

Stage de Master 1 ou 2 ou Ingénieur à l'INPHYNI (Nice): *(english version in page 2)*

Configuration pompe-sonde de la Spectroscopie Résolue en Fréquence appliquée aux fibres optiques amplificatrices dopées aux terres rares.

Contexte :

Le développement de nouvelles fibres optiques amplificatrices dopées aux ions de terre rare (Er^{3+} , Yb^{3+} , Tm^{3+} , etc.) permettent de fabriquer des sources lasers très efficaces pour de très nombreux domaines d'application : santé, surveillance environnementale, sécurité, etc. Leur caractérisation spectroscopique s'effectue généralement dans le domaine temporel (*time resolved spectroscopy*, TRS) en utilisant plusieurs techniques complémentaires. Une méthode intégrée, multifactorielle, permettant d'extraire simultanément plusieurs paramètres est nécessaire pour caractériser rapidement le potentiel d'une nouvelle composition du matériau en développement ou d'une application. Des techniques alternatives opérant dans le domaine fréquentiel (FRS) ont montré des avantages intéressants dans les systèmes complexes, notamment la détermination de durées de vie multiples ou distribuées dans les domaines des semi-conducteurs et de la biophysique. [1]. Toutefois, la FRS n'a été appliquée aux matériaux amplificateurs dopés aux terres rares que très rarement [2], malgré sa grande adaptabilité à l'étude de phénomènes complexes [3].

Nous développons une variante dite « pompe-sonde » (*pump-probe FRS*). Bien que déjà proposée [4], elle doit être améliorée et diversifiée aux enjeux actuels. Elle s'appuie sur la modélisation dynamique des équations de taux. La *ppFRS* permet en principe d'extraire simultanément un certain nombre de grandeurs spectroscopiques, grâce au nombre élevé de degrés de liberté orthogonaux des faisceaux optiques traversant l'échantillon. Nous avons réussi à extraire simultanément au moins trois grandeurs spectroscopiques de l'ion Er^{3+} , avec une très bonne fidélité (voir figure).

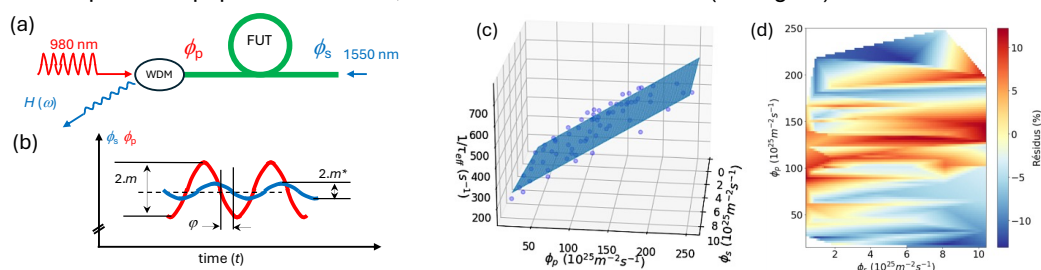


Fig.1 (a,b) Principe de la *ppFRS* pour Er^{3+} . WDM : multiplexeur 980/1550. FUT : fibre dopée Er^{3+} , ϕ_s et ϕ_p : intensités de pompe (modulée) et de sonde continue, $H(\omega)$: fonction de transfert de la modulation de la pompe vers la sonde. m , m^* et φ : paramètres de $H(\omega)$. (c) Taux de relaxation effectifs $1/\tau_{\text{eff}}$ (s^{-1}) en fonction de ϕ_p et ϕ_s , et ajustement au modèle par une nappe affine. (d) Résidu entre modèle et données dans l'espace ϕ_p - ϕ_s , inférieur à ceux obtenus par les méthodes complémentaires et disjointes.

Stage:

L'objectif de ce stage expérimental est d'adapter la *ppFRS* à des échantillons de fibres réalisées au laboratoire, de compositions différentes, dopés aux ions thulium (Tm^{3+}) servant aux sources lasers à $2 \mu\text{m}$. La spectroscopie de Tm^{3+} étant complexe, la méthode expérimentale est soutenue par un modèle multi-niveaux, voire multi-sites, servant à ajuster les paramètres sur les données expérimentales. Pour cela, l'expérience existante sera modifiée, partiellement automatisée afin d'accélérer la collecte des données et leur traitement, et les données collectées permettront d'ajuster les nombreux paramètres de la spectroscopie complexe des ions Tm^{3+} . On attend des résultats inédits quant à la distribution des ions Tm^{3+} dans le matériau des fibres fabriquées au laboratoire, et leur dynamique associée, qu'on doit quantifier pour développer des sources dans le moyen infrarouge.

Profil recherché :

La/le candidat(e) sera en Master 1 ou Master 2 en physique/photonique, ou en dernière année d'école d'ingénieur. On recherche une personnalité rigoureuse, curieuse et communicante, tant à l'écrit qu'à l'oral. La connaissance du français n'est pas exigée, mais dans ce cas, un niveau en anglais B2 est demandé.

- **Durée** : 3 mois, à partir d'avril (M1) ou 5-6 mois à partir de février (M2 ou Ingénieur).
- **Gratification** : ~ 660 €/mois (taux 2025)

Contact : Bernard DUSSARDIER : bernard.dussardier@univ-cotedazur.fr

Nom du Laboratoire : Institut de Physique de Nice (INPHYNI), 17 rue Julien Lauprêtre, 06200 Nice

Site Internet : <https://inphyni.univ-cotedazur.fr/>

- [1] S. P. Depinna & D. J. Dunstan, "Frequency-resolved spectroscopy and its application to the analysis of recombination in semiconductors," *Philosophical Magazine B* **50**, 579–597 (1984).
- [2] M. Brunel, et al. "A simple method to measure the lifetime of excited levels of rare earth ions: application to erbium ions in fluorophosphate glasses," *Optical Materials* **5**, 209–215 (1996).
- [3] L. Strizik, et al., "Quadrature frequency resolved spectroscopy of upconversion photoluminescence in GeGaS:Er^{3+} : I. Determination of energy transfer upconversion parameter," *J Mater Sci: Mater Electron* **28**, 7053–7063 (2017).
- [4] E. Magden, P. Callahan, N. Li, J. Bradley, N. Singh, A. Ruocco, L. Kolodziejki, E. P. Ippen, and M. R. Watts, "Frequency Domain Spectroscopy in Rare-Earth-Doped Gain Media," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **PP**, 1–1 (2018).

Proposal for a Master 1 or 2 internship or Engineering at INPHYNI (Nice): :

Frequency Resolved Spectroscopy in pump-probe configuration applied to rare-earth-doped amplifying optical fibres.

Context :

The development of new amplifying optical fibers doped with rare earth ions (Er^{3+} , Yb^{3+} , Tm^{3+} , etc.) makes it possible to manufacture highly efficient laser sources for a wide range of application areas : health, environmental monitoring, security, etc. Their spectroscopic characterization is generally carried out in the time domain (time resolved spectroscopy, *TRS*) using several complementary techniques. An integrated, multifactorial method allowing the simultaneous extraction of several parameters is necessary to rapidly characterize the potential of a new composition of the material under development or of an application. Alternative techniques operating in the frequency domain (*FRS*) have shown interesting advantages in complex systems, notably the determination of multiple or distributed lifetimes in the fields of semiconductors and biophysics. [1]. However, *FRS* has only very rarely been applied to rare earth doped amplifying materials [2], despite its great adaptability to the study of complex phenomena [3].

We are developing a "pump-probe" variant (*ppFRS*). Although already proposed [4], it needs improvements and diversification to address current challenges. It is based on dynamic modeling of rate equations. In principle, *ppFRS* allows for the simultaneous extraction of a number of spectroscopic quantities, thanks to the high number of orthogonal degrees of freedom of the optical beams passing through the sample. We have successfully extracted at least three spectroscopic quantities from the Er^{3+} ion simultaneously, with very good fidelity (see figure).

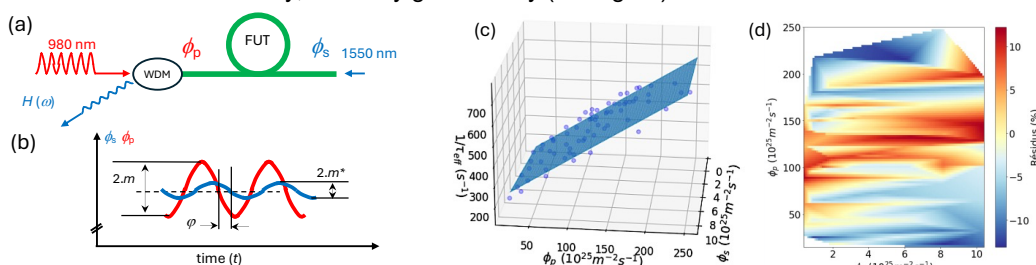


Fig.1 (a,b) Schematic of *ppFRS* for Er^{3+} . WDM : 980/1550 wavelength demultiplexer. FUT : Er -doped fibre, ϕ_p and ϕ_s : pump (modulated) and probe (CW) intensities, $H(\omega)$: transfer function from modulated pump to probe. m , m^* and φ : parameters of $H(\omega)$. (c) Effective relaxation rate $1/\tau_{\text{eff}}$ (s^{-1}) vs. ϕ_p and ϕ_s , and fitting to model by an affine surface. (d) Residue between model and data in the ϕ_p - ϕ_s space. The residue is less than from complementary and separated methods.

Internship:

The objective of this experimental internship is to adapt *ppFRS* to samples of fibres made in our institute, of different compositions, doped with thulium ions (Tm^{3+}) used for $2\ \mu\text{m}$ laser sources. Since Tm^{3+} spectroscopy is complex, the experimental method is supported by a multi-level, or even multi-site, model used to adjust the parameters on the experimental data. For this, the existing experiment will be modified, partially automated in order to accelerate data collection and processing, and the collected data will allow adjusting the numerous parameters of the complex spectroscopy of Tm^{3+} ions. We expect new results regarding the distribution of Tm^{3+} ions in the home-made fibre material, and their associated dynamics, which must be quantified to develop sources in the mid-infrared.

Required profile :

The candidate will be in Master 1 or Master 2 in physics/photonics, or in the final year of engineering school. We are looking for a rigorous, curious personality, with good written and oral communication skill. Knowledge of French is not required. In this case, a level in English B2 is required.

Duration : 3 months from April (1st year Master) or 5-6 months from February (2nd year Master or final of eng. school)

Internship stipend : ~660 €/month (as for 2025)

Contact : Bernard DUSSARDIER : bernard.dussardier@univ-cotedazur.fr

Institute : Institut de Physique de Nice (INPHYNI), 17 rue Julien Lauprêtre, 06200 Nice

Website: <https://inphyni.univ-cotedazur.fr/>

- [1] S. P. Depinna & D. J. Dunstan, "Frequency-resolved spectroscopy and its application to the analysis of recombination in semiconductors," *Philosophical Magazine B* **50**, 579–597 (1984).
- [2] M. Brunel, et al. "A simple method to measure the lifetime of excited levels of rare earth ions: application to erbium ions in fluorophosphate glasses," *Optical Materials* **5**, 209–215 (1996).
- [3] L. Strizik, et al., "Quadrature frequency resolved spectroscopy of upconversion photoluminescence in GeGaS:Er^{3+} : I. Determination of energy transfer upconversion parameter," *J Mater Sci: Mater Electron* **28**, 7053–7063 (2017).
- [4] E. Magden, P. Callahan, N. Li, J. Bradley, N. Singh, A. Ruocco, L. Kolodziejski, E. P. Ippen, and M. R. Watts, "Frequency Domain Spectroscopy in Rare-Earth-Doped Gain Media," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **PP**, 1–1 (2018).