

ÉTUDE DE LA PUISSANCE D'UN LASER ENTIÈREMENT FIBRÉ PASSIVEMENT Q-DÉCLENCHÉ PAR UN ABSORBANT SATURABLE

Hocine DJELLOUT, Rabah MOKDAD, Mustafa BENARAB, Ali BOUKELLAL
et Omar LAMROUS

*Laboratoire de Physique et Chimie Quantiques, Faculté des Sciences,
Université Mouloud Mammeri – Tizi-ouzou, 15000 Tizi-Ouzou, Algérie*

E-mail : omarlamrous@mail.ummo.dz

RÉSUMÉ : Une architecture d'un laser entièrement fibré dopé Nd^{3+} passivement Q-déclenché par un absorbant saturable dopé Cr^{4+} fonctionnant en régime impulsionnel est proposée. Un modèle numérique moyennant la résolution des équations cinétiques a été adopté pour étudier le signal de sortie en fonction de la puissance pompe. Des impulsions laser de largeur à mi-hauteur allant jusqu'à 4.10^{-7} s ont été obtenues pour des puissances pompe inférieures à 678 W. Par ailleurs, deux comportements auto-impulsionnels ont été mis en évidence et caractérisés : un comportement auto-impulsionnel de faible amplitude, et un comportement auto-impulsionnel de forte amplitude atteignant quelques kW et de fréquence de répétition de l'ordre de 4 kHz.

MOTS CLÉS : laser fibré, pulse laser, absorbant saturable

1. Introduction :

Un intérêt particulier est porté de nos jours sur l'étude des lasers fibrés activement ou passivement Q-déclenchés [1, 2], car ils présentent beaucoup d'avantages par rapport aux lasers déjà existants (Nd : YAG, CO₂, à semi-conducteurs ...). Ils sont compacts, ont une bonne gestion thermique, et sont doués d'une bonne qualité de faisceau. L'utilisation de fibres optiques ayant des propriétés remarquables comme les fibres à double gaines (DCF) ou des fibres à large mode (LMA) [3,] permettent d'obtenir des puissances laser de plusieurs Kw en impulsionnel activement Q-déclenché, ou passivement Q-déclenché [4,5], avec une bonne qualité du faisceau pouvant approcher la limite de diffraction. Un laser entièrement fibré passivement Q-déclenché $Nd^{3+}:Cr^{4+}$ a été conçu et réalisé [6], des pulses de fréquence de répétition de 84 KHz et de durée de 3.0 à 6.4 μ s ont été obtenus pour une puissance de pompe de 236 mw. D'autres lasers fibrés utilisant différents dopants, notamment Yb - Bi [7] et Yb - Ho [8] ont été réalisés. Dans le 1^{er} cas un pulse laser d'énergie de 100 μ J avec une fréquence de répétition de 100 KHz pour une puissance de pompe de 7.5 w a été mis en évidence. Dans le 2^{ème}, pour une puissance de pompe de 2 w, un train d'impulsions de durée de 250 ns, de puissance crête de l'ordre de 300 w avec une fréquence de répétition de 8KHz a été observé. Dans cette lettre, nous proposons l'étude d'une architecture d'un laser entièrement fibré dopé Nd^{3+} passivement Q-déclenché par un absorbant saturable fibré dopé Cr^{4+} en régime pulsé fonctionnant en monomode transverse. Usant d'un modèle communément appelé modèle ponctuel [10,11], les résultats de simulation montrent un fonctionnement impulsionnel du laser pour des puissances de pompe inférieures à 678 w. Pour des puissances pompe variant de 0 à 50 w, nous obtenons des pulses de largeur à mi-hauteur de l'ordre de 0.2 μ s pour des fréquences de répétition allant jusqu'à 100 KHz. Par ailleurs des comportements auto-impulsionnel ont été observés en fonction de la concentration d'ions Cr^{4+} de la fibre absorbant saturable.

1. Description et mise en équation du laser :

La figure 1 illustre le schéma du laser entièrement fibré Q-déclenché par un absorbant saturable que nous proposons. Un combinateur de fibres multi modes est utilisé pour associer ensemble plusieurs lasers pompes dans une seule fibre optique et ce dans le but d'augmenter la puissance incidente.

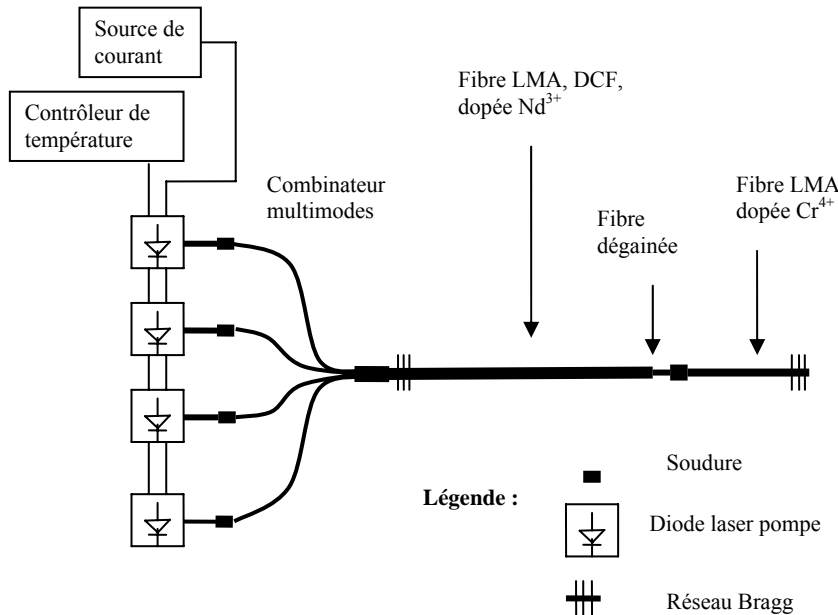


Figure--1 Laser entièrement fibré passivement Q-

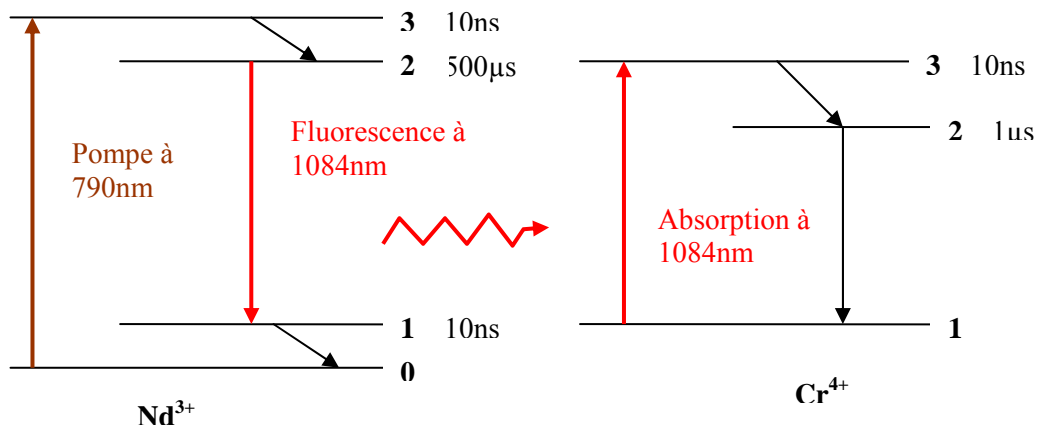


Figure-2 Niveaux d'énergie du Nd^{3+} et Cr^{4+}

La cavité laser est constituée de deux réseaux de Bragg de bande passante de 0.3nm, celui incrusté dans la fibre Nd^{3+} doit avoir une réflectivité R_1 tendant vers 100% à la longueur d'onde d'oscillation $\lambda_a=1084$ nm. L'autre réseau incrusté dans la fibre Cr^{4+} , possède une réflectivité $R_2 = 65\%$, obtenu en optimisant la puissance crête des pulses. Le milieu actif est une fibre optique à large mode (LMA fiber) de longueur $l_a=1$ m., dopée avec une concentration d'ions Nd^{3+} de $N=40 \cdot 10^{24} m^{-3}$, et à double gaine de rayon cœur $a_a=20 \mu m$ et d'ouverture numérique $NA=0.02$, le rayon de la gaine externe est de $60.5 \mu m$ et de grande ouverture numérique $NA=0.46$. Cette gaine externe de forme hexagonale permettra une grande efficacité d'absorption de la puissance pompe. Le milieu absorbant est aussi une fibre LMA de rayon $a_s = a_a = 20 \mu m$ et de même ouverture numérique que celle dopée Nd^{3+} . Sa longueur est $l_s=0.1$ m, la concentration d'ions dopants Cr^{4+} est de $N_s = 80 \cdot 10^{22} m^{-3}$. Elle ne présente pas la caractéristique de double gaine pour éviter que la puissance pompe non absorbée par le milieu

actif ne soit absorbée par l'absorbant saturable. C'est d'ailleurs dans cette perspective que la fibre dopée Nd³⁺ a été dégainée a proximité de la soudure fibre Nd³⁺ / fibre Cr⁴⁺.

La figure 2 représente les niveaux d'énergies de l'ion Nd³⁺.et de l'ion Cr⁴⁺.Le pompage se fait à la longueur d'onde $\lambda_p = 790$ nm avec une section efficace d'absorption $\sigma_{03} = 5.6 \cdot 10^{-25}$ m² du niveau 0 vers le niveau 3.L'efficacité d'absorption de la pompe par la fibre Nd³⁺ est $k = 20\%$.L'émission laser a lieu du niveau métastable 2 de durée de vie $\tau_{21} = 500$ μ s vers le niveau 1 de durée de vie $\tau_{10} = 10$ ns à la longueur d'onde $\lambda_a = 1084$ nm avec une section efficace d'émission stimulée $\sigma_{21} = 5.8 \cdot 10^{-25}$ m² Le choix de l'ion Cr⁴⁺ comme absorbant saturable est motivé par son absorption sur une large bande et particulièrement sur la longueur d'onde d'émission laser. Il dispose en outre d'une forte section efficace d'absorption $\sigma_{s13} = 3.5 \cdot 10^{-24}$ m², et d'une faible durée de vie du niveau 2 $\tau_{s21} = 1$ μ s.Ce critère permettra d'acquérir des fréquences de répétition de l'ordre de quelques KHz.

Pour décrire le fonctionnement du laser nous avons usé du modèle ponctuel [9,10], où les équations du laser sont données par :

$$\frac{dF_a}{dt} = \left\{ \frac{F_a}{t_r} + \frac{n_a c_s}{\tau_{21}} \right\} \exp(2 n_a \sigma_{21} \Gamma_a l_a - 2 n_s \sigma_{s13} \Gamma_{sa} l_s + 2 \ln(T_s) + \ln(R_1 R_2)) - \frac{F_a}{t_r} \quad (1)$$

$$\frac{dn_a}{dt} = F_p \frac{c}{\eta_g} \sigma_{03} \Gamma_p (N - n_a) - \frac{1}{\tau_{21}} n_a - \left(\frac{c}{\eta_a} \sigma_{21} \Gamma_a \right) F_a n_a \quad (2)$$

$$\frac{dn_s}{dt} = -n_s F_a \frac{c}{\eta_s} \sigma_{s13} \Gamma_{sa} + \frac{N_s - n_s}{\tau_{s21}} \quad (3)$$

La première équation représente la variation temporelle de la densité de photons F_a dans la cavité laser. $\Gamma_p = \Gamma_a = \Gamma_{sa} = 78\%$ sont les facteurs de recouvrement du signal laser avec le profil de dopage du Nd³⁺.et du Cr⁴⁺.respectivement. $T_s = 80\%$ est le facteur de transmission de la soudure, c_s est la fraction de photons émis spontanément et qui sont guidés dans la fibre, il est de l'ordre de $2.8 \cdot 10^{-5}$, t_r est le temps d'un aller retour dans la cavité. La deuxième équation représente la variation temporelle de la densité d'inversion de population des ions Nd³⁺ n_a , $\eta_g = 1.4587$ est l'indice de la gaine de la fibre dopée Nd³⁺, $\eta_a = \eta_s = 1.46$ sont les indices du cœur de la fibre dopée Nd³⁺ et Cr⁴⁺. F_p est la densité de photons pompe, N est le nombre total d'ions Nd³⁺. La troisième équation la variation temporelle de la densité d'ions absorbant saturable (niveau 1 du Cr⁴⁺), N_s est le nombre total d'ions Cr⁴⁺.

2. Résultats et discussions :

En cherchant les points stationnaires F_a , n_a , n_s obtenus en annulant la variation temporelle dans les équations (1), (2), (3), on trouve la puissance pompe seuil P_{th} du laser pour $F_a = 0$, laquelle est donnée par :

$$P_{th} = \frac{h \nu_p \pi a_g^2}{k \sigma_{03}} \frac{2 \sigma_{s13} \Gamma_{sa} l_s N_s \frac{1}{\tau_{21}} - \frac{1}{\tau_{21}} \{2 \ln(T_s) + \ln(R_2 R_1)\}}{2 \sigma_{21} \Gamma_a l_a N - 2 \sigma_{s13} \Gamma_{sa} l_s N_s + 2 \ln(T_s) + \ln(R_2 R_1)} \quad \text{Où } a_g = 50 \cdot 10^{-6} \text{ m est le}$$

rayon effectif du signal pompe à la fréquence ν_p dans la fibre dopée Nd³⁺.

Les caractéristiques des pulses obtenus par des simulations numériques sont portés sur les figures (3), (4), (5) et (6).

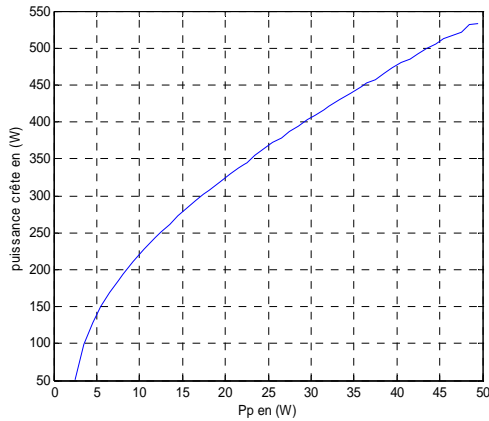


Figure-3 : Puissance crête en fonction de la puissance pompe.

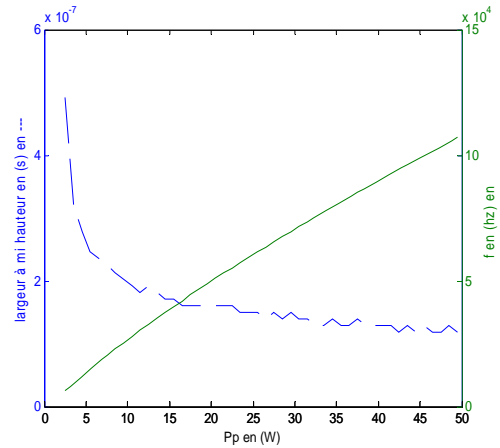


Figure-4 : Largeur à mi-hauteur et fréquences des impulsions en de la puissance pompe.

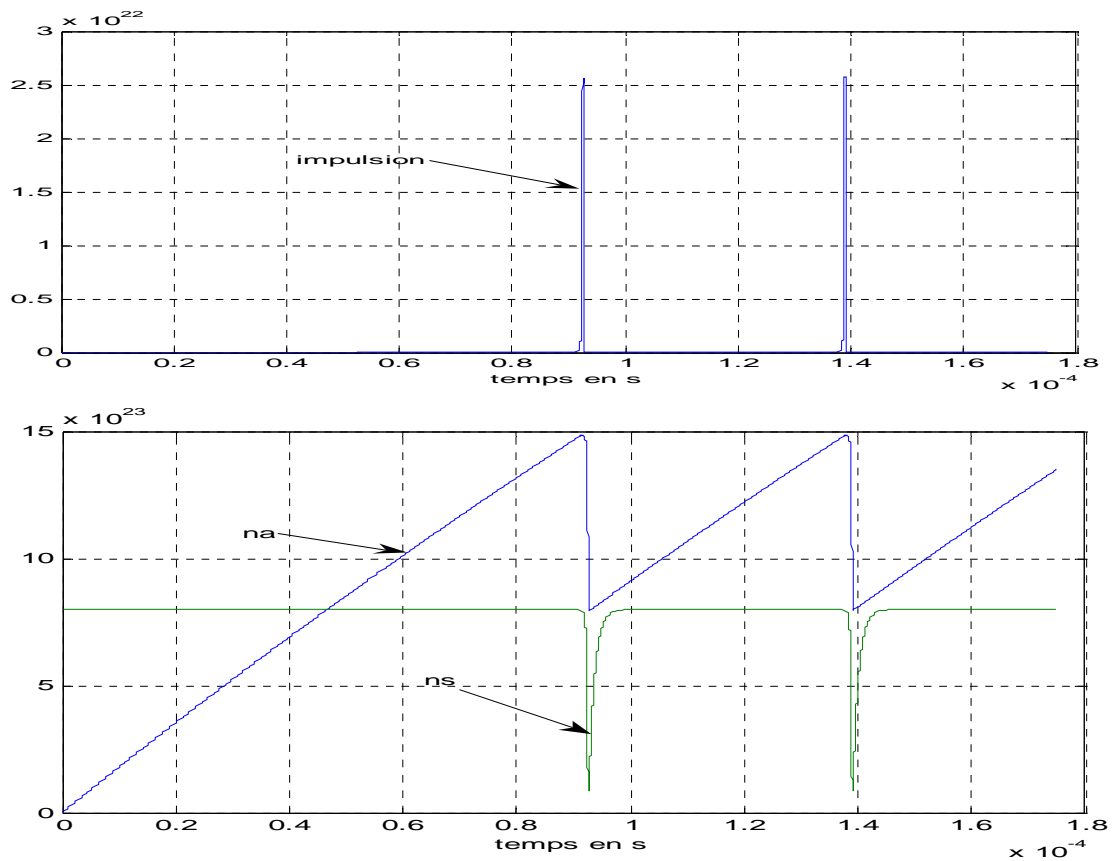


Figure-5 : Comportement auto impulsif de faible amplitude.

L'étude des différents régimes du laser proposé, par la méthode de la stabilité linéaire [12] a montré trois régimes de fonctionnement en fonction de la puissance pompe. Pour des puissances inférieures à 678 w, le laser fonctionne en régime pulsé. Notre source, qui est un combinateur multi mode 7 x 1, ne pouvant délivrer que des puissances inférieures à 50 w, justifie l'étude de l'évolution de la puissance crête, de la largeur à mi-hauteur et des fréquences des pulses en fonction de la puissance pompe (Fig. 3 et Fig.4). Sur la Fig. 3, la

puissance crête augmente d'abord très rapidement pour passer de 50 w à 220 w pour des valeurs de puissances pompe comprises entre 2.5 w à 10 w. Au-delà de ce domaine elle continue de croître mais d'une manière moins marquée pour atteindre la valeur 540 w pour une puissance pompe de 50 w. Sur la Fig. 4, la largeur à mi-hauteur des impulsions diminue avec l'augmentation de la puissance pompe, allant de 500 ns pour une puissance pompe de 2 w jusqu'à environ 120 ns pour une puissance pompe de 50 w, avec une diminution rapide aux alentours de 5 w. Par contre la fréquence de répétition des impulsions augmente d'une manière quasi linéaire avec la puissance pompe. Elle varie de 7KHz à une puissance de pompe de 2 w à une valeur de 110 KHz pour une puissance de pompe de 50 w, ce qui entraînera une augmentation très rapide de la densité de photons à l'intérieur de la cavité laser. Ceci aura pour conséquence d'induire une saturation rapide de l'absorbant saturable et une augmentation de la fréquence de répétition des impulsions. L'accroissement de la densité de photons à l'intérieur de la cavité a pour effet de stimuler l'inversion de population d'une manière plus rapide, ce qui va engendrer une diminution de la largeur à mi-hauteur des impulsions laser.

Quand la puissance de pompe dépasse le seuil de fonctionnement en impulsionnel, l'intégration directe des équations (1), (2), (3) par simulation numérique, montre deux types de comportements : un régime auto impulsionnel de faible amplitude représenté sur la Fig.-5 et un régime auto impulsionnel de grande amplitude représenté sur la Fig.-6.

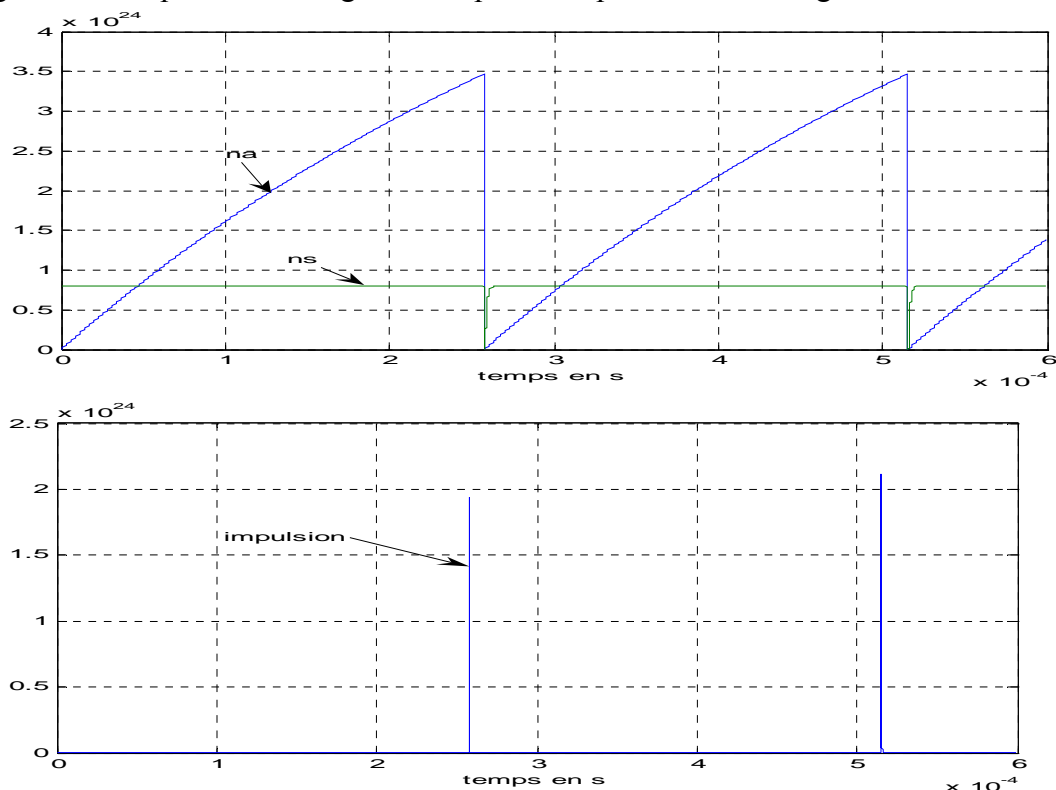


Figure-6 : Comportement auto impulsionnel de forte amplitude.

Dans le comportement auto impulsionnel de faible amplitude, l'inversion de population du milieu laser change seulement avec de petites grandeurs, chaque pulse laser extrait une petite quantité d'énergie. Quand on augmente par contre, la densité d'ions absorbants saturables Cr^{4+} ou leur section efficace d'absorption, des impulsions géantes de largeur à mi-hauteur de l'ordre de quelques dizaines de ns apparaissent. Dans ce cas chaque impulsion extrait toute l'énergie emmagasinée dans le gain du milieu laser amenant ainsi l'inversion de population à zéro. Le système doit alors disposer de temps pour ramener l'inversion de population à son

niveau précédent avant de délivrer une autre impulsion. Pour une puissance de pompe de 8 W et une section efficace de l'absorbant saturable de $18 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$ (5 fois plus grande que dans le régime de faible amplitude), les résultats donnent un temps nécessaire à l'inversion de population pour retourner à l'état d'équilibre de 0.26 ms, d'où une fréquence de répétition des impulsions de l'ordre de 4 KHz. La puissance crête des impulsions atteint quelques Kw.

3. Conclusion :

Une nouvelle architecture d'un laser entièrement fibré dopé Nd^{3+} passivement Q-déclenché par un absorbant saturable dopé Cr^{4+} est proposée et étudiée en régime impulsionnel. L'évolution des caractéristiques du pulse laser tel que sa puissance crête, sa largeur à mi-hauteur, et sa fréquence de répétition ont été étudiées en fonction de la puissance pompe fournie par un combineur de diodes laser. Par ailleurs, les simulations numériques ont montré deux régimes de fonctionnement, un régime auto impulsionnel de faible amplitude et un régime auto impulsionnel de grande amplitude. Ce dernier est obtenu en augmentant la densité d'ions absorbants saturables Cr^{4+} , ou leurs sections efficaces d'absorption permettent d'obtenir des impulsions géantes dépassant le Kw et de fréquence de répétition de l'ordre de 4 KHz.

4. Bibliographie :

- [1] Jeffrey A. Morris and Clifford R. Pollock "Passive Q-switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with a saturable absorber" OPTICS LETTERS, Vol. 15, No. 8, April 15, 1990.
- [2] P. Adel, M. Auerbach, C. Fallnich, S. Unger, H. R. Müller, J. Kirchhof "Passive Q-switching by Tm^{3+} -co-doping of a Yb^{3+} -fiber laser" OPTICS EXPRESS, Vol. 11, No. 21, October 20, 2003.
- [3] Yong Wang and Chang-Qing Xu "Modeling and optimization of Q-switched double-clad fiber lasers" APPLIED OPTICS, Vol. 45, No. 9, March 20, 2006.
- [4] J. Y. Huang, H. C. Liang, K. W. Su, and Y. F. Chen "High power passively Q-switched ytterbium fiber laser with Cr^{4+} :YAG as a saturable absorber" OPTICS EXPRESS, Vol. 15, No. 2, January 22, 2007.
- [5] M. Laroche, A. M. Chardon, J. Nilsson, D. P. Shepherd, and W. A. Clarkson "Compact diode-pumped passively Q-switched tunable Er-Yb double-clad fiber laser" OPTICS LETTERS Vol. 27, No. 22 November 15, 2002.
- [6] L. Tordella, H. Djellout, B. Dussardier, A. Saïssy, and G. Monnom "High repetition rate passively Q-switched Nd^{3+} : Cr^{4+} all-fiber laser" ELECTRONICS LETTERS, Vol. 39 No. 18 Sept 4, 2003.
- [7] V. V. Dvoyrin, V. M. Mashinsky, and E. M. Dianov "Yb-Bi pulsed fiber lasers" OPTICS LETTERS, Vol. 32, No. 5 March 1, 2007.
- [8] A. S. Kurkov, E. M. Sholokhov, and O. I. Medvedkov "All fiber Yb-Ho pulsed laser" Laser Phys. Lett. 6, No. 2, (2009).
- [9] John J. Degnan "Theory of the Optimally Coupled Q-Switched Laser" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS Vol. 25, No. 2, February 1989.
- [10] John J. Degnan "Optimization of Passively Q-Switched Lasers" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS Vol. 31, No. 11, November 1995.