

DÉMONSTRATION EXPÉRIMENTALE ET ÉTUDE NUMÉRIQUE DES ONDES PLASMONS-SOLITONS

Gilles Renversez¹, Mathieu Chauvet², Mahmoud M. R. Elsayy¹, Tintu Kuriakose², Tomaz Halenkovic³, Virginie Nazabal⁴, Petr P. Němec³

¹ Aix-Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, 13013, France

² FEMTO-ST, CNRS, Université de Bourgogne Franche-Comté, 25030 Besançon, France

³ Faculty of Chemical Technology, University of Pardubice, 53210 Pardubice, Czech Republic

⁴ Institut des sciences chimiques de Rennes, CNRS, Equipe Verres et Céramiques, Université de Rennes 1, 35042 Rennes, France

gilles.renversez@univ-amu.fr

RÉSUMÉ

Nous avons conçu et fabriqué des structures plasmoniques nonlinéaires planaires à base de verres de chalcogénure et d'or où nous avons pu observer pour la première fois les ondes nonlinéaires plasmons-solitons décrites théoriquement dès les années 80. Des comparaisons satisfaisantes avec les résultats de modèles numériques spécifiques sont aussi décrites.

MOTS-CLEFS : *optique nonlinéaire, plasmonique, soliton spatial, effet Kerr*

1. INTRODUCTION

Il est bien connu que l'efficacité des effets non-linéaires est améliorée par un meilleur confinement des champs électromagnétiques [1]. D'un autre côté, il est aussi bien connu que les ondes de type plasmonique ont tendance à être plus localisées spatialement que les ondes se propageant dans des structures diélectriques de taille équivalente [2]. La combinaison des deux effets dans des configurations guidées au sein de ce que l'on pourrait nommer la plasmonique non-linéaire intégrée semble donc être une voie de recherche prometteuse éventuellement pour des applications mais à coup sûr pour des études fondamentales [3]. Il faut noter que les travaux d'optique guidée combinant optique non-linéaire et structures métalliques remontent au début des années 80. On peut citer notamment les articles de Agranovich, Stegeman, et Boardman entre autres [4, 5, 6, 7]. L'un des plus remarquables en termes de précisions et d'étendue des configurations étudiées est la référence [7], en effet celle-ci contient un schéma explicite décrivant le profil d'une onde propagative réunissant un soliton spatial dans un milieu non-linéaire de type Kerr et une onde plasmonique au voisinage de l'interface avec un film métallique. De nombreux autres travaux ont suivi jusqu'à la fin des années 80 [8] puis il a fallu attendre vingt ans l'article de Feigenbaum et Orenstein [9] qui a relancé de nombreuses études théoriques sur le sujet (et qui a aussi établi l'appellation plasmon-soliton pour les ondes non-linéaires en question). Cependant, aucune observation expérimentale de ces ondes solitons-plasmons n'a à ce jour été publiée ou présentée. C'est ce manque que nous comblons avec ce travail. Il concrétise les études que nous avons entreprises il y a près de 10 ans [10]. Il comprend l'élaboration de modèles non-linéaires spécifiques de type modale et de propagation, le design des structures réalistes permettant l'observation expérimentale, une série de mesures réalisées à 1,55 μm , des simulations numériques expliquant qualitativement et parfois quantitativement les mesures.

2. RÉSULTATS

Afin de pouvoir observer ces ondes plasmons-solitons dans des structures photoniques réalistes à des puissances inférieures au seuil d'endommagement des matériaux utilisés et de pouvoir assurer leur propagation sur quelques millimètres, nous avons conçu et fabriqué une structure multicouche diélectrique/métal planaire en complétant nos résultats de modélisation déjà acquis [10]. La structure comprend 5 couches (voir la Fig. 1a) réalisée sur un wafer de silicium avec une couche épaisse de silice recouverte

par une couche de verre de chalcogénure de $3,6 \mu\text{m}$ d'épaisseur (en vert sur le schéma). La composition de cette couche ($\text{Ge}_{28,1}\text{Sb}_{6,3}\text{Se}_{65,6}$) a été choisie car elle fournit un fort coefficient non-linéaire $n_2 = 5,5 \cdot 10^{-18} \text{m}^2/\text{W}$, une absorption à deux photons modérée ($\alpha_2 = 0.43 \text{ cm/GW}$), un seuil d'endommagement autour de 2 GW/cm^2 , et une photo-sensibilité plus basse que celle des compositions avec une proportion d'antimoine supérieure [11, 12]. Cette couche non-linéaire est recouverte d'une couche de 10 nm de silice (en bleu) et suivie d'une couche de 32 nm d'or (en jaune sur le schéma). Cette couche manométrique de silice sert notamment à limiter les pertes de propagation du soliton-plasmon engendrées par le métal tout en maintenant son caractère plasmonique (ainsi pour une couche de 30 nm ou plus la solution non-linéaire de type TM perd son caractère plasmonique et on perd alors l'amélioration du confinement du champ qu'il engendre). Ainsi en présence de la couche d'or, la solution non-linéaire de type TM a une aire effective typiquement 8 fois plus petite que celle de la solution non-linéaire de type TE dans la même structure à la même puissance totale. Sans la couche d'or, les solutions non-linéaires TE et TM sont très similaires en terme de profils d'intensité ou d'aire effective, elles-mêmes très semblables à la solution de type TE avec métal.

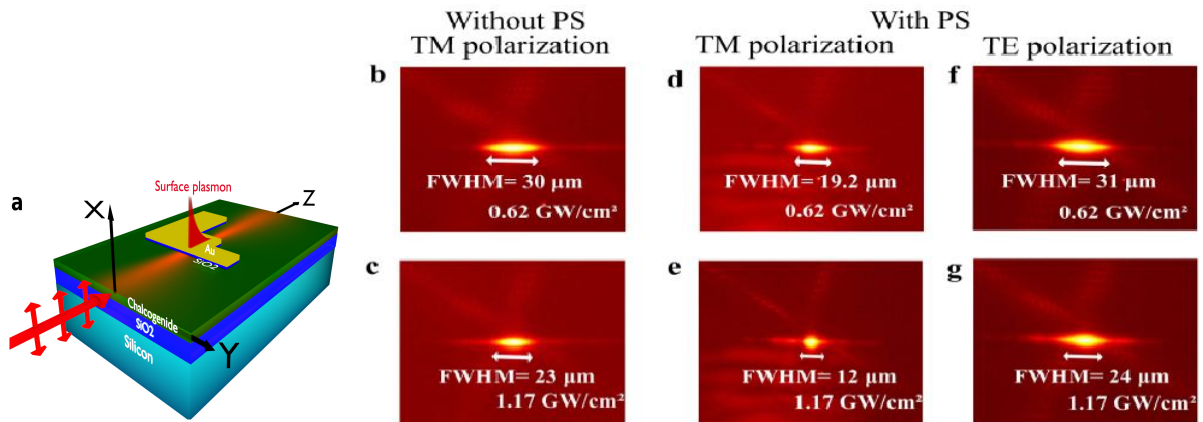


FIGURE 1 : Expériences pour la mise en évidence d'ondes plasmons-solitons. a : Schéma de la structure. b,c,d,e,f., and g : Effets observés d'auto-focalisation induits par la non-linéarité de type Kerr pour trois configurations : sans structure plasmonique (PS) pour le mode TM (b et c), avec une structure plasmonique (PS) pour le mode TM (d et e) et pour le mode TE (f and g) à une intensité entrante du faisceau de 0.62 GW/cm^2 (première ligne) et 1.17 GW/cm^2 (seconde ligne).

La mise en évidence expérimentale consiste à injecter un faisceau elliptique de $4 \times 30 \mu\text{m}^2$ (FWHM) à $1,55 \mu\text{m}$ issu d'un laser femtoseconde dans une structure d'environ 5 mm de long. Le faisceau de sortie passe par une objectif de microscope avant d'être enregistré via une caméra Vidicon. On peut donc l'étudier en fonction de l'intensité entrante. La figure 1 montre le fort renforcement de la focalisation du faisceau en sortie observé pour l'onde de type TM en présence de la structure plasmonique (Fig. 1d,e) comparé aux autres configurations (Fig. 1b, c and Fig. 1f, g) où l'amélioration du confinement des ondes non-linéaires propagatives par l'effet plasmonique est absent. En effet ce dernier ne se produit qu'en présence de la couche d'or et uniquement pour les ondes de type TM. Des comparaisons satisfaisantes avec les simulations numériques issues de notre modèle de propagation non-linéaire sont présentées en figure 2. Pour cela, nous avons adapté un modèle de propagation non-linéaire modélisant l'équation de Schrödinger spatiale avec une dimension transverse (direction Y, voir le schéma de la figure 1) et une dimension pour la propagation (direction X). Les paramètres de ce modèle étudiant la propagation non-linéaire sont issus de nos simulations "modales" caractérisant les solutions non-linéaires stationnaires de type TM ou TE avec ou sans la couche métallique.

D'autres configurations ont été caractérisées et modélisées en fonction de l'intensité entrante. Nous avons notamment étudié l'influence de la position de la structure d'or ainsi que sa longueur sur les caractéristiques du faisceau sortant. Via nos simulations numériques, nous reproduisons au moins qualitativement ces résultats et notamment un effet de défocalisation prononcé concomitant avec l'apparition de pics symétriques dans le profil transverse du faisceau de sortie (voir Figure 2 à droite) comme cela est

observée expérimentalement.

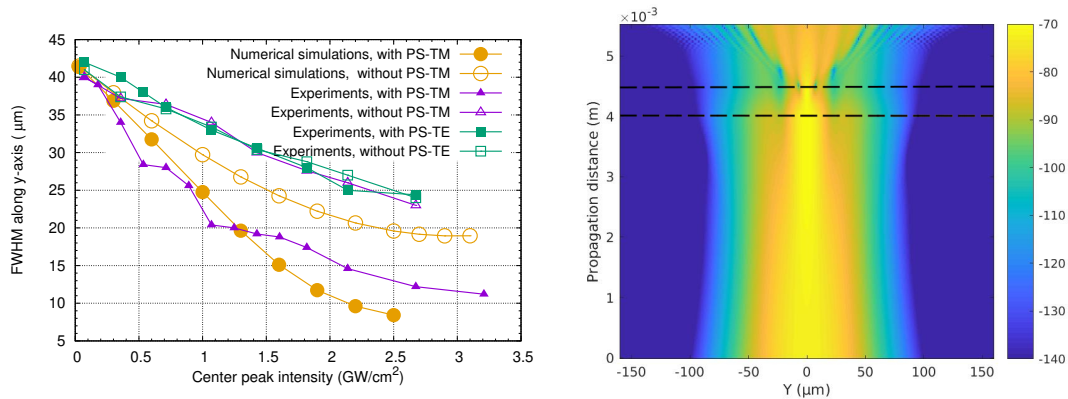


FIGURE 2 : Gauche : Comparaisons des mesures de FWHM issues des cas TM (violet) et TE (vert) avec structure plasmonique (signe plein) ou sans (signe vide) avec les résultats des simulations de propagation non-linéaire correspondantes (orange). Droite : carte avec une échelle logarithmique de l'intensité du faisceau non-linéaire le long de l'axe Y au cours la propagation selon l'axe Z pour le mode de type TM pour une structure d'or de 0,5 mm de long et une longueur de guide totale de 5,1 mm (intensité maximal d'entrée de 2.5 GW/cm²). Les lignes horizontales pointillées représentent les limites de la structure plasmonique où le renforcement de la non-linéarité a lieu.

CONCLUSION

Nous avons conçu et fabriqué des structures plasmoniques non-linéaires planaires à base de verres de chalcogénure et d'or où nous avons pu observer pour la première fois les ondes non-linéaires plasmons-solitons décrites théoriquement dans les années 80. Des comparaisons satisfaisantes avec les résultats de modèles numériques spécifiques ont été réalisées. Dans notre présentation, nous discuterons des limitations des modèles développés ainsi que de nos hypothèses permettant d'expliquer certains des écarts quantitatifs observés entre mesures et simulations.

RÉFÉRENCES

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 3rd ed. Academic Press, 2001.
- [2] S. A. Maier, *Plasmonics : Fundamentals and Applications*. Springer, 2007.
- [3] M. Kauranen and A. V. Zayats, "Nonlinear plasmonics," *Nat. Photon.*, vol. 6, no. 11, pp. 737–748, 2012.
- [4] V. M. Agranovich, V. S. Babichenko, and V. Y. Chernyak, "Nonlinear surface polaritons," *JETP Lett.*, vol. 32, no. 8, pp. 512–515, 1980.
- [5] G. I. Stegeman and C. T. Seaton, "Nonlinear surface plasmons guided by thin metal films," *Opt. Lett.*, vol. 9, no. 6, pp. 235–237, 1984.
- [6] G. I. Stegeman, C. T. Seaton, J. Ariyasu, R. F. Wallis, and A. A. Maradudin, "Nonlinear electromagnetic waves guided by a single interface," *J. Appl. Phys.*, vol. 58, p. 2453, 1985.
- [7] J. Ariyasu, C. T. Seaton, G. I. Stegeman, A. A. Maradudin, and R. F. Wallis, "Nonlinear surface polaritons guided by metal films," *J. Appl. Phys.*, vol. 58, no. 7, pp. 2460–2466, 1985.
- [8] D. Mihalache, G. I. Stegeman, C. T. Seaton, E. M. Wright, *et al.*, "Exact dispersion relations for transverse magnetic polarized guided waves at a nonlinear interface," *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 3, pp. 187–189, 1987.
- [9] E. Feigenbaum and M. Orenstein, "Plasmon-soliton," *Opt. Lett.*, vol. 32, p. 674, 2007.
- [10] W. Walasik, V. Nazabal, M. Chauvet, Y. Kartashov, and G. Renversez, "Low-power plasmon-soliton in realistic nonlinear planar structures," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 22, pp. 4579–4581, 2012.
- [11] T. Kuriakose, E. Baudet, T. Halenkovič, M. M. Elsayy, P. Němec, V. Nazabal, G. Renversez, and M. Chauvet, "Measurement of ultrafast optical kerr effect of ge-sb-se chalcogenide slab waveguides by the beam self-trapping technique," *Opt. Comm.*, vol. 403, pp. 352 – 357, 2017.
- [12] M. Olivier, J. Tchahame, P. Němec, M. Chauvet, V. Besse, C. Cassagne, G. Boudebs, G. Renversez, R. Boidin, E. Baudet, and V. Nazabal, "Structure, nonlinear properties, and photosensitivity of (GeSe₂)_{100-x}(Sb₂Se₃)_x glasses," *Opt. Mater. Express*, vol. 4, no. 3, pp. 525–540, 2014.