HAL open science

Mesures spectrales distribuées le long d'une nanofibre optique en régime non linéaire

Yosri Haddad, Jean-Charles Beugnot, Samuel Margueron, Gil Fanjoux

To cite this version:

Yosri Haddad, Jean-Charles Beugnot, Samuel Margueron, Gil Fanjoux. Mesures spectrales distribuées le long d'une nanofibre optique en régime non linéaire. Congrès général Optique de la Société Française d'Optique, Jul 2022, Nice, France. ⟨hal-03831615⟩

HAL Id: hal-03831615

https://hal.science/hal-03831615v1

Submitted on 27 Oct 2022

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.

Autorisation HAL

HAL Authorization

Mesures spectrales distribuées le long d'une nanofibre optique en régime non linéaire

Yosri Haddad, Jean-Charles Beugnot, Samuel Margueron & Gil Fanjoux

FEMTO-ST Institute, UMR 6174 CNRS / Université Bourgogne Franche-Comté, 15B avenue des Montboucons, 25030 Besançon - France

gil.fanjoux@univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ

Ce travail expérimental et numérique présente l'évolution spectrale en régime non linéaire (cascade Raman, et supercontinuum) du champ guidé le long d'une nanofibre optique de longueur centimétrique et de taille submicrométrique par analyse de la diffusion Rayleigh.

MOTS-CLEFS : *nanofibre optique; Diffusion Rayleigh; Cascade Raman; Supercontinuum*

1. INTRODUCTION

Les évolutions spectrales sont principalement réalisées à l'heure actuelle en sortie de guide d'onde en fonction de la puissance injectée, et comparées aux simulations numériques pour prédire la propagation longitudinale du champ le long du guide. Cependant, les mesures simultanées spatiales et spectrales de la lumière guidée en régime linéaire et non linéaire représentent un défi expérimental crucial pour la rétro-ingénierie, afin d'améliorer la fabrication des guides d'ondes, ou pour la comparaison avec les prédictions théoriques de la propagation du champ. Dans ce but, nous avons récemment développé une méthode expérimentale non-destructive et non-invasive afin de caractériser spatialement et spectralement la lumière guidée le long d'une nanofibre optique [1]. Cette technique non-destructive et non-invasive repose sur l'analyse de la lumière rayonnée par un guide en fonctionnement par diffusion Rayleigh (DR) à l'aide d'un micro-spectromètre confocal.
Ce travail présente l'évolution longitudinale d'une cascade Raman ainsi que la génération d'un supercontinuum (SC) le long d'une nanofibre optique de longueur centimétrique et de largeur submicrométrique. Ces analyses nous ont permis de réaliser une mesure directe du gan Raman pour 3 ordres Stokes, ainsi que d'observer pour la 1ière fois le développement d'un supercontinuum le long d'une nanofibre.

2. DÉTAILS EXPÉRIMENTAUX

Deux nanofibres optiques ont été étudiées dans ce travail, la première correspond à une nanofibre fabriquée à partir d'une fibre standard monomode télécom (G652D) nommée par la suite G652D-NF, la seconde à partir d'une fibre standard monomode dans la gamme de longueurs d'onde visible (SM450) et nommée par la suite SM450-NF. Elles sont caractérisées par un diamètre de 690 nm uniforme sur une longueur de 20 mm et reliée par deux sections coniques de longueur d'environ 48 mm aux deux extrémités non-étirées de la fibre standard (comme montré sur la figure 2(b)). En régime non-linéaire de propagation, la difficulté des mesures correspond à la détection d'un signal de diffusion très faible. Cependant, la détection a été rendue possible par le faible niveau de détection du détecteur CCD refroidi à -85°C du spectromètre, et par un temps long d'exposition (entre 3 et 10 min). En outre, pour l'étude de la cascade Raman, les mesures distribuées ont étés réalisées uniquement pour la partie homogène de la nanofibre, là où le processus de diffusion est maximale et constante [1,2]. Il est important de noter ici qu'aucun traitement du signal a été réalisé et que les mesures brutes donnent directement une comparaison quantitative entre les spectres.

3. MESURES DISTRIBUÉES D'UNE CASCADE RAMAN DANS UNE NANOFIBRE

Nous avons étudié en premier lieu la nanofibre G652D-NF en régime de cascade Raman. La source correspond à un laser Nd-YAG doublé en fréquence, de durée d'impulsion 500 ps, et de taux de répétition 21 kHz. La figure 1(a) montre l'évolution du spectre le long de la partie homogène de la nanofibre pour une puissance crête de 120 W. Le processus de cascade Raman est clairement visible avec la génération de plusieurs ordres Raman Stokes (ORS) et anti-Stokes (ORAS). Même si la longueur de la nanofibre est courte (2 cm), l'amplification Raman est efficace en raison du fort confinement des modes guidés induit par la réduction de leurs aires effectives. Par ailleurs, la figure 1(b) compare le premier et le dernier spectre, et montre la dynamique de la mesure (environ 36 dB) permettant l'observation claire de l'évolution spectrale. La figure 1(c) représente l'évolution du logarithme naturel des intensités des trois 1ers ORS en fonction de la distance de propagation. L'amplification exponentielle des ordres Raman est clairement visible, depuis leur génération jusqu'à la déplétion de leurs pompes. La pente linéaire représente le gain Raman par millimètre (pointillé sur Fig. 1(c)). Le 1er ORS présente une pente d'environ $91\ m^{-1}$, $199\ m^{-1}$ pour le 2nd ORS, et $280\ m^{-1}$ pour le 3ième ORS. La théorie prédit que la pente est multipliée par un facteur deux entre le 1er et le 2nd ORS, et par un facteur trois entre le 1er et le 3ième ORS. Par ailleurs, le calcul théorique du gain du 1er ORS [3] donne un encadrement entre 30 et $90\ m^{-1}$ selon l'estimation de la puissance pompe au niveau de l'entrée de la NF. Les mesures expérimentales montrent donc que l'évolution des spectres est en bon accord quantitatif avec la théorie [3,4].

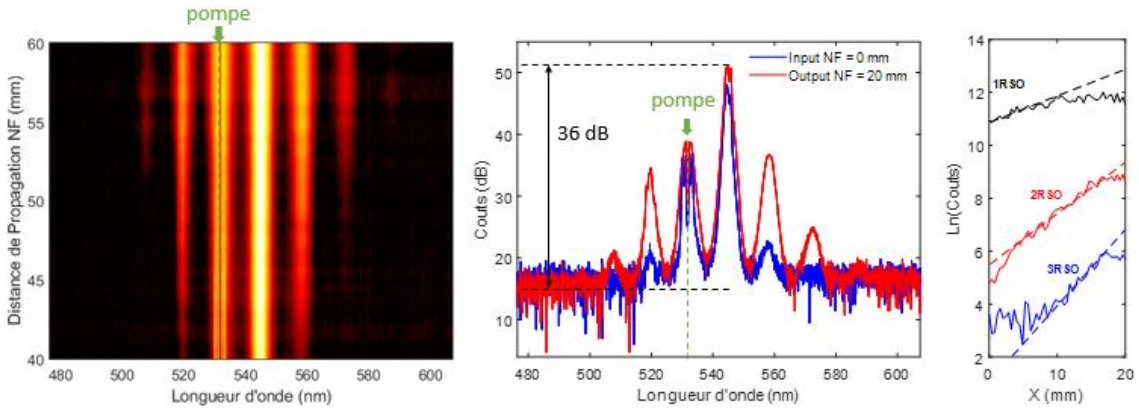

Figure 1. (a) Évolution de la cascade Raman le long de la région de la NF. (b) Le spectre d'entrée (courbe bleue) et de sortie (courbe rouge) pour la NF. (c) Évolution du logarithme naturel des intensités des différents ORS avec la distance de propagation X. Les lignes pointillées sont utilisées pour estimer les pentes.

4. MESURES DISTRIBUÉES DE LA GÉNÉRATION DE SUPERCONTINUUM

La génération de supercontinuum a été réalisé dans la nanofibre SM450-NF avec un pompage par un laser Nd:YAG doublé en fréquence, de durée d'impulsion 36 ps, et de taux de répétition de 100 kHz. Le laser est d'abord injecté dans une fibre à petit cœur (SM600) permettant de contrôler l'injection dans la fibre SM450. La Fig.2(a) montre les positions des différents spectres mesurés le long de la nanofibre avec soit l'analyseur de spectre optique OSA (spectres 1 et 5) soit avec notre technique (spectres 2 à 4). La Fig. 2(b) montre les spectres correspondants pour une puissance crête de 340 W. Le temps d'exposition du détecteur du spectromètre est typiquement de 3 min pour les deux spectres 3 et 4, et de 10 min pour le spectre 2 afin d'augmenté le niveau du signal détecté. Cette différence de temps d'exposition s'explique par le fait que le cœur de la fibre standard présente un niveau de diffusion très faible par rapport à la diffusion au niveau de la nanofibre [1].

Tout d'abord, avant la fibre étirée (entre spectres 1 et 2), le spectre se développe côté Stokes et anti-Stokes par cascade Raman classique dans la fibre standard. Cette évolution spectrale résulte de la propagation du mode fondamental guidé le long de la fibre SM450 de longueur d'environ 1 m, et caractérisé par une aire effective faible augmentant par conséquent l'intensité du champ. Puis, dans la

transition 1, la comparaison des spectres 2 et 3 montre un élargissement spectral côté anti-Stokes important, sans changement significatif pour les composants spectraux côté Stokes. Ceci est dû à la forte variation de la dispersion le long de la transition 1 avec une longueur d'onde de dispersion nulle se décalant de 1300 nm à 490 nm. Cette dispersion permet notamment des processus de mélange à quatre ondes induisant des amplifications symétriques des composantes spectrales. Après la propagation le long de la nanofibre, le spectre 4 montre la présence d'une onde dispersive (OD) située à une longueur d'onde d'environ 415 nm. La position de l'OD peut être prédite par une équation analytique d'accord de phase avec les coefficients de dispersion de la nanofibre. Enfin, la comparaison entre les spectres 4 et 5 montre que l'ensemble des caractéristiques du spectre SC sont déjà présentes à l'extrémité de la nanofibre (spectre 4). Cependant, une différence est observée dans la région anti-Stokes certainement due à la différence de dynamique des mesures pour notre système (43 dB) par rapport à la dynamique obtenue avec l'OSA (53 dB) ainsi que la sensibilité différente des détecteurs OSA et spectromètre. Cette observation indique que l'influence de la seconde transition est faible voire négligeable dans la génération du SC, et que, même avec une longueur de 20 millimètres, la grande non-linéarité et la dispersion spécifique au niveau de la nanofibre jouent un rôle clé dans le développement de l'ensemble des caractéristiques du SC. Des simulations numériques basées sur l'équation de Schrödinger non linéaire devront permettre de valider les observations expérimentales obtenues.

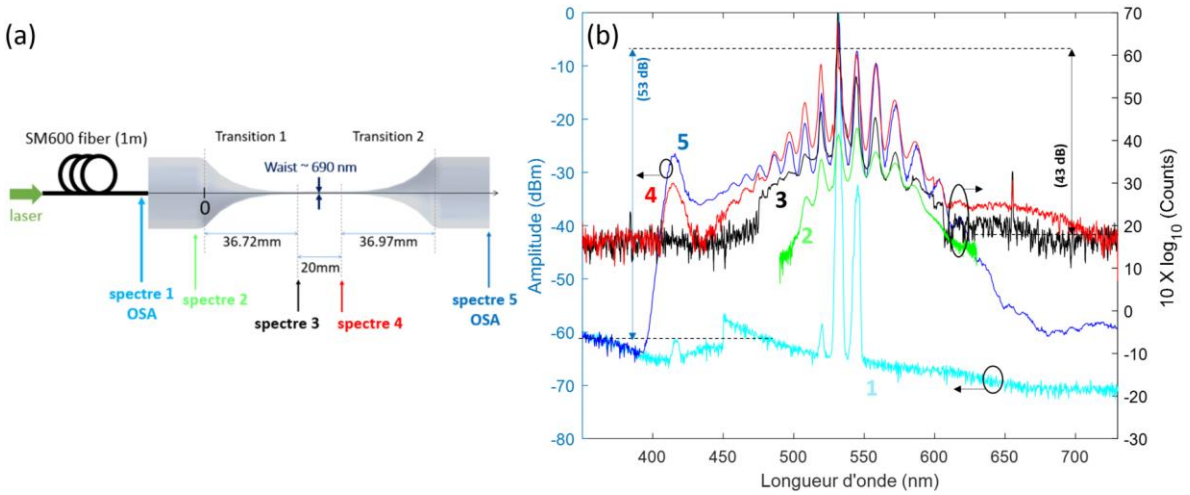

Figure 2. (a) géométrie de la nanofibre et positions respectives des spectres réalisés, (b) spectres correspondants le long de la nanofibre.

5. CONCLUSION

Dans ce travail nous avons observé pour la première fois l'évolution longitudinale du champ guidé le long d'une nanofibre optique en régime non linéaire. Nous avons ainsi pu faire une mesure directe du gain Raman pour 3 ordres Raman Stokes. De plus, dans le cas de la génération d'un supercontinuum, notre étude montre le rôle important de la transition d'entrée et de la région de la nanofibre sur la génération du SC.

RÉFÉRENCES

[1] Y. Haddad *et al.*, "Microscopic imaging along tapered optical fibers by right-angle Rayleigh light scattering in linear and nonlinear regime," Optics Express, 29(24), 39159-39172 (2021)

[2] Y .-H. Lai *et al.*, "Fiber taper characterization by optical backscattering reflectometry", Opt. Exp. 25, 22312 (2017)

[3] M.D. Turner *et al.*, "A full vectorial model for pulse propagation in emerging waveguides with sub-wavelength structures part II: stimulated Raman scattering", Opt. Express 17(14), 11565-11581 (2009)

[4] R.W, Boyd, "Nonlinear Optics," Academic press (2020)