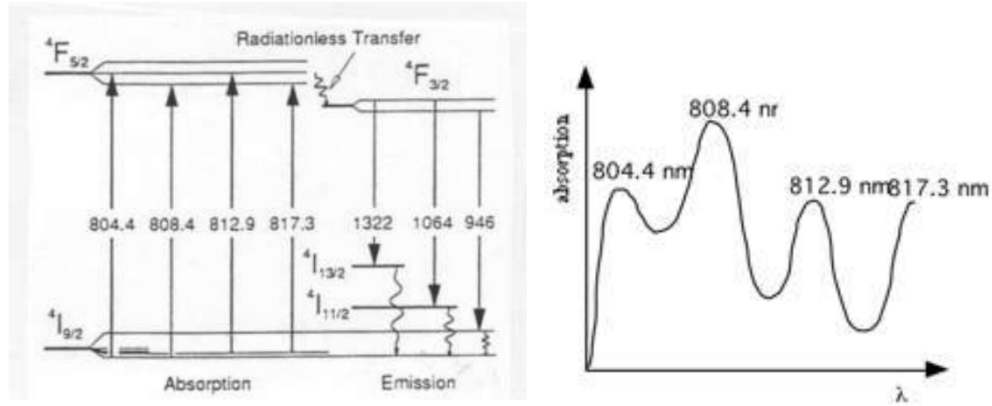


Figure 2: Niveaux d'énergie réels du néodyme dans le YAG et Spectre d'absorption du YAG:Nd

Équations Générales des Oscillateurs

Le fonctionnement du laser peut être décrit par les équations générales des oscillateurs. Si e désigne le signal d'entrée, s le signal de sortie et G le gain global (gain réel + pertes), alors :

$$s = Ge \quad (10)$$

Si as représente le signal réinjecté à l'entrée, on a :

$$e = e_0 + as \quad (11)$$

D'où :

$$s = \frac{G}{1 - aG} e_0 \quad (12)$$

L'oscillation disparaît si le gain devient trop faible. L'oscillation est possible si $(1 - aG) \rightarrow 0$, permettant un signal de sortie en l'absence de signal d'entrée.

Puissance de Sortie d'un Laser

La puissance de sortie d'un laser suit l'expression :

$$P_{\text{sortie}} = \alpha_s (P_{\text{pompe}} - P_{\text{seuil}}) \quad (13)$$

où P_{pompe} est la puissance de pompe, α_s est la pente d'efficacité, et P_{seuil} est la puissance de seuil minimale nécessaire pour l'émission laser.

Cavité Résonante : Critère de Stabilité

Pour les miroirs (plans ou sphériques) de la cavité, il est nécessaire que les rayons lumineux proches de l'axe soient réfléchis de nombreuses fois sans trop s'écarter de cet axe. La distance L entre les miroirs et les rayons de courbure R_1 et R_2 de ceux-ci doivent satisfaire certaines inégalités, constituant le critère de stabilité de la cavité.

Manipulation

Le banc d'optique pour les expériences laser est constitué de sept modules principaux, détaillés ci-dessous :

Module A : Diode Laser

La diode laser (DL) sert au pompage, avec une puissance allant jusqu'à 500 mW et une longueur d'onde entre 801 nm et 817 nm. Elle est équipée d'un dispositif de refroidissement à effet Peltier (température de 9°C à 43°C) et d'une photodiode pour la régulation de la puissance lumineuse.

Module B : Collimateur

Le module B contient un collimateur, un ensemble de lentilles avec une distance focale équivalente de 6 mm.

Module C : Système de Focalisation

Ce module intègre une lentille de focalisation avec une distance focale de 50 mm.

Module D : Barreau Laser de YAG:Nd

Le barreau laser de YAG:Nd a une longueur et un diamètre de 5 mm. La face d'entrée est hautement réfléchissante pour la radiation à 1064 nm (miroir plan), transmettant 80% du rayonnement de la DL. L'autre face est dotée d'une couche antireflets pour la même radiation.

Module E : Miroir de Sortie

Le miroir de sortie est sphérique avec un rayon de courbure de 100 mm et un coefficient de transmission de 2% (R100-2).

Module F : Filtre Optique

Ce module supporte un filtre optique (RG1000) absorbant la radiation de pompage et transmettant la radiation à 1064 nm.

Module G : Photodétecteur

Ce module comprend un photodétecteur et un disque de centrage amovible.

Unité de Contrôle

L'unité de contrôle alimente la DL, règle sa température et amplifie le signal du photodétecteur. Le gain de l'amplificateur est réglable de 1 à 100. La DL peut fonctionner en mode continu, en impulsions pilotées par l'unité de contrôle ou pilotées extérieurement. Les expériences seront réalisées en mode de régulation de courant (UNSTAB).

Détermination des caractéristiques de la DL

1. Installer le module A sur le banc d'optique.
2. Positionner le potentiomètre de réglage du courant d'injection à la valeur minimale et celui de température à mi-course.
3. Mettre sous tension et fixer la température à 20°C.
4. Augmenter progressivement le courant d'injection.

5. Utiliser l'écran de conversion IR-visible pour visualiser le faisceau laser à faible puissance.

Questions :

- Quel est le courant de seuil de la diode laser (DL)?
- Mesurer la puissance de la DL en fonction du courant d'injection et effectuer une régression linéaire pour déterminer les caractéristiques du courant seuil. Comparer avec la courbe fournie par le constructeur.

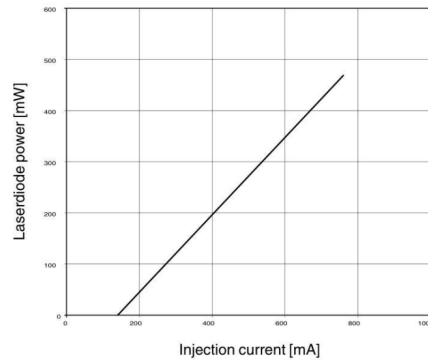


Figure 3: Courbe de gain de la diode laser utilisée en pompage.

Installation et Réglage du Collimateur (Module B)

1. Installer le collimateur sur le banc.
2. Régler le système pour obtenir un faisceau collimaté et centré, en utilisant le disque de centrage sur le module G.

Question : Pourquoi est-il nécessaire d'utiliser un collimateur?

Installation et Réglage du Module de Focalisation (Module C)

1. Placer le module de focalisation à environ 8 cm du collimateur.
2. Déterminer la position du point de focalisation en utilisant la puissance minimale permettant de voir le faisceau.
3. Positionner le barreau laser YAG:Nd en ce point.

Question : Quel est le rôle du module de focalisation?

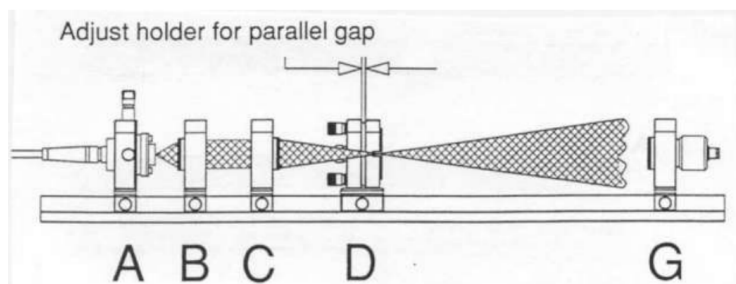


Figure 4: Placement du barreau laser YAG:Nd.

Mesure du temps de vie $4F_{3/2}$ de Nd^{3+} dans le YAG

Le niveau de départ d'émission de la radiation à 1064 nm est le niveau $4F_{3/2}$ (notation des spectroscopistes). La durée de vie τ de ce niveau est suffisamment longue pour permettre la réalisation de l'effet laser. La durée de vie peut être mesurée à partir de l'évolution de l'intensité du signal d'émission spontanée (signal de luminescence) selon la relation :

$$I_L(\tau) = \frac{I_L(0)}{e} = 0.37 \times I_L(0). \quad (14)$$

Cette mesure est facilitée par l'excitation du YAG:Nd avec des impulsions et la visualisation du signal de luminescence à l'oscilloscope.

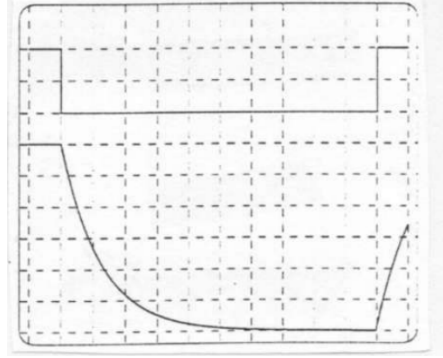


Figure 5: Impulsion de pompage (courbe supérieure) et signal de luminescence induit (courbe inférieure).

*Montage Expérimental pour la Mesure du Temps de Vie Le montage expérimental (Figure 9) implique l'interposition d'un filtre entre le YAG:Nd et le photodétecteur pour éliminer les résidus du faisceau de pompage. Les voies A et B de l'oscilloscope sont connectées respectivement aux sorties CURRENT et PHOTODIODE. La tâche est de déterminer la valeur de τ .

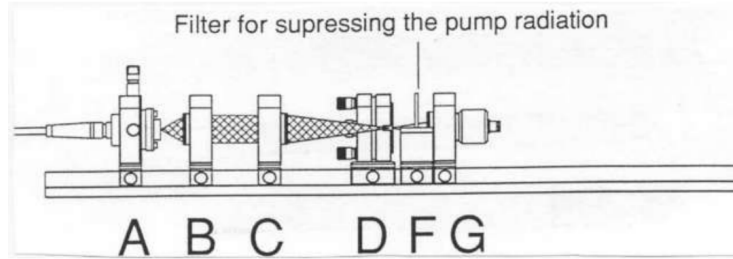


Figure 6: Montage permettant de mesurer le temps de vie du niveau utilisé pour obtenir l'émission laser.

Si la cavité est bien accordée (c'est peu probable), vous devriez détecter le faisceau laser à 1064 nm (celui-ci ne peut être visualisé qu'avec l'écran de conversion IR-visible). Pour régler la cavité, on visualisera à l'oscilloscope, en mode AC et sur la gamme la plus sensible, le signal issu du photodétecteur (excité par la fluorescence). En agissant sur les vis de réglage des modules D et E, on doit observer sur l'oscilloscope le "flash" témoignant de "l'accrochage" d'une impulsion laser. Optimiser puis passer alors en mode DC et régler pour obtenir le maximum d'intensité (agir sur l'orientation du cristal, du miroir de sortie et sur la position du cristal par rapport au point de focalisation).

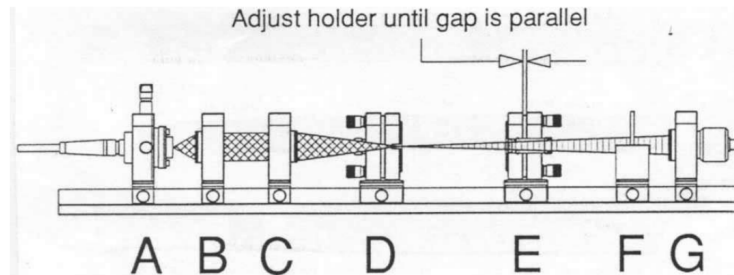


Figure 7: Montage permettant de mesurer le temps de vie du niveau utilisé pour obtenir l'émission laser.

Réalisation du laser YAG

1. Installer le module A sur le banc d'optique.
2. Positionner le potentiomètre de réglage du courant d'injection à la valeur minimale et celui de température à mi-course.
3. Mettre sous tension et fixer la température à 20°C.
4. Augmenter progressivement le courant d'injection.
5. Utiliser l'écran de conversion IR-visible pour visualiser le faisceau laser à faible puissance.

Questions :

- Quel est le courant de seuil de la diode laser (DL)?
- Mesurer la puissance de la DL en fonction du courant d'injection et effectuer une régression linéaire pour déterminer les caractéristiques du courant seuil. Comparer avec la courbe fournie par le constructeur.

Le courant de seuil de la DL est de 140 mA. Dans la figure 6 c'est plutôt à 180mA. La pente dans la figure 6 est de 1,6 W/mA. Dans notre courbe elle est plutôt à 1,9 mW/mA. Un écart qui peut être expliqué par la précision des mesures. La forme de la puissance en fonction du courant est donnée par :

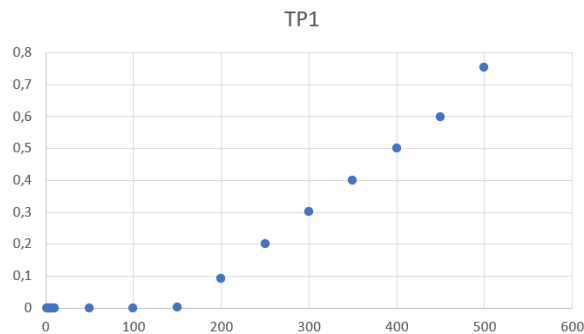


Figure 8: Courbe de gain de la diode laser utilisée en pompage.

Installation et Réglage du Collimateur (Module B)

1. Installer le collimateur sur le banc.
2. Régler le système pour obtenir un faisceau collimaté et centré, en utilisant le disque de centrage sur le module G.

Question : Pourquoi est-il nécessaire d'utiliser un collimateur?

Un collimateur est un appareil qui rétrécit un faisceau de particules ou d'ondes. Il peut aligner les directions de mouvement pour les rendre plus parallèles (c'est-à-dire produire de la lumière collimatée) ou réduire la section transversale spatiale du faisceau (c'est-à-dire limiter la taille du faisceau). Le collimateur est utilisé pour focaliser ou rediriger un faisceau de lumière ou un flux de particules. Dans ce contexte, le collimateur (à gauche, marqué A) serait utilisé pour produire un faisceau de lumière laser parallèle qui traverse le cristal YAG (au centre, entre B et C).

Installation et Réglage du Module de Focalisation (Module C)

1. Placer le module de focalisation à environ 8 cm du collimateur.
2. Déterminer la position du point de focalisation en utilisant la puissance minimale permettant de voir le faisceau.
3. Positionner le barreau laser YAG:Nd en ce point.

Question : Quel est le rôle du module de focalisation?

En focalisant la lumière, on augmente son intensité au foyer. Le module de focalisation est composé de lentilles et doit être réglé avec précision. Dans le contexte de l'image, le module de focalisation, situé après le cristal YAG, le filtre qui supprime la radiation de pompe (probablement le rayonnement utilisé pour exciter le milieu laser dans le cristal YAG), ce qui implique que le faisceau laser sortant du cristal YAG est ensuite focalisé pour l'utilisation souhaitée.

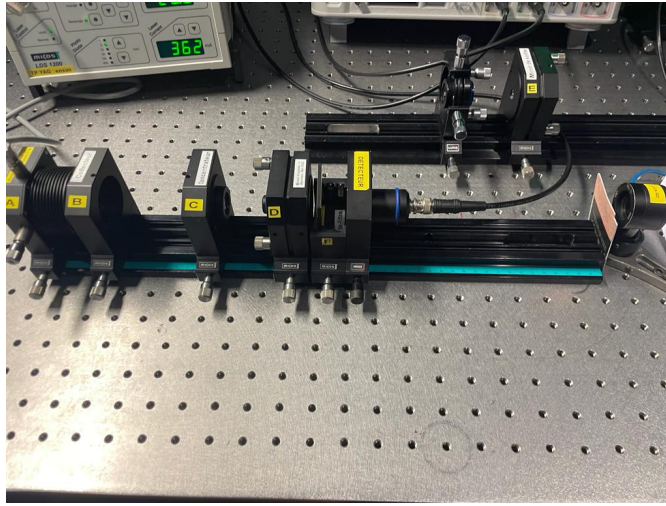


Figure 9: Placement du barreau laser YAG:Nd.

Question : Déterminer la valeur de τ

Pour en déduire cette valeur, on utilise l'oscilloscope et on relève l'écart temporel entre la valeur à 0,37 de la valeur finale. On se place alors dans le curseur temporel lorsque celui intersecte la courbe. On utilise les curseurs comme dans la figure 10. On obtient une valeur de τ de 250 microsecondes.

$$I_L(\tau) = \frac{I_L(0)}{e} = 0.37 \times I_L(0). \quad (15)$$

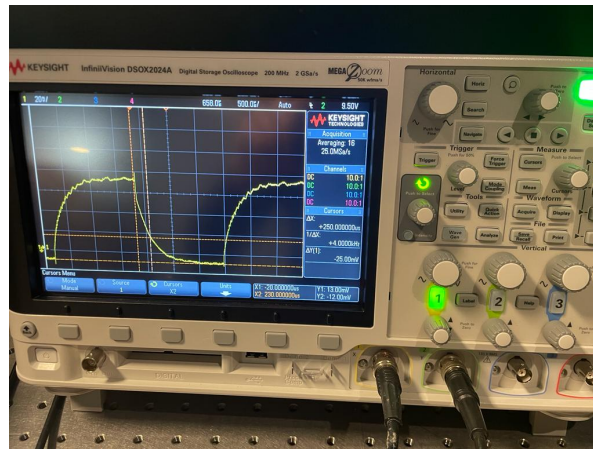


Figure 10: Résultats sur l'oscilloscope

Réalisation du Laser YAG :Nd

1°) Vérifier que le miroir de sortie n'est pas trop désorienté. On pourra s'assurer de ceci en vérifiant que la réflexion du faisceau de pompage sur le miroir de sortie se situe au voisinage du centre du cristal. Cette vérification nécessite une obscurité poussée.

2°) Vérifier que le collimateur permet d'obtenir une tache très ponctuelle dans le YAG (en fait, le collimateur doit être très près de la diode laser de pompage). S'il n'est pas possible d'obtenir une tache ponctuelle, il est vraisemblable que le collimateur n'est plus positionné correctement sur son support. Demander de l'aide à l'enseignant.

Question : Mesurer la puissance du Laser YAG en fonction du courant d'injection. Faire une régression linéaire.

Question : Nous savons que la pente en sortie est de 0,1 mW/mA grâce à la figure 11. Grâce à l'équation (15), et à ce que vous avez mesuré dans ce TP, trouver la valeur de la pente d'efficacité.

La pente d'efficacité α_s d'un laser peut être calculée à partir de la puissance de sortie en fonction de la puissance de pompe en utilisant l'équation suivante :

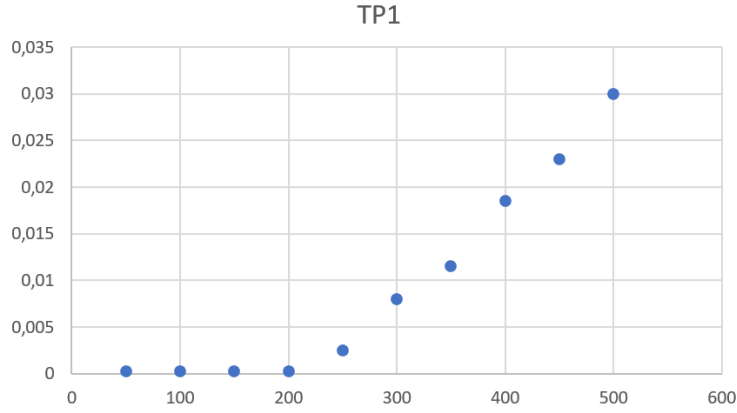


Figure 11: Courbe de la puissance

$$P_{\text{sortie}} = \alpha_s (P_{\text{pompe}} - P_{\text{seuil}}) \quad (16)$$

où P_{sortie} est la puissance de sortie, P_{pompe} est la puissance de pompe et P_{seuil} est la puissance de seuil du laser.

$$\alpha_s = \frac{P_{\text{sortie2}} - P_{\text{sortie1}}}{P_{\text{pompe2}} - P_{\text{pompe1}}} = 0,1/1,9 = 5,23\% \quad (17)$$

Doublage de fréquence

Certains cristaux ont la propriété de délivrer des signaux proportionnels au carré du champ électrique auquel ils sont soumis. Ainsi, soumis à une onde électromagnétique dont le module du champ électrique est:

$$E(t) = E_0 \cos(2\pi\nu t)$$

il y aura émission d'une radiation dont le champ sera du type:

$$C(E(t))^2 = CE_0^2 \cos^2(2\pi\nu t) = \frac{1}{2}CE_0^2(1 + \cos(4\pi\nu t))$$

Il apparaît que ce rayonnement a une fréquence double du rayonnement incident : c'est le phénomène de doublage de fréquence. Pour que cet effet soit observé, il faut des champs électriques très intenses, comme ceux par exemple que l'on trouve dans la cavité laser.

Réalisation

Pour réaliser le doublage de fréquence du rayonnement du YAG, on dispose d'un cristal de KTP (c'est-à-dire de formule $KTiOPO_4$). Après avoir ramené le courant d'injection à sa valeur minimale, et sans modifier les réglages qui ont permis d'obtenir l'effet laser, installer le cristal doubleur dans la cavité. Remettre le courant d'injection à sa valeur maximale. On doit en principe observer le rayonnement de fréquence double. Sinon réajuster les réglages. Lorsque la valeur maximale est obtenue, ôter le détecteur et le filtre pour projeter le signal sur le mur.

Questions

- Quelle est la longueur d'onde du rayonnement émis?
- Quel est l'intérêt de ce système?
- Décrire les phénomènes observés en fonction des réglages de la cavité.

Comme nous avons à faire à un doublage de fréquence, nous divisons la longueur d'onde par 2. Ainsi, nous étions à 800 nm, maintenant nous sommes à 400 nm. Le doublage de fréquence permet d'obtenir des longueurs d'onde qui ne sont pas directement disponibles à partir des lasers existants, en particulier dans le spectre visible ou l'UV. Les longueurs d'onde plus courtes peuvent permettre une meilleure résolution pour des applications telles que la lithographie ou la microscopie.

Faites le point

- Quelle est l'expression de l'énergie d'un photon associé à une radiation de fréquence ν ?
- Quels sont les 3 processus de transitions électroniques ?
- Qu'est-ce que l'inversion de population ?
- Qu'est ce que la luminescence ?
- Quels sont les deux éléments essentiels d'un laser ?
- Décrire la cavité laser;
- Donner un exemple de milieu amplificateur;
- À quoi sert le pompage ? Comment peut-il être réalisé ?
- Quel est le principe du doublage de fréquence ?

Faites le point

1. Expression de l'énergie d'un photon associé à une radiation de fréquence ν :

L'énergie d'un photon est donnée par la formule $E = h\nu$, où h est la constante de Planck et ν est la fréquence de la radiation.

2. Les 3 processus de transitions électroniques:

- Absorption: Un électron absorbe un photon et monte à un niveau d'énergie plus élevé.
- Émission spontanée: Un électron dans un état excité redescend à un niveau d'énergie inférieur en émettant un photon.
- Émission stimulée: Un électron excité redescend à un niveau d'énergie inférieur en émettant un photon, sous l'influence d'un autre photon dont l'énergie correspond à la différence d'énergie entre les deux niveaux.

3. Inversion de population:

C'est un état où le nombre d'électrons dans un état excité est supérieur au nombre dans l'état fondamental. C'est une condition préalable nécessaire pour l'amplification de la lumière dans un laser.

4. Luminescence:

C'est l'émission de lumière par un matériau qui n'est pas due à la chaleur. Elle peut être causée par des réactions chimiques, des influences électriques, des radiations ou la mécanoluminescence.

5. Deux éléments essentiels d'un laser:

- Milieu amplificateur: Le matériau (gaz, cristal, liquide, etc.) qui amplifie la lumière par émission stimulée.
- Cavité résonante: Une paire de miroirs placée de chaque côté du milieu amplificateur pour augmenter la probabilité d'émissions stimulées.

6. Description de la cavité laser:

La cavité laser est composée de deux miroirs placés de chaque côté du milieu amplificateur. Un miroir est totalement réfléchissant tandis que l'autre laisse passer une petite partie de la lumière, formant ainsi le faisceau laser. La cavité permet de multiples passages de la lumière à travers le milieu, augmentant ainsi l'amplification.

7. Exemple de milieu amplificateur:

Le Nd:YAG (yttrium-aluminium-grenat dopé au néodyme) est un exemple courant de milieu amplificateur utilisé dans les lasers.

8. Pompage et sa réalisation:

Le pompage est le processus d'apport d'énergie au milieu amplificateur pour créer une inversion de population. Il peut être réalisé optiquement (par exemple, avec une autre source de lumière comme une lampe flash ou un autre laser), électriquement (dans les diodes laser), ou même chimiquement.

9. Principe du doublage de fréquence:

Le doublage de fréquence est un processus non linéaire où un photon à une certaine fréquence interagit avec un cristal non linéaire (comme le KTP) pour produire deux photons de fréquence double. Ce phénomène est utilisé pour convertir la lumière laser d'une longueur d'onde à une autre plus courte, par exemple, de l'infrarouge au vert.

Conclusion

À travers ce travail pratique, nous avons acquis une compréhension approfondie du fonctionnement des lasers. Les expériences menées avec le laser YAG ont permis d'illustrer des concepts tels que l'inversion de population, le doublage de fréquence et la mesure de la pente d'efficacité. Ces connaissances enrichissent notre compréhension de la physique des lasers et ouvrent des perspectives sur leurs applications dans divers domaines scientifiques et technologiques.

Annexe

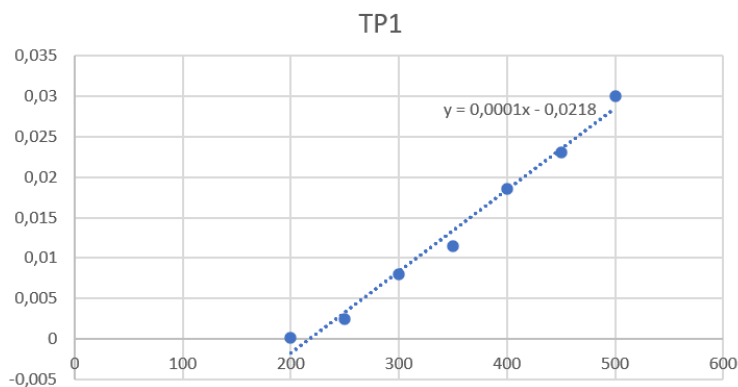


Figure 12: Expériences II valeurs

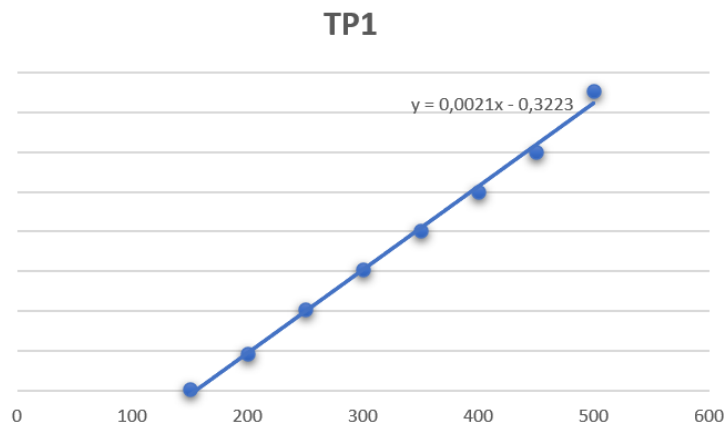


Figure 13: Expérience I valeurs