



**HAL**  
open science

# RÉDUCTION DU PHOTO-NOIRCISSEMENT PAR UN CO-DOPAGE AU LANTHANE OU AU CÉRIUM DES FIBRES OPTIQUES DOPÉES AU THULIUM POMPÉES À 1070 NM

Jean-François Lupi, Manuel Vermillac, Michèle Ude, Stanislaw Trzesien, Franck Mady, Mourad Benabdesselam, Wilfried Blanc, Bernard Dussardier

► **To cite this version:**

Jean-François Lupi, Manuel Vermillac, Michèle Ude, Stanislaw Trzesien, Franck Mady, et al.. RÉDUCTION DU PHOTO-NOIRCISSEMENT PAR UN CO-DOPAGE AU LANTHANE OU AU CÉRIUM DES FIBRES OPTIQUES DOPÉES AU THULIUM POMPÉES À 1070 NM. Journées Nationales d'Optiques Guidées (Congrès Optique Bretagne 2015), Société Française d'Optique, Jul 2015, Rennes, France. hal-01171080

**HAL Id: hal-01171080**

**<https://hal.science/hal-01171080>**

Submitted on 2 Jul 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# RÉDUCTION DU PHOTO-NOIRCISSEMENT PAR UN CO-DOPAGE AU LANTHANE OU AU CÉRIUM DES FIBRES OPTIQUES DOPÉES AU THULIUM POMPÉES À 1070 NM.

Jean-François Lupi<sup>1</sup>, Manuel Vermillac<sup>1</sup>, Michèle Ude<sup>1</sup>, Stanislaw Trzesien<sup>1</sup>, Franck Mady<sup>1</sup>,  
Mourad Benabdesselam<sup>1</sup>, Wilfried Blanc<sup>1</sup> et Bernard Dussardier<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Université Nice Sophia Antipolis, Laboratoire de Physique de la Matière  
Condensée, CNRS UMR 7336, Parc Valrose 06108 Nice

[jean-francois.lupi@unice.fr](mailto:jean-francois.lupi@unice.fr)

## RÉSUMÉ

Les fibres optiques dopées au thulium pompées à 1,07  $\mu\text{m}$  offrent la perspective de lasers et amplificateurs fonctionnant à de nouvelles longueurs d'onde. Ce système permet d'envisager de nombreuses transitions optiques encore inexploitées dans des fibres à base de silice. Le principal verrou technologique de ce système est le photo-noircissement. Nous présentons ici la réduction du photo-noircissement en co-dopant la silice avec du cérium ou du lanthane. Un modèle pour le photo-noircissement est proposé. Ce modèle implique un processus séquentiel faisant intervenir un défaut et un changement de valence de  $\text{Tm}^{3+}$  en  $\text{Tm}^{2+}$ . Les effets bénéfiques du co-dopant sont aussi expliqués grâce à ce modèle.

**MOTS-CLEFS :** *fibre ; photo-noircissement ; thulium ; cérium ; lanthane.*

## 1. INTRODUCTION

Les lasers et les amplificateurs à fibre optique à base de silice sont grandement répandus dans l'industrie, les télécommunications et le médical. Ceci est dû aux avantages combinés de la silice, de la structure de guidage et du dopage aux ions amplificateurs. La silice donne une forte tenue à la puissance. Le dopage aux terres rares apporte de larges plages spectrales d'amplification et de fortes efficacités. Le guidage permet d'assurer une bonne gestion thermique, une bonne stabilité et une forte interaction entre lumière et milieu amplificateur. Les sources et amplificateurs fibrés sont à l'heure actuelle restreints au proche infra-rouge (à 1, 1,5 et 1,9  $\mu\text{m}$ ) [1]. Le développement de nouveaux besoins conduit à envisager de nouvelles longueurs d'onde d'émission.

Le thulium trivalent ( $\text{Tm}^{3+}$ ) possède jusqu'à sept transitions de 0,47 à 1,9  $\mu\text{m}$ , excitables par un pompage vers 1,07  $\mu\text{m}$  [2]. Le verre habituel (alumino-silicate) dopé au thulium présente des limitations du fait des déclins non-radiatifs [2] et du photo-noircissement (PN) [2,3]. Le PN est surtout étudié dans les lasers dopés  $\text{Yb}^{3+}$  : une solution commerciale repose sur le dopage au cérium ( $\text{Ce}^{4+}$ ) [4]. Dans la littérature, le PN des fibres dopées  $\text{Yb}^{3+}$  est expliqué par l'émission coopérative de photons UV dus aux agrégats d'ions de terres rares. Le lanthane ( $\text{La}^{3+}$ ) peut réduire les effets dus aux agrégats comme il a été démontré pour la fluorescence verte des ions  $\text{Er}^{3+}$  [5]. Cette communication traite du photo-noircissement dans une fibre dopée aux ions  $\text{Tm}^{3+}$ , observé en pompant à 1,07  $\mu\text{m}$ , de la réduction de celui-ci par l'ajout de co-dopants comme  $\text{La}^{3+}$  ou  $\text{Ce}^{4+}$  et d'un modèle proposé pour décrire l'influence de ces co-dopants sur le PN.

## 2. MESURE DE L'EFFET DU LANTHANE ET DU CÉRIUM SUR LE PN

Deux séries d'échantillons sont fabriquées. Dans la première série, la concentration en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et en  $\text{Tm}^{3+}$  restent constantes respectivement à 2 mol % et 700 ppm at., alors que la concentration en  $\text{La}^{3+}$  varie de 600 à 3000 ppm at.. Dans la deuxième série, la concentration en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et en  $\text{Tm}^{3+}$  restent constantes, respectivement à 2 mol % et 550 ppm at., alors que la concentration en Ce varie de 0 à 600 ppm at. Les spectres d'absorption mettent clairement en évidence la présence de  $\text{Ce}^{3+}$ . Cependant, il a été montré que sous certaines conditions de fabrication,  $\text{Ce}^{3+}$  peut être oxydé pour former majoritairement du  $\text{Ce}^{4+}$  [6].

Pour ces deux séries, l'atténuation photo-induite est estimée en mesurant le rapport du signal sonde à  $0,55 \mu\text{m}$  avant et après une exposition de 30 min à la pompe ( $1,07 \mu\text{m}$  ;  $0,75 \text{ W}$  pompage dans le coeur). La figure 1 montre les coefficients d'absorption induite pour les différents échantillons. L'augmentation de la concentration en ions  $\text{La}^{3+}$  et  $\text{Ce}^{4+}$  induit une diminution du photo-noircissement. Les deux séries d'échantillons n'ont pas la même valeur de l'ordonnée à l'origine du fait des différences de concentrations en  $\text{Tm}^{3+}$  [2].

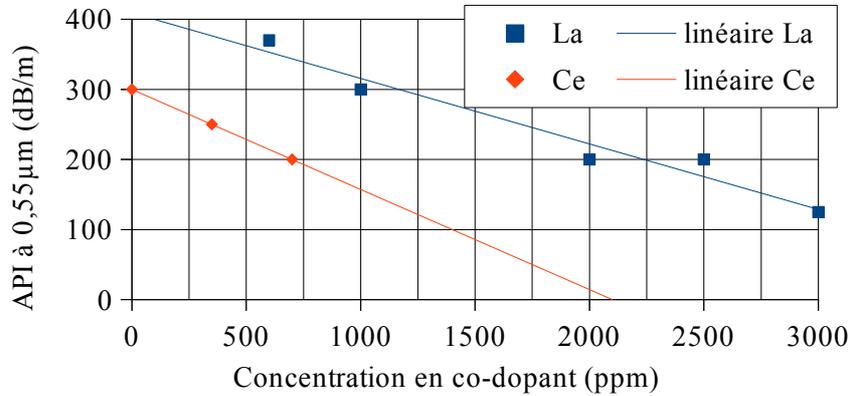


Fig. 1 : Atténuation photo-induite (API) en fonction de la concentration de co-dopant.

### 3. MODÈLE

Dans cette partie, un modèle simple est proposé pour décrire le processus de photo-noircissement, schématisé sur la figure 2. Il est décomposé en trois étapes détaillées par la suite:

1. La pompe interagit avec des agrégats de  $\text{Tm}^{3+}$ , ceci conduisant à l'émission de photons UV.
2. Les UV ionisent des défauts de la matrice, plaçant un électron dans la bande de conduction.
3. L'électron se recombine sur un ion  $\text{Tm}^{3+}$  pour donner un ion  $\text{Tm}^{2+}$ , absorbant dans le visible.

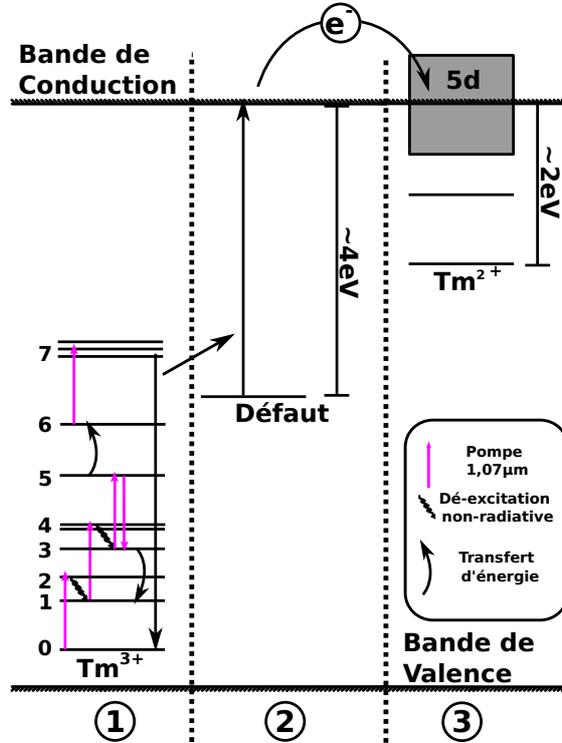


Fig. 2 : (1): interaction pompe  $\text{Tm}^{3+}$ . (2): ionisation des défauts. (3): réduction  $\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{2+}$ .

Les sept premiers niveaux d'énergie de  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $^3\text{H}_6$ ,  $^3\text{F}_4$ ,  $^3\text{H}_5$ ,  $^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{F}_{2,3}$ ,  $^1\text{G}_4$ ,  $^1\text{D}_2$  et  $^3\text{P}_{0,1,2}$ , sont numérotés de 0 à 7 sur la figure 2. Par absorptions successives de la pompe, un échange d'énergie

(3,5)  $\rightarrow$  (1,6) puis une quatrième absorption, les ions  $\text{Tm}^{3+}$  sont excités depuis l'état fondamental vers le niveau 7. Ce niveau émet dans l'UV, vers 290 nm [7]. Le rayonnement UV est connu pour activer des défauts dans la silice. Dans notre matériau, la nature, l'origine, et les caractéristiques des défauts ne sont pas encore identifiés. Par conséquent, le modèle est réduit à un seul type de défaut absorbant à 290 nm. L'électron libéré par l'ionisation du défaut peut se recombinaison avec un ion  $\text{Tm}^{3+}$  pour former un ion  $\text{Tm}^{2+}$ . Cet ion bivalent présente une très large bande d'absorption entre 300 et 800 nm [8], domaine de longueurs d'onde pour lequel nous avons observé l'apparition d'une atténuation photo-induite. Les transitions de  $\text{Tm}^{2+}$  sont de type 4f-5d, dont la force d'oscillateur est deux à trois ordres de grandeurs supérieure à celle des transitions 4f-4f de  $\text{Tm}^{3+}$ . Ainsi, même si le mécanisme de conversion  $\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{2+}$  a une faible probabilité, une faible concentration en ions  $\text{Tm}^{2+}$  peut avoir un effet non négligeable en absorption. L'absorption par des ions  $\text{Tm}^{2+}$  est ainsi en accord avec les spectres d'atténuation photo-induite mesurés expérimentalement.

Pour discuter des effets du lanthane et du cérium, il faut noter que le premier ne peut être que trivalent et que le cérium peut être tri- ou tétravalent [9]. L'ion  $\text{La}^{3+}$  est optiquement neutre, les ions  $\text{Ce}^{3+}$  et  $\text{Ce}^{4+}$  sont transparents dans le visible. L'effet du La sur le noircissement est alloué à un effet d'encombrement (comme pour la fluorescence verte de l'ion  $\text{Er}^{3+}$  [5]). L'ion  $\text{Ce}^{4+}$  peut jouer le rôle de piège à électron, qui en l'absence de cérium aurait créé un ion  $\text{Tm}^{2+}$ , se transformant ainsi en un ion  $\text{Ce}^{3+}$  transparent dans le visible et le proche IR. Les ions cérium (III et IV) peuvent aussi absorber les UV et donc limiter l'ionisation des défauts. Enfin le cérium peut aussi avoir un effet d'encombrement comme  $\text{La}^{3+}$ .

Le modèle proposé demande à être confirmé par de nouvelles expérimentations, comme par exemple des expériences de photo-noircissement aux UV. En effet, si l'ion  $\text{La}^{3+}$  agit bien comme on le suppose, il ne devrait pas avoir d'effet sur le noircissement aux UV. Par contre, si l'ion  $\text{Ce}^{4+}$  agit comme piège ou par absorption des UV, il aura un effet sur le noircissement UV.

#### CONCLUSION

La possibilité de réduire le photo-noircissement des fibres optiques dopées  $\text{Tm}^{3+}$  pompées à 1,07  $\mu\text{m}$  par l'ajout de lanthane ou de cérium a été montrée. Un modèle simple rendant compte du photo-noircissement, de l'impact du lanthane et du cérium a été proposé. Le modèle peut être facilement étendu, en y ajoutant le phénomène inverse au PN : le photo-blanchiment. Cela sera discuté lors de la conférence. La compréhension de ce mécanisme permettra d'envisager de nouvelles applications.

#### RÉFÉRENCES

- [1] D.J. Richardson, J. Nilsson, & W.A. Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited]. *JOSA B*, 27(11), B63-B92, 2010.
- [2] J. F. Lupi, M. Vermillac, W. Blanc, & B. Dussardier. Spectroscopie du thulium pompé à 1070 nm dans une fibre aluminosilicate. Fluorescence, photo-noircissement et simulation. *34e JNOG, Nice(2014)*
- [3] M.M. Broer, D.M. Krol, & D.J. DiGiovanni. Highly nonlinear near-resonant photodarkening in a thulium-doped aluminosilicate glass fiber. *Optics letters* 18.10 : 799-801, 1993.
- [4] M. Engholm, et al. "Improved photodarkening resistivity in ytterbium-doped fiber lasers by cerium codoping." *Optics letters* 34.8 : 1285-1287, 2009.
- [5] J.L. Philipsen, J. Broeng, A. Bjarklev, S. Helmfriid, D. Bremberg, B. Jaskorzynska, & B. Palsdonir. Observation of strongly nonquadratic homogeneous upconversion in  $\text{Er}^{3+}$ -doped silica fibers and reevaluation of the degree of clustering. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 35(11), 1741-1749, 1999.
- [6] W.D. Johnston. Oxidation-Reduction Equilibria in Molten  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$  Glass. *Journal of the American Ceramic Society*, 48(4), 184-190, 1965.
- [7] R. Paschotta, P.R. Barber, A.C. Tropper, & D.C. Hanna. Characterization and modeling of thulium: ZBLAN blue upconversion fiber lasers. *JOSA B*, 14(5), 1213-1218, 1997.
- [8] Y. H. Kim, U.C. Paek, W.T. Han, & J. Heo. Absorption and emission properties of  $\text{Tm}^{2+}$  ions in germanosilicate glass fibers. *Optics Express*, 11(21), 2672-2678, 2003.
- [9] P. Dorenbos. Anomalous luminescence of  $\text{Eu}^{2+}$  and  $\text{Yb}^{2+}$  in inorganic compounds. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 15(17), 2645, 2003.