

TP Nd:YAG pompé par une diode laser

— Laser, Matériaux, Milieux Biologiques —

Régimes stationnaires et dynamiques

6 novembre 2007

Sécurité laser

Le « kit laser » sur lequel est basé ce travail est de classe **3B**, c'est-à-dire que le faisceau laser qui est émis, est **dangereux** pour les utilisateurs lorsqu'il les atteint directement. Il y a risque de **brûlures** et surtout de **lésions de la rétine**. La diode laser de pompage émet en effet **500 mW** à la longueur d'onde de 808 nm. Une telle puissance rend visible ce rayonnement bien que l'œil soit très peu sensible à cette longueur d'onde.

LE PORT DE LUNETTES DE PROTECTION EST OBLIGATOIRE.

Tout objet poli, tel que **bijou, montre**, etc. porté aux mains et aux poignets des expérimentateurs doit **être retiré** car il risque d'intercepter le faisceau laser et de le réfléchir en direction des yeux des personnes présentes dans la pièce.

De même, chaque fois que l'on modifie le montage optique, il faut préalablement supprimer la présence du faisceau laser dans la partie correspondante du montage. On peut, soit interposer deux écrans (*deux* : pour des raisons de sécurité), soit diminuer progressivement jusqu'à extinction l'intensité lumineuse émise par la diode laser.

On dispose pour ce TP de 4 montages de 2 types différents. L'un est commercialisé par la firme MEOS et les deux autres par l'entreprise BMI. Le texte ci-dessous est le même pour ces deux montages, bien que sur quelques détails, la procédure à suivre diffère un peu entre les lasers Nd :YAG MEOS et BMI. Le texte est rédigé pour les lasers BMI, mais chaque fois que cela sera nécessaire, il sera indiqué entre crochets la procédure à suivre pour le laser MEOS.

Précautions d'utilisation

Lors de manipulation sur la diode laser de pompe, le courant injecté dans celle-ci **doit être abaissé a sa valeur minimale** car la diode laser de pompe est un élément très fragile ; elle est sensible aux chocs électriques et thermiques. De même, **il ne faut jamais éteindre** l'alimentation générale sans avoir **abaissé a sa valeur minimale** le courant I injecté dans la diode laser.

Certains paramètres de fonctionnement, tels que I ou la température T, ne doivent pas dépasser une valeur plafond :

- $7^{\circ}\text{C} < T < 35^{\circ}\text{C}$ et $I < 650 \text{ mA}$ pour le laser BMI ;
- $7^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$ et $I < 800 \text{ mA}$ pour le laser MEOS.

1 Présentation du TP

1.1 Objectifs

Le but de ce travail est l'étude des principales propriétés du laser à Nd :YAG. On étudiera en particulier les aspects suivants :

1. Le spectre d'absorption du barreau de Nd :YAG par mesure de transmission.
2. La puissance émise P_{IR} en fonction de la longueur d'onde du laser de pompe λ_{diode} diode ou de la puissance du laser de pompe P_{diode} .
3. Le doublage intra-cavité de la fréquence optique du laser Nd :YAG, en particulier la puissance émise à 532 nm, P_{vert} en fonction de P_{IR} et P_{diode} .
4. L'observation des divers types de modes transverses de la cavité visibles en doublement de fréquence.
5. Le comportement dynamique du laser et en particulier ses oscillations de relaxation.
6. Le fonctionnement du laser en régime impulsionnel grâce à un Q-switch actif.

1.2 Diode laser de pompage

Au cours de précédentes séances de Travaux Pratiques, certaines caractéristiques des diodes laser ont été étudiées en détail. On rappelle en particulier que

- la puissance émise par la diode augmente lorsque le courant d'alimentation augmente, ou lorsque la température (en °C) diminue ;
- la longueur d'onde augmente lorsque le courant d'alimentation augmente, ou lorsque la température (en °C) augmente.

La diode-laser de pompage utilisée ici fonctionne de la même façon. Elle diffère principalement par sa longueur d'onde moyenne d'émission (808 nm) et par sa puissance maximale (**500 mW**). On peut faire varier sa température grâce à un élément peltier intégré dans le boîtier de la diode laser. Une thermistance interne (résistance dont la valeur varie avec la température) permet de connaître la température qui est donc exprimée en k Ω et que l'on convertit en °C grâce à une table donnée au paragraphe (1.4.1) (calibrations, montage BMI). Dans le montage MEOS, la température est directement convertie par l'électronique en °C. Un asservissement de température permet de choisir la température de travail.

Enfin, le deuxième boîtier électronique permet de choisir le courant d'alimentation sur la diode laser. Pour le laser BMI, le panneau arrière de l'alimentation (LFI4510) possède une entrée « analog input », sur laquelle il faut laisser en permanence une impédance de 50 Ω afin d'éviter de capter des parasites du secteur.

Les courbes d'évolution en fonction des différents paramètres, obtenues lors du TP « diodes laser », ne sont évidemment pas utilisables ici. Au cours du TP vous établirez, quand cela sera nécessaire, les caractéristiques de la diode laser. Ces caractéristiques ne seront pas forcément absolument identiques d'une séance à l'autre. En effet, ces diodes laser sont des lasers à très fort gain et sont par conséquent très sensibles aux retours de lumière. Ceux-ci varient en fonction de

l'alignement des éléments d'optique sur le banc. De plus, il ne sera pas possible, contrairement à ce qui avait éventuellement été vu au cours du TP diode, d'utiliser le courant de la photodiode interne, qui compte tenu des retours inévitables dans le laser, n'est pas proportionnel à la puissance lumineuse émise.

1.3 Matériels

Les éléments montés sur le banc optique peuvent, dans certains cas, être déplacés transversalement ou longitudinalement au moyen de vis micrométriques. Leur position et leur nombre diffèrent selon le type de laser.

- Un banc optique ainsi que des cavaliers porte-objet, une cible avec réticule, une carte convertisseur IR/visible, etc...
- Une diode-laser de pompe avec son alimentation en courant régulée et sa régulation de température toutes protégées des surtensions du secteur par un onduleur.
- Une optique de collimation avec anamorphoseur pour rendre parallèle le faisceau de lumière issu de la diode-laser ($f = 8$ mm).
- Une lentille de focalisation ($f = 55$ mm pour BMI et $f = 50$ mm pour MEOS) pour focaliser le faisceau de la diode laser sur le barreau de YAG.
- Une lentille de focale $f = 50$ mm pour focaliser sur la photodiode notée E sur les schémas, placée après le laser Nd :YAG.
- Un barreau de Nd :YAG dont la face d'entrée, plane, est très réfléchissante (près de 100 % de réflexion) à 1064 nm. L'autre face, plane aussi, située à l'intérieur de la cavité est transparente à 1064 nm.
- Un miroir de sortie concave de rayon de courbure $R = 100$ mm [BMI1] ou $R = 148$ mm [BMI2] ou $R = 200$ mm [BMI3] ou $R = 100$ mm [MEOS] et à grand coefficient de transmission à 808 nm. À 1064 nm, le coefficient de transmission T vaut 0,2 %.
- Un cristal de KTP doubleur de fréquence optique.
- Un modulateur acousto-optique et son alimentation ainsi que son générateur d'impulsions électriques.
- Un mesureur de puissance et une photodiode branchée sur un oscilloscope numérique.
- Un jeu de filtres optiques dont les caractéristiques sont données en annexe :
 - Un filtre RG1000 qui coupe la lumière à 808 nm et la transmet à 1064 nm (75 % de transmission pour un filtre d'épaisseur 2 mm).
 - Un filtre BG18 vert qui sert à éliminer l'infrarouge (808 nm et 1064 nm) et transmet 91 % à 532 nm.
 - Un lot de filtres neutres (ou densités) : NG3-1, NG3-2 et NG4-3. Dans la notation NGp-q, p correspondant au type de filtre et q à l'épaisseur du filtre en mm.
- Une caméra sensible à l'infrarouge utilisée pour aligner la cavité.
- Un banc optique perpendiculaire au banc principal sur lequel sont placé :
- Un cube polariseur fixé sur une monture tournante.
 - une lame partiellement réfléchissante de transmission $T = 98$ % ;
 - une photodiode, noté K sur les schémas ;
 - une lentille $f = 50$ mm pour focaliser sur la photodiode K.

1.4 Calibrations

1.4.1 Thermistance (BMI)

La thermistance est un élément semi-conducteur dont la résistance varie avec la température. **Plus la température augmente, plus la valeur de la résistance diminue.**

T(°C)	8	9	10	11	12	13	14
R(kΩ)	19,87	19,05	18,26	17,51	16,8	16,12	15,47
T(°C)	15	16	17	18	19	20	21
R(kΩ)	14,85	14,26	13,70	13,16	12,64	12,15	11,68
T(°C)	22	23	24	25	26	27	28
R(kΩ)	11,23	10,8	10,39	10,00	9,62	9,26	8,92
T(°C)	29	30	31	32	33	34	35
R(kΩ)	8,59	8,28	7,97	7,68	7,41	7,14	6,88

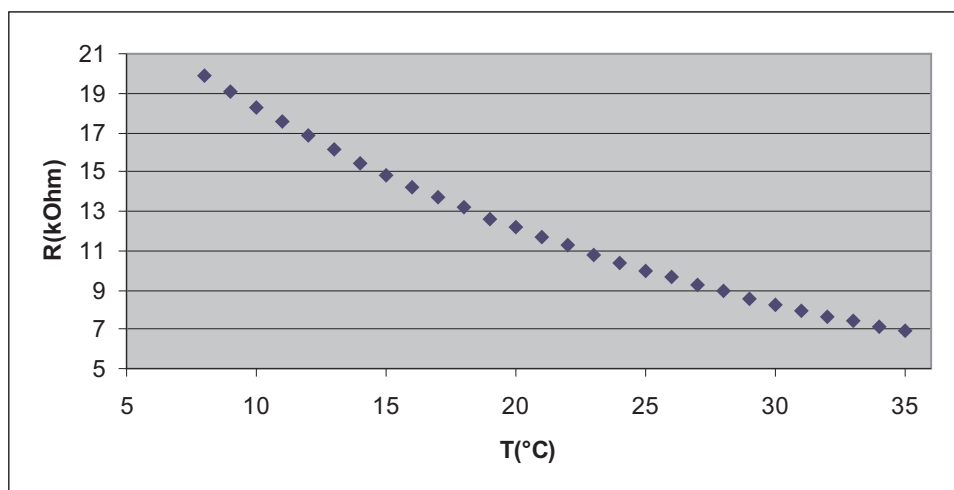


FIG. 1: Caractéristique de la thermistance.

La résistance R_T de la thermistance suit la loi exponentielle suivante :

$$R_T = k \exp\left(\frac{A}{T}\right) \quad \text{où} \quad A = 3375 \text{ K} \quad \text{et} \quad k = 1,21 \times 10^{-4} \text{ k}\Omega$$

1.4.2 La photodiode

Les photodiodes utilisées sont des photodiodes en silicium dont la réponse exprimée en A/W, varie en fonction de la longueur d'onde.

Lorsqu'une photodiode est éclairée par un faisceau lumineux d'une certaine puissance (en W), elle débite un courant électrique (en A) qui passe alors dans une résistance de charge (dans l'expérience, elle peut valoir suivant votre choix 100 Ω, 1 kΩ ou 10 kΩ pour la photodiode mesurant le faisceau principal et 1 kΩ, 10 kΩ ou 100 kΩ pour la photodiode mesurant le signal de la diode laser sur le côté.

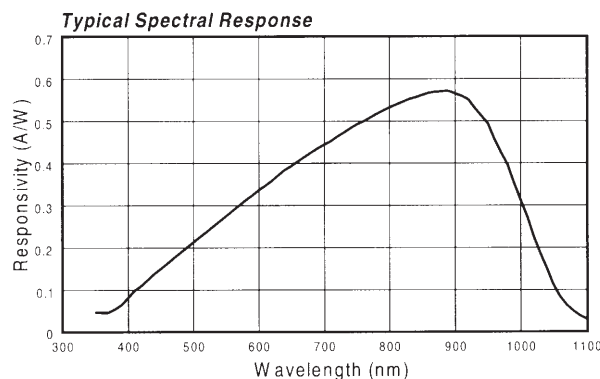


FIG. 2: Courbe de réponse typique d'une photodiode en silicium.

La courbe de réponse d'une photodiode en silicium (en A/W) est donnée en figure (2). Le tableau suivant donne quelques valeurs particulières correspondant aux longueurs d'ondes utilisées dans ce TP.

	532 nm	808 nm	1064 nm
Réponse (A/W)	0,25	0,54	0,05

Lorsqu'on mesure avec la photodiode une tension de 1 V avec une résistance de charge de 1 k Ω , à quelle puissance cela correspond-il lorsqu'il s'agit d'un faisceau

- i) à 532 nm ?
- ii) à 808 nm ?
- iii) à 1064 nm ?

1.4.3 Transmission des filtres

La transmission des différents filtres vous est donnée en fonction de la longueur d'onde et pour épaisseur de filtre donnée.

	NG3 - 1	NG3 - 2	NG4 - 3	BG18 - 1	RG1000 - 2
532 nm	10 %	1,1 %	2,5 %	91 %	0 %
808 nm	22 %	5,2 %	5,5 %	0 %	0 %
1064 nm	19 %	3,7 %	1,6 %	0 %	71 %

Les courbes de transmission en fonction de la longueur d'onde sont fournies en annexe.

2 Étude du milieu amplificateur

2.1 Réglage du collimateur

Alimenter la diode laser sous 300 mA [MEOS : 400 mA] et choisir une température correspondant à 20 k Ω [MEOS : 8°C].

Positionner le collimateur afin de rendre le faisceau de la diode laser parallèle à la direction du banc optique. La taille du faisceau ne doit pas varier tout au long de la propagation jusqu'au bout du banc.

Une fois ce réglage effectué, on ne touchera plus dans la mesure du possible au collimateur au cours du TP.

2.2 Mesure de l'absorption du barreau de Nd :YAG

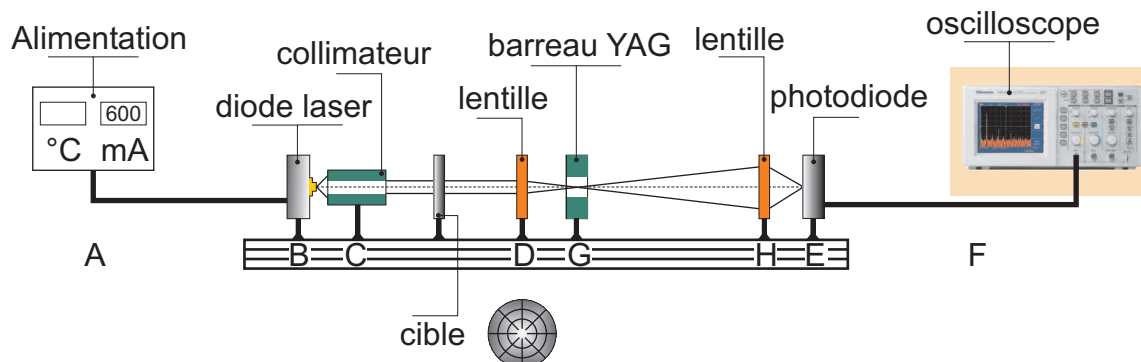


FIG. 3: Montage de détermination du spectre d'absorption du barreau de Nd :YAG.

- A – Électronique de commande ;
- B – diode laser ;
- C – collimateur ;
- D – lentille permettant de focaliser sur le barreau de Nd :YAG ;
- E – photodiode ;
- F – oscilloscope ;
- G – barreau de Nd :YAG dont la face d'entrée est recouverte d'une couche réfléchissante à 1064 nm ;
- H – lentille permettant de focaliser sur la photodiode.

2.2.1 Positionnement du barreau de YAG

Alimenter la diode avec un courant de 300 mA pour commencer. La diode laser doit normalement éclairer la face d'entrée du barreau à peu près en son centre.

Placer la cible (diaphragme) après le collimateur et la lame partiellement réfléchissante. La centrer à peu près sur le faisceau.

On positionnera la caméra infrarouge afin de visualiser le centre de la face avant (celle dirigée vers les z positifs) de la cible et on ajustera le courant d'alimentation pour que la caméra ne soit pas éblouie. Cette cible nous servira à aligner les éléments optique par auto-collimation.

Placer le barreau à environ 35 cm du collimateur. L'orienter perpendiculairement à l'axe optique du système. Pour cela, agir sur les vis de réglage du support du barreau afin de superposer la tache de réflexion et la tache incidente au niveau de la cible.

2.2.2 Lentille de focalisation D

Placer la lentille D de façon à ce que le barreau soit dans son plan focal. Centrer la lentille sur le faisceau.

2.2.3 Photodiode E

Placer la lentille H à une quinzaine de cm de l'extrémité du banc optique, afin d'éviter de récupérer trop de lumière de fluorescence provenant du barreau de YAG. Mettre un filtre neutre (un NG3.2 par exemple) avant cette lentille pour atténuer le faisceau qui arrive sur la photodiode. Veiller à ne pas positionner les filtres perpendiculairement à la direction de propagation de la lumière afin d'éviter les retours dans la diode laser. Positionner la photodiode au point focal de la lentille H et centrer le faisceau.

La photodiode est alimentée sous 9 V et possède des résistances de charge de 100 Ω , 1 k Ω ou 10 k Ω . Lorsque la photodiode est alimentée, la LED rouge sur le côté s'allume. On pourra choisir 1 k Ω comme résistance de charge.

Pour éviter la saturation de la photodiode (toujours moins de 7 V), il peut être nécessaire de rajouter des filtres neutres. D'autre part, le photodétecteur étant sensible à toute lumière, visible ou non, aucune lumière étrangère au phénomène à mesurer ne doit subsister lors de la mesure. En particulier, il sera nécessaire d'éteindre l'éclairage de la salle.

2.2.4 Mesure à 600 mA [MEOS : 800 mA]

Fixer le courant I d'alimentation de la diode laser à 600 mA [MEOS : 800 mA].

Mesurer la tension $U_{\text{transmission}}$ aux bornes de la photodiode E pour une température T variant par pas de 1 k Ω de 7 à 20 k Ω [MEOS : par pas de 2°C, de 8°C à 40°C].

Afin que la tension $U_{\text{transmission}}$ reste proportionnelle à la puissance lumineuse incidente, on veillera, par l'ajout éventuel de filtres neutres, à ce que celle-ci reste inférieure à 7 V. Il est nécessaire d'attendre entre deux mesures que la température se stabilise.

2.2.5 Exploitation des mesures

Tracer la courbe donnant la tension aux bornes de la photodiode E en fonction de la température.

Repérer les minima de transmission. Ces résultats sont-ils en accord avec les niveaux d'énergie de la figure (1) du fascicule sur les rappels théoriques ?

On rappelle que la longueur d'onde de la diode augmente avec la température et que les seules longueurs d'onde de la figure (1) accessibles avec cette diode sont 804,4 nm et 808,4 nm. La raie à 808,4 nm est la raie qui absorbe le plus.

Faire correspondre à chaque température pour laquelle on observe un minimum de transmission la longueur d'onde moyenne de la diode laser. Quelle température de diode faut-il choisir pour que le pompage soit le plus efficace possible ?

3 Étude du laser Nd :YAG, émission à 1064 nm

3.1 Procédure de réglage de la cavité

Le montage à réaliser est représenté sur la figure (4).

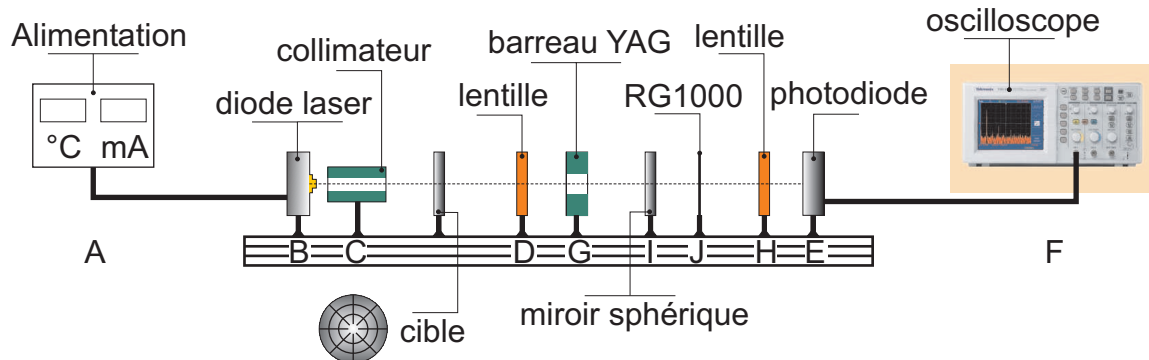


FIG. 4: Montage expérimental de mesure de la puissance émise par le laser à Nd :YAG.

- I – Miroir concave de sortie du laser monté sur un support orientable ;
- J – Filtre RG1000.

3.1.1 Position du miroir de sortie

La face du barreau de Nd :YAG (module G) par laquelle entre le faisceau de pompe est recouverte d'une couche diélectrique entièrement réfléchissante à 1064 nm et constitue le miroir d'entrée de la cavité ; celui-ci est plan.

Où placer le miroir de sortie de la cavité laser ?

On rappelle que dans le cas général, si L est la distance entre les deux miroirs sphériques d'une cavité linéaire dont les rayons de courbure sont R_1 et R_2 , pour qu'un résonateur soit stable, il faut satisfaire à la condition

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1$$

On ne touchera ni au collimateur, ni à l'orientation de la lentille de focalisation ou du barreau dans la mesure du possible. On va chercher à orienter le miroir de sortie. Dans un premier temps, on peut éventuellement effectuer le réglage avec le miroir dont la transmission à 1064 nm est de l'ordre de 0,2 %.

3.1.2 Orientation du miroir de sortie

Baisser le courant d'alimentation à 300 mA. Repérer la position du barreau de YAG et de sa lentille de focalisation sur le banc, puis les enlever.

Placer la cible après le collimateur. Vérifier que le faisceau de la diode passe bien par le centre du miroir et orienter celui-ci perpendiculairement à l'axe optique du système. Pour cela, agir sur les vis de réglage du support du miroir afin de superposer la tache de réflexion et la tache incidente au niveau de la cible.

Le support du miroir (ainsi que celui du barreau) est pourvu de vis micrométriques d'orientation. **Veiller à bien les utiliser dans la zone d'excursion autorisée et donc à ne pas les visser ou les dévisser complètement.** On pensera également que les supports sont face à face. Il est donc nécessaire dans la phase de réglage de bien identifier les vis qui commandent l'horizontalité et celles qui commandent la verticalité.

3.1.3 Observation de l'effet laser

Remettre à leur place le barreau YAG et la lentille. Enlever la cible. Attention, la focalisation doit avoir bien lieu au centre du barreau de Nd :YAG.

Ce réglage initial est en principe suffisant pour que le laser oscille et qu'ainsi un rayonnement à 1064 nm soit émis. Si ce n'est pas le cas on refera l'alignement des éléments de la cavité.

Augmenter le courant d'alimentation I de la diode-laser jusqu'à 600 mA [MEOS : 800 mA] pour la température T correspondant au maximum d'absorption mesuré dans la partie (2.2.5). Pour mettre en évidence l'effet laser, placer le filtre RG1000 après le miroir de sortie de la cavité et utiliser la carte convertisseur IR/visible.

Régler la cavité afin que le mode émis ressemble à un TEM₀₀. Choisir une résistance de charge de 10 kΩ sur la photodiode E et optimiser la puissance émise à 1064 nm en jouant sur l'orientation des miroirs de la cavité et sur les déplacements longitudinaux ou éventuellement transversaux de la lentille de focalisation sur le barreau. [MEOS : jouer sur la position de la lentille de focalisation et jouer un peu sur les déplacements transversaux du collimateur]

SI VOUS AVEZ LE TEMPS : *Augmenter la longueur de la cavité en déplaçant le miroir de sortie. Noter la longueur maximale de la cavité pour laquelle on arrive à obtenir l'effet laser ; comparer cette longueur au rayon de courbure du miroir de sortie. Revenir ensuite à la configuration optimale.*

3.2 Modulation de la puissance lumineuse de la diode laser

On désire moduler la puissance lumineuse de la diode laser tout en restant à longueur d'onde constante et égale à celle correspondant au maximum d'absorption du barreau de YAG mesuré dans la partie (2.2.5) afin de conserver le maximum d'efficacité de pompage.

Pour ce faire, on ne peut pas simplement moduler la puissance de la diode laser en modifiant son courant d'alimentation car cette modification entraîne aussi un changement de la longueur d'onde d'émission. Pour pallier ce problème, on reste à courant d'alimentation constant et température constante, et on va moduler l'intensité lumineuse de la diode laser à l'aide du schéma de la figure (5).

3.2.1 lame partiellement réfléchissante

Centrer la lame sur le faisceau de la diode laser et l'orienter à 45°C de celui-ci.

Veiller à ce que la lame n'occulte pas, même partiellement, le faisceau transmis. Le faisceau réfléchi doit être centré sur le banc optique perpendiculaire au banc principal.

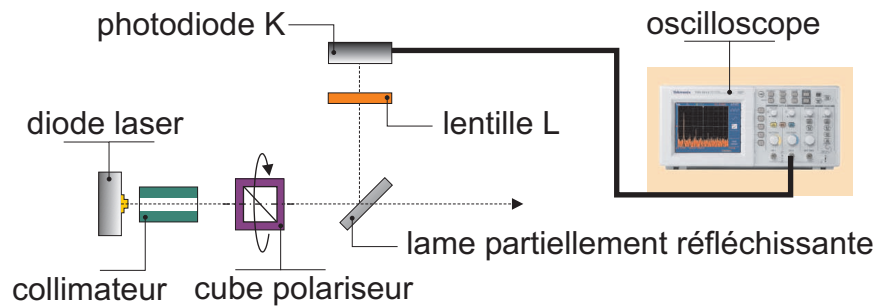


FIG. 5: Montage expérimental pour moduler la puissance de pompe.

3.2.2 Photodiode K

Utiliser les réglages en translation de la photodiode pour optimiser la tension mesurée à l'oscilloscope.

On peut choisir la résistance de charge de la photodiode parmi trois valeurs : 1 k Ω , 10 k Ω et 100 k Ω .

3.2.3 Lentille de focalisation L

Elle permet de focaliser le faisceau de la diode laser sur la photodiode K, afin de maximiser le signal mesuré.

La placer à la distance focal $f = 5$ cm de K et régler sa hauteur et sa position latérale afin qu'elle soit bien centré sur le faisceau.

Retoucher légèrement aux réglages de la photodiode pour optimiser la tension lue sur l'oscilloscope.

3.2.4 Cube polariseur

Placer le cube polariseur après l'optique de collimation de la diode laser. Visualiser sur l'oscilloscope le signal de la photodiode K lorsque vous tournez le polariseur.

Pour visualiser l'évolution de l'intensité, on pourra se placer en mode XY et utiliser une persistance infinie sur l'oscilloscope.

3.2.5 Étalonnage de la puissance de la diode de pompe

Mesurer avec un wattmètre la puissance du faisceau à la sortie de la lame partiellement réfléchissante, pour différentes valeurs de la tension aux bornes de la photodiode K. En déduire une droite d'étalonnage de la puissance de pompe en fonction de la tension lue sur la photodiode de dérivation K.

Attention à la saturation du wattmètre.

3.3 Étude de la puissance de sortie à 1064 nm en fonction de la puissance de pompe

On veut étudier la variation de la puissance émise à 1064 nm en fonction de la puissance de pompe. Le courant de la diode laser de pompe est fixé à 600 mA et la température est celle qui correspond au maximum d'absorption du barreau de Nd :Yag. On fait varier la puissance de pompe en tournant le cube polariseur.

3.3.1 Mesures

Pour plusieurs positions du cube, mesurer à la fois la tension U_{1064} aux bornes de la photodiode E avec le filtre RG1000 (choisir une résistance de charge de 1 k Ω ou 10 k Ω) et la tension U_{pompe} aux bornes de la photodiode K.

3.3.2 Exploitation des mesures

Tracer à partir de ces mesures, de l'étalonnage de la partie (3.2.5) et de la réponse du silicium à 1064 nm la courbe donnant la puissance P_{1064} émise à 1064 nm en fonction de la puissance de pompe P_{pompe} .

On pourra aussi visualiser cette courbe en utilisant le mode XY, une persistance infinie sur l'oscilloscope et en faisant tourner le cube.

Déterminer la puissance de la diode laser pompe $P_{pompe, seuil}$ permettant d'atteindre le seuil d'oscillation pour le laser à 1064 nm.

Pour un courant de 600 mA [MEOS : 800 mA] et une température correspondant au maximum d'absorption, essayer de définir le rendement optique P_{1064}/P_{pompe} de la chaîne (diode laser + barreau dans sa cavité) que constitue ce laser. Conclure.

4 Doublage de fréquence intra-cavité

On conserve pour cette partie le montage en dérivation de la partie (3.2).

4.1 Réglages de la cavité

Baisser la courant d'alimentation à 300 mA et replacer la cible. Placer le cristal doubleur en KTP juste après. Vérifier qu'il est bien centré par rapport au faisceau de la diode laser et régler son orientation par rapport à l'axe optique du système en visualisant la tache de retour sur la cible.

Après avoir abaissé à sa valeur minimale le courant dans la diode-laser, insérer le cristal doubleur à l'intérieur de la cavité laser en le rapprochant au maximum du barreau. Donner la raison de cette position. Vérifier en plaçant la carte IR/visible juste après le cristal que le faisceau de la diode est bien centré sur celui-ci.

Augmenter le courant d'injection dans la diode laser jusqu'à sa valeur maximale (ajuster la température T pour avoir un pompage optimal).

En principe, un faisceau vert devrait sortir de la cavité : l'orientation du cristal ainsi que ses positions horizontale et verticale doivent être optimisées de façon à avoir un accord de phase

parfait et le meilleur taux de conversion d'énergie du fondamental vers le second harmonique ($\omega \rightarrow 2\omega$ avec un mode TEM₀₀). On peut retoucher les réglages du résonateur, si besoin est, en contrôlant le signal sur la photodiode.

Observer alors les modes transverses. Choisir l'orientation des miroirs pour que le faisceau vert généré soit un TEM₀₀ d'intensité maximum. Il peut arriver que l'intensité du vert fluctue. Chercher alors le réglage qui limite au maximum les fluctuations, quitte à convertir un peu moins d'infra-rouge en vert.

Pour pouvoir mesurer la puissance moyenne du vert, on adapte en parallèle sur l'oscilloscope un filtre passe-bas.

4.2 Rendement de doublage

Pour différentes valeurs de la puissance de pompe, mesurer alternativement la tension aux bornes de la photodiode E à 1064 nm, U_{1064} (avec des densités neutres et le filtre RG1000 qui ne laisse passer que le faisceau à 1064 nm), et la tension U_{532} , à 532 nm avec le filtre BG18 qui le laisse passer que le faisceau vert à 532 nm.

Tracer la courbe $P_{532}(P_{1064})$. Cette variation est-elle quadratique ? Tracer la courbe $P_{532}(P_{1064}^2)$.

On pourra aussi visualiser la courbe $P_{532}(P_{1064})$ en se plaçant en mode XY et persistance infinie.

En déduire le rendement du doublage P_{532}/P_{1064}^2 .

5 Oscillations de relaxation

5.1 Obtention des conditions d'observation des oscillations

5.1.1 Taux de pompage

Enlever le cristal doubleur en faisant attention de ne pas changer ses réglages et réoptimiser l'alignement de la cavité.

Pour déterminer le seuil de pompage, il est indispensable de connaître $I_{\text{seuil, diode}}^{\text{alim}}$ et $I_{\text{seuil, YAG}}^{\text{alim}}$.

*Commencer par repérer **précisément** le seuil de la diode laser. Avant le seuil, le faisceau a une section transverse un peu diffuse. Au seuil, il apparaît une structure beaucoup plus nette et plus brillante. Noter alors la valeur de $I_{\text{seuil, diode}}^{\text{alim}}$.*

De même, repérer précisément le seuil du laser YAG et noter la valeur de $I_{\text{seuil, YAG}}^{\text{alim}}$.

Attention, comme vous avez un peu changé le réglage de la cavité, le seuil de YAG ne correspond pas nécessairement à celui que vous aviez au début du TP.

En déduire les courants d'alimentations I_{alim} pour que le taux de pompage soit de $r = 1, 5$.

5.1.2 Réalisation du montage

Appliquer une modulation de faible amplitude sur la diode laser.

Pour les montages BMI, il est conseillé de suivre la procédure suivante :

1. vérifier que le générateur BF est bien déconnecté de l'alimentation de la diode laser.
2. Visualiser alors sur l'oscilloscope un créneau issu du générateur basse fréquence.

3. Sachant que la modulation sur l'alimentation de la diode laser est de 200 mA/V il est conseillé de ne jamais dépasser une amplitude crête à crête de 1 V **sans tension d'offset**. Par sécurité il est préférable d'avoir une modulation minimale (-40 dB ou -20 dB suivant les montages) lorsqu'on applique le créneau.
4. La modulation se branche sur l'entrée analog input à l'arrière de l'alimentation. Il est nécessaire auparavant d'enlever le bouchon 50Ω placé sur cette entrée.
5. Allumer alors la diode laser et augmenter le courant moyen d'alimentation. On pourra alors augmenter l'amplitude de modulation en faisant bien attention de ne pas envoyer de tension trop importante.
6. Il peut être astucieux de visualiser directement sur l'alimentation la variation des courants d'alimentation et de photodiode interne en modulant très lentement ($< 0,2$ Hz). Il est alors possible de se placer à une fréquence facilement visualisable par un oscilloscope.

Pour le montage MEOS, choisir la modulation interne et la visualiser sur l'oscilloscope. La valeur affichée pour I_{alim} correspond à la valeur moyenne du courant d'alimentation. En effet l'électronique module en créneau le courant entre 0 et $2I_{\text{alim}}$.

5.2 Étude des oscillations de relaxation

5.2.1 Observation

Choisir le courant moyen de telle sorte que le courant d'alimentation de la diode laser commute entre une valeur inférieure ou égale à $I_{\text{seuil, YAG}}^{\text{alim}}$ et une valeur légèrement supérieure à $I_{\text{seuil, YAG}}^{\text{alim}}$. On choisira par exemple un paramètre de pompage égal à 1,5.

Choisir un rapport cyclique de 1 pour le créneau et une fréquence de 1 kHz. Observer les oscillations de relaxation. Discuter qualitativement ce que vous voyez. Distinguer en particulier deux régimes différents.

On utilisera pour la photodiode la résistance de charge de $1 \text{ k}\Omega$ pour ne pas limiter la bande passante.

Mesurer le temps nécessaire pour obtenir la première impulsion. A quoi correspond ce temps ?

Mesurer la hauteur et la durée de la première impulsion. Prendre par exemple la largeur à mi-hauteur. A quoi correspond ce temps ?

Augmenter maintenant la fréquence du créneau. À partir de quelle fréquence n'observe-t-on plus d'impulsions ? Comment peut-on expliquer ce phénomène ?

5.2.2 Temps de vie du niveau excité

Mesurer la pulsation des oscillations de relaxation. En déduire la valeur de γ_{\parallel} puis le temps de vie du niveau excité.

On rappelle l'expression
$$\omega_{\text{relaxation}} = \sqrt{(r-1)\gamma_c\gamma_{\parallel}}$$

Comment évolue la fréquence des oscillations de relaxation lorsque l'amplitude de modulation augmente ? Pourquoi ?

6 Q-switch actif

6.1 Signaux de modulation

L'ensemble qui permet de réaliser le processus de Q-switch actif comprend :

- un modulateur acousto-optique composé d'un cristal de silice sur une des faces duquel est collé un transducteur piézoélectrique. Le transducteur est une lame très mince, cristalline de niobate de lithium (LiNbO₃) prise en sandwich entre deux électrodes d'or. Lorsque celui-ci est soumis à un champ électrique à haute fréquence, il crée des ondes ultrasonores de même fréquence qui se propagent dans la silice perpendiculairement au plan du transducteur, à une vitesse de l'ordre de 6 000 m/s environ.
- Un générateur d'ondes haute fréquence (HF) qui produit une onde à la fréquence de 30 MHz et dont la puissance est au maximum de 3,6 W. **Quand le générateur HF est alimenté, il doit toujours être connecté au modulateur acousto-optique.**
- un générateur d'impulsions qui produit une fonction créneau servant à moduler l'onde radio fréquence (RF) de 30 MHz. La fonction créneau a un très grand rapport cyclique. En effet cette fonction reste constante et positive pendant la majeure partie de la période de durée T_i (période qui correspond aux pertes maximales dans la cavité). Elle est nulle pendant un temps τ_p , souvent très court, durant lequel les pertes sont minimales. La fonction créneau est représentée figure (6).

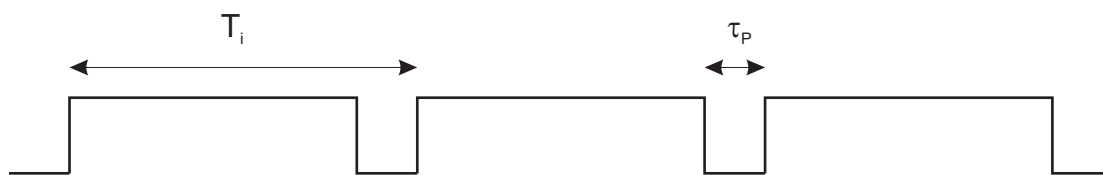


FIG. 6: Fonction créneau produite par le générateur d'impulsions.

L'impédance de sortie du générateur HF, du générateur d'impulsion et des câbles coaxiaux est de 50Ω .

Dans le montage MEOS, la sortie TTL du générateur d'impulsions se branche directement sur le générateur HF.

Dans le montage BMI, la sortie TTL du générateur d'impulsions se branche sur la petite boîte reliée au générateur HF. On commute alors le switch sur modulation externe.

Pour visualiser le créneau, on met un « Té » à la sortie TTL du générateur d'impulsions et on observe le signal sur l'oscilloscope. Attention, il s'agit de signaux haute fréquence et il faut penser à adapter l'entrée de l'oscilloscope à 50Ω , l'impédance du câble coaxial. Pour cela, placer une résistance de 50Ω en parallèle de l'entrée de l'oscilloscope.

Pour visualiser le signal modulé à 30 MHz, une boîte métallique à la sortie du générateur HF permet de prélever une petite partie (quelques %) de l'onde RF. Là aussi, il faut adapter l'impédance de l'entrée de l'oscilloscope à 50Ω .

Visualiser sur l'oscilloscope le signal carré émis par le générateur d'impulsions et le signal RF modulé par le créneau.

6.2 Insertion du modulateur acousto-optique dans la cavité laser

6.2.1 Orientation du modulateur

Avant d'insérer le modulateur acousto-optique dans la cavité, il faut :

1. que le cristal soit centré par rapport à l'axe de la cavité laser matérialisé par le faisceau de la diode de pompe ;
2. que les faces d'entrée et de sortie qui sont parallèles entre elles, soient orientées perpendiculairement à l'axe de la cavité laser.

Pour effectuer ces réglages, fixer le courant de la diode laser à 300 mA (valeur proche du seuil) et observer à la caméra la cible percée. Placer le modulateur acousto-optique après la cible, à l'extérieur de la cavité laser. Retoucher les réglages en translation du modulateur afin qu'il soit centré par rapport au faisceau de la diode laser, pris comme faisceau de référence. Retoucher les réglages en rotation afin que la réflexion sur la face avant du modulateur revienne sur la cible. De cette façon, il est orienté perpendiculairement à l'axe matérialisé par le faisceau de la diode.

Fait fonctionner le laser sans Q-switch de manière optimale en prenant une cavité de longueur suffisante pour y insérer ultérieurement le modulateur acousto-optique.

6.2.2 Insertion du modulateur dans la cavité

Insérer le modulateur acousto-optique dans la cavité sans encore l'exciter par le champ RF. Alimenter la diode laser sous 600 mA [MEOS : 800 mA]. Régler un peu la cavité pour optimiser la puissance de sortie en continu. Mesurer à l'aide de la photodiode la puissance de sortie du laser Nd :YAG.

Repérer le seuil de fonctionnement du laser YAG en continu et noter la valeur de $I_{\text{seuil, YAG}}^{\text{alim}}$.

6.2.3 Observation des impulsions

On visualise à présent sur l'oscilloscope le signal carré sur la voie 1 et le signal de sortie de la photodiode sur la voie 2. On déclenche l'oscilloscope sur la voie 1. Pour ne pas limiter la bande passante, on choisit la résistance de 1 k Ω pour la photodiode E.

Choisir une période T_i du créneau de 1 ms et une durée d'ouverture τ_P de la porte de 2 μ s.

Exciter le modulateur par l'onde RF modulée par la fonction créneau. Reprendre l'alignement de la cavité et du modulateur afin d'optimiser l'amplitude et la forme des impulsions.

6.3 Caractéristiques de l'impulsion laser

6.3.1 Durée d'ouverture de la porte

Faire varier la durée d'ouverture τ_P de la porte du Q-switch et observer les conséquences sur l'amplitude et la forme de l'impulsion. Que se passe-t-il lorsque l'on augmente la durée d'ouverture de la porte ? Que se passe-t-il lorsque l'on la diminue ?

Expliquer pourquoi, en deçà d'une certaine valeur minimale de τ_P , que l'on déterminera, l'impulsion disparaît.

Mesurer la durée entre le moment où la tension passe à zéro (ouverture de la porte) et le moment où l'impulsion est émise. Expliquer pourquoi pour des valeurs courtes de τ_P l'impulsion est émise juste après que le créneau soit revenu à sa valeur maximum.

6.3.2 Période du créneau

Fixer τ_P à une valeur intermédiaire et faire varier la période T_i . Que se passe-t-il lorsque l'on augmente la période ? Que se passe-t-il lorsque l'on la diminue ?

Expliquer pourquoi, en deçà d'une certaine valeur minimale de T_i , l'impulsion disparaît. Déterminer cette valeur de T_i . Quel est le temps dans les oscillations de relaxations qui a le même ordre de grandeur. Pourquoi ?

6.3.3 Temps caractéristiques de l'impulsion

On choisit à présent des valeurs $\tau_{P,opt}$ et $T_{i,opt}$ de τ_P et T_i pour lesquelles l'amplitude des impulsions est maximale.

Mesurer la durée de l'impulsion en conditions optimales. Comparer à celle obtenue pour les oscillations de relaxation.

Comment varient la durée et la forme de l'impulsion lorsque I_{alim} varie ?

6.3.4 Énergie et puissance

On se place toujours dans la configuration optimale $\tau_{P,opt}$ et $T_{i,opt}$.

Mesurer la puissance crête de l'impulsion et la comparer à la puissance moyenne fournie par le laser en fonctionnement continu.

Estimer l'énergie de l'impulsion. Calculer la puissance de l'impulsion moyennée sur une période du créneau. Dans le cas où l'on travaille dans la configuration $\tau_{P,opt}$ et T_i critique, calculer la puissance de l'impulsion moyennée sur une période du créneau. Comparer à la puissance du laser en continu. Conclure.

7 Annexes : courbes de transmission des filtres optiques

On reproduit ici les facteur de transmission interne de différents filtres utilisés dans ce TP. Le facteur de réflexion sur les faces vaut 0,92 pour les filtres neutres et 0,91 pour les le RG100 et le BG18. Les courbes sont données pour une épaisseur standard de 1 mm.

7.1 RG1000

Le filtre RG1000 permet de couper la lumière de la diode de pompe à 808 nm et transmet la lumière laser à 1064 nm (75 % de transmission pour un filtre d'épaisseur 2 mm).

Long pass filters GG 385, GG 395, GG 400, GG 420, GG 435, GG 455, GG 475, GG 495, OG 515, OG 530, OG 550, OG 570, OG 590, RG 610, RG 630, RG 645, RG 665, RG 695, RG 715, RG 780, RG 830, RG 850, RG 1000

Long pass/band pass filters RG 9

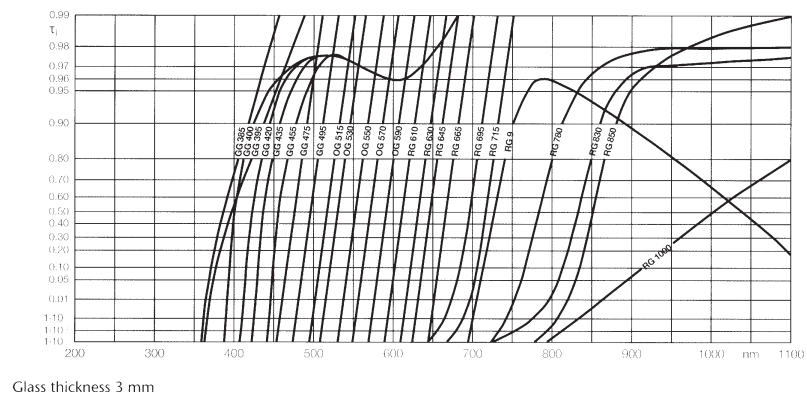


FIG. 7: Facteur de transmission interne. Le facteur de réflexion sur les faces vaut 0,91.

7.2 BG18

Le filtre BG18 de couleur verte permet d'éliminer l'infrarouge (808 nm et 1064 nm) et transmet 91 % dans le vert, à 532 nm.

Band pass filters BG 18, BG 38, BG 42

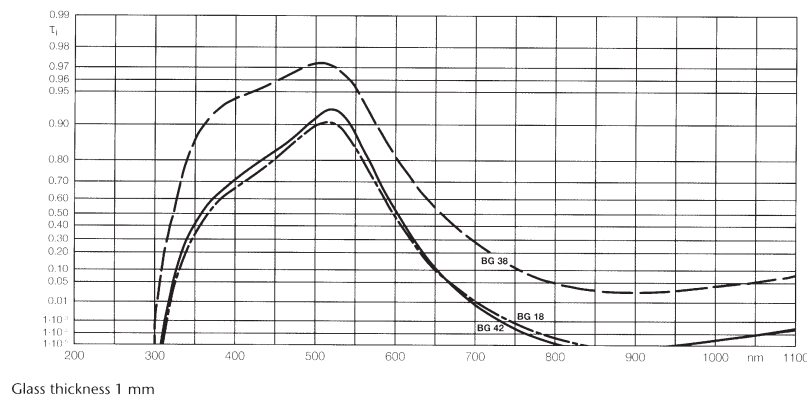


FIG. 8: Facteur de transmission interne. Le facteur de réflexion sur les faces vaut 0,91.

7.3 Filtres neutres NGp-q

Les filtres neutres (ou densités) NG3-1, NG3-2 et NG4-3 permettent d'atténuer l'intensité du faisceau sans modifier sa composition spectrale. Dans la notation NGp-q, p correspondant au type de filtre et q à l'épaisseur du filtre en mm. Les courbes sont données pour une épaisseur standard de 1 mm.

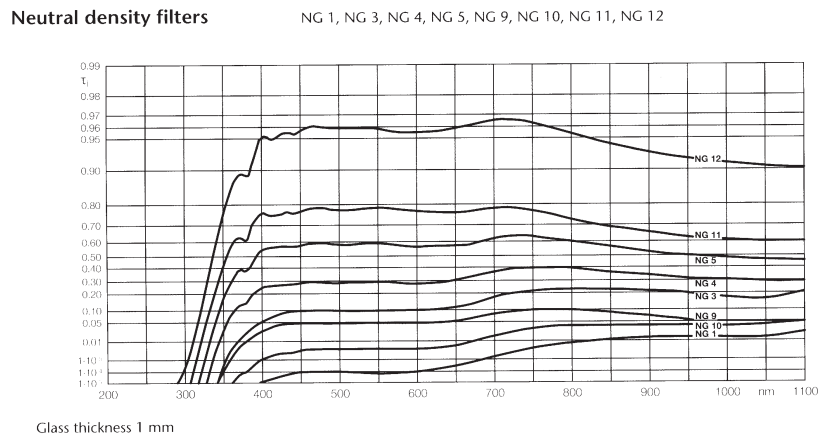


FIG. 9: Facteur de transmission interne. Le facteur de réflexion sur les faces vaut 0,92.