

GENERATION DE SUPERCONTINUUM DANS UNE FIBRE OPTIQUE MICROSTRUCTUREE EN VERRE DE TELLURITE

I. Savellii¹, G. Gadret¹, B. Kibler¹, M. El-Amraoui¹, J. Fatome¹, J. C. Jules¹, F. Désévéday¹,
J. M. Dudley², J. Troles³, L. Brilland⁴, F. Smektala¹

¹Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 5209 CNRS-Université de Bourgogne,
9 Av. A. Savary, 21078 Dijon

²Institut FEMTO-ST, UMR 6174 CNRS- Université de Franche-Comté, 25030 Besançon

³Sciences Chimiques de Rennes, UMR 6226 CNRS-Université de Rennes I, 35042 Rennes

⁴Perfos, 11 rue Louis de Broglie, 22300 Lannion, France.

frederic.smektala@u-bourgogne.fr

RESUME

Nous présentons ici la fabrication et la caractérisation de fibres optiques microstructurées en verre de tellurite pour la génération de supercontinuum dans l'infrarouge. La géométrie des fibres a été définie de telle façon que la longueur d'onde du zéro de dispersion apparaisse vers 1,5 μm . Les pertes mesurées à cette longueur d'onde sont de 6,3dB/m pour une fibre présentant un cœur de diamètre de 2,2 μm . Nous montrons un élargissement spectral d'une largeur de 1000 nm dans 58 cm de fibre utilisant un laser d'impulsions femtoseconde (sub-nJ) à 1,56 μm .

MOTS-CLEFS : *fibre optique microstructurée, supercontinuum, tellurite.*

1. INTRODUCTION

Depuis les vingt dernières années, les propriétés optiques non-linéaires des verres du système $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$ (TZN) sont étudiées entre autres pour la réalisation de sources laser infrarouges larges bandes et présentent un intérêt pour de nombreuses applications potentielles dans divers secteurs [1-4]. Aujourd'hui, une grande partie des sources opérant dans le moyen IR sont basées sur les oscillateurs paramétriques optiques ou les lasers à cascade quantique, ce qui implique un certain encombrement, une instabilité liée à leur complexité ainsi qu'à leur sensibilité thermique et un coût important. Récemment, une solution est apparue avec la génération de supercontinuum (SC) dans les fibres optiques microstructurées (FOM) [5]. Ce nouveau type de fibres présente de nombreux intérêts en raison de propriétés de guidage uniques, tel le guidage monomode large bande, une non-linéarité élevée, et une gestion unique de la dispersion [6,7]. L'utilisation de FOM à petits cœurs pour la génération de supercontinuum est particulièrement attrayante puisqu'un fort confinement peut être atteint, ce qui augmente la non-linéarité de la fibre, et également parce que la longueur d'onde de dispersion nulle (ZDW) peut être ajustée autour de la longueur d'onde de pompe [3,9].

2. FABRICATION DE FOM TELLURITES

Tout d'abord nous avons fabriqué des préformes cylindriques en verres tellurites (TeO_2) appartenant au système TZN par une méthode classique de fusion-coulée. A l'aide de caractérisations thermiques nous avons sélectionné une composition stable vis-à-vis de la cristallisation pour laquelle la différence entre la température de transition vitreuse et la température de cristallisation est supérieure à 150°C. Ces caractéristiques font de cette composition une bonne candidate pour la fabrication de fibres optiques [8]. Fréquemment, les FOM sont fabriquées par la technique du "stack-and-draw", consistant à empiler de façon compacte des capillaires pré-étirés. Cependant, cette technique présente des inconvénients (manipulations multiples et délicates). C'est pourquoi nous avons développé une technique alternative d'usinage mécanique.

Le but de nos travaux est d'obtenir une fibre optique permettant de générer un SC dans le proche IR. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de décaler le ZDW de la fibre en deçà de la longueur d'onde de pompe choisie (ici $1,56 \mu\text{m}$). Les prédictions numériques de la dispersion chromatique (voir Fig. 1) montrent qu'un profil de FOM à cœur suspendu le permet ($\text{ZDW} = 1,45 \mu\text{m}$). Plusieurs FOM tellurites présentant un cœur suspendu entre 3 trous d'air ont ainsi été fabriquées avec des diamètres de cœurs variant entre 2 et $3 \mu\text{m}$.

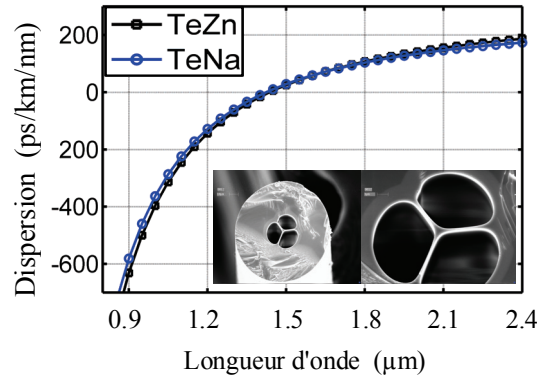


FIG. 1 : Simulation de la dispersion chromatique de la FOM fabriquée en verre de tellurite TZN.

3. CARACTERISATIONS LINEAIRES ET NON-LINEAIRES DES FOM TELLURITES.

Les mesures de pertes optiques des FOM tellurites sont réalisées par la technique du "cut back" à l'aide d'un spectromètre IR et d'une source laser à $1,55 \mu\text{m}$. On constate, que le minimum de pertes se trouve exactement à cette longueur d'onde, ce qui est caractéristique des verres du système TZN [10-12]. A $1,55 \mu\text{m}$, l'atténuation actuellement obtenue est de $6,3 \text{dB/m}$, donnant une longueur effective d'interaction de l'ordre de $50\text{-}60 \text{cm}$. L'amélioration de la qualité du verre par des étapes de purification lors de sa synthèse permettra de diminuer ce niveau de pertes.

Ceci étant, les niveaux d'atténuation actuellement atteint permettent néanmoins la réalisation de plusieurs caractérisations optiques. La génération de SC dans une fibre tellurite à cœur suspendu a en effet été obtenue par un pompage avec une source laser fibrée à $1,56 \mu\text{m}$ délivrant des impulsions de l'ordre de 100fs (Fig. 2b). Le couplage dans la fibre tellurite s'effectue à l'aide d'une fibre silice lentillée. Deux longueurs de fibre tellurite sont utilisées : $L_1 = 58 \text{cm}$ et $L_2 = 20 \text{cm}$. Parallèlement nous avons effectué des simulations numériques basées sur la résolution de l'équation de Schrödinger non-linéaire généralisée [13]. Le modèle tient compte de la dispersion chromatique simulée et des pertes expérimentales. Il inclut également l'effet Kerr (coefficient non-linéaire Kerr déduit du calcul numérique de l'aire effective à $1,56 \mu\text{m}$: $A_{\text{eff}} = 3,5 \mu\text{m}^2$ et $\gamma = 437 \text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$), ainsi que l'effet Raman sur la base d'études précédentes relatives aux verres tellurites [14,15].

Les simulations numériques (Fig. 2a) sont comparées aux spectres expérimentaux pour trois énergies d'impulsions distinctes (Fig. 2b). Ces spectres sont caractéristiques du développement d'un SC, dont la dynamique est gouvernée par la propagation et les dynamiques de type soliton dans le régime de dispersion anormale [13]. L'étape initiale d'auto-modulation de phase est suivie par la brisure de l'impulsion initiale en plusieurs solitons (S) qui se décalent vers les plus grandes longueurs d'onde par l'intermédiaire de la diffusion Raman intrapulse. De plus, en pompant proche de ZDW, ces solitons cèdent de l'énergie dans la génération d'ondes dispersives (DW) en régime de dispersion normale (basses longueurs d'onde). Nous montrons que l'élargissement spectral augmente progressivement avec l'énergie injectée. Nos simulations numériques confirment que la limite de l'analyseur spectral optique empêche une complète observation du SC généré. En effet, pour l'énergie injectée la plus importante de seulement 134pJ , nous obtenons un spectre recouvrant la gamme de longueurs d'onde $1\text{-}2 \mu\text{m}$. Afin de confirmer l'étendue du SC au-delà de $1,75 \mu\text{m}$, nous présentons également les élargissements spectraux obtenus expérimentalement (à l'aide d'un spectromètre IR) et numériquement dans un segment de fibre de 20cm (voir Fig. 2c).

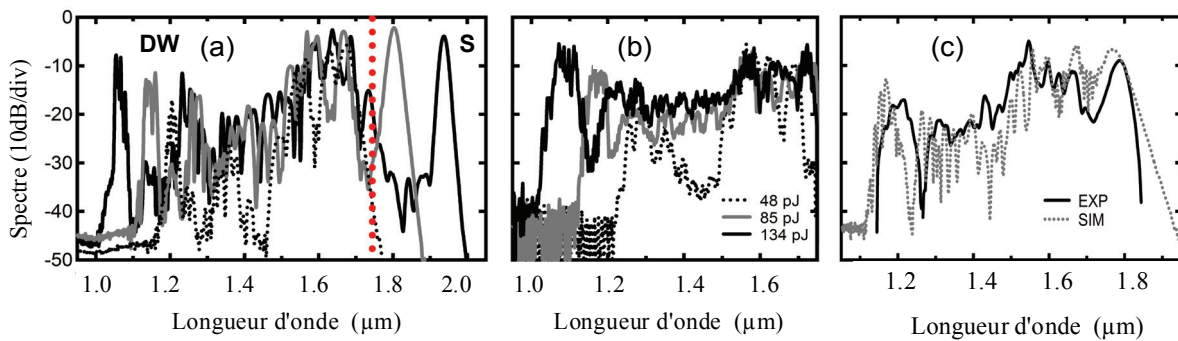


FIG. 2 : Génération de supercontinuum dans une fibre tellurite : (a) Simulations numériques et (b) mesures expérimentales obtenues avec une longueur de fibre $L_1 = 58$ cm (pointillés rouges : limite de l'analyseur de spectre optique à $1,75\mu\text{m}$) ; (c) Comparaison entre la simulation numérique et la mesure expérimentale (à l'aide d'un spectromètre IR) pour une longueur de fibre $L_2 = 20$ cm.

CONCLUSION

Nous démontrons la fabrication et l'optimisation de fibres optiques microstructurées à cœur suspendu en verre de tellurite, présentant une dispersion nulle aux environs de $1,5 \mu\text{m}$. La génération d'un supercontinuum d'une largeur de 1000 nm utilisant 58 cm de fibre est alors obtenue à l'aide d'impulsions femtoseconde d'environ 100 pJ .

REFERENCES

- [1] R. Holzwarth, T. Udem, T.W. Hansch, J.C. Knight, W.J. Wadsworth, P. S. J. Russell, "Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, pp. 2264, 2000.
- [2] I. Hartl, X.D. Li, C. Chudoba, R.K. Ghanta, T.H. Ko, J.G. Fujimoto, J.K. Ranka, R.S. Windeler, "Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber," *Opt. Lett.*, vol. 26, pp. 608, 2001.
- [3] J.H.V. Price, T.M. Monro, H.E. Heidepriem, F. Poletti, P. Horak, V. Finazzi, J.Y.Y. Leong, P. Petropoulos, J.C. Flanagan, G. Brambilla, X. Feng, D.J. Richardson, "Mid-IR supercontinuum generation from nonsilica microstructured optical fibers", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* vol. 13, pp. 738, 2007.
- [4] V.L. Kalashnikov, E. Sorokin, I.T. Sorokina, "Raman effects in the infrared supercontinuum generation in soft-glass PCFs", *Appl. Phys. B*, vol. 87, pp. 37, 2007.
- [5] J.K. Ranka, R.S. Windeler, A.J. Stentz, "Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm ," *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 25, 2000.
- [6] J.C. Knight, T.A. Birks, P.St.J. Russell, D.M. Atkin, "All-silica single-mode fiber with photonic crystal cladding," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 1547, 1996. Errata, *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 484, 1997.
- [7] P.St.J. Russell, "Photonic Crystal Fibers," *Science*, vol. 299, pp. 358, 2003.
- [8] A. Soufiane, M. Poulain, "New fluorogallate glasses", *J. Non-Crystalline Solids*, vol. 161, pp.206, 1993.
- [9] P. Domachuk, N.A. Wolchover, M. Cronin-Golomb, A. Wang, A.K. George, C.M.B. Cordeiro, J.C. Knight, F.G. Omenetto, "Over 4000 nm bandwidth of mid-IR supercontinuum generation in sub-centimeter segments of highly nonlinear tellurite PCFs," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 7161, 2008.
- [10] J.S. Wang, E.M. Vogel, E. Snitzer, "Tellurite glass: new candidate for fiber devices", *Opt. Mater.*, vol. 3, pp. 187, 1994.
- [11] S. Shen, A. Jha, X. Liu, M. Naftaly, K. Bindra, H.J. Bookey, A.K. Kar, "Tellurite glasses for broadband amplifiers and integrated optics," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 85, pp. 1391, 2002.
- [12] E. Snitzer, E.M. Vogel, J. S. Wang, "Tellurite glass and fiber amplifier", U.S. Patent, 5251062 (1993).
- [13] J.M. Dudley, G. Genty, S. Coen, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 78, pp. 1135, 2006.
- [14] A. Lin, A. Zhang, E.J. Bushong, J. Toulouse, "Solid-core tellurite glass fiber for infrared and nonlinear applications," *Opt. Express*, vol. 17, pp. 16716, 2009.
- [15] M.D. O'Donnell, K. Richardson, R. Stolen, C. Rivero, T. Cardinal, M. Couzi, D. Furniss, A.B. Seddon, "Raman gain of selected tellurite glasses for IR fibre lasers calculated from spontaneous scattering spectra," *Opt. Materials*, vol. 30, pp. 946, 2008.