

ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA RÉSONANCE D'UNE NANO-ANTENNE OPTIQUE À OUVERTURE PAPILLON

Elie M. Atie^{1,2}, Ali El Eter¹, Thierry Grosjean¹, Tony Tannous² et Fadi I. Baida¹

¹Institut FEMTO-ST, département d'optique P.M. Duffieux, CNRS UMR 6174, université de Franche-Comté, 16 route de Gray, 25030 Besançon cedex, France

²Université de Balamand, département de physique, El Koura, Liban
elie.atieh@balamand.edu.lb

RÉSUMÉ

Dans ce papier nous présentons les résultats d'une étude numérique basée sur la méthode des différences finies centrées en 3 dimensions (3D-FDTD) pour démontrer la haute sensibilité d'une nano-antenne à ouverture papillon (Bowtie Nano-Aperture : BNA), gravée à l'extrémité d'une sonde métallisée de microscope optique en champ proche. Cette sensibilité se révèle à travers la modification des propriétés de résonance de la nano-antenne en fonction de la distance qui la sépare d'un substrat donné. L'étude discute le cas d'une antenne opérant, aussi bien en mode émission (EM) qu'en mode collection (CM) et ceci en présence de deux types de substrats : le premier à fort indice de réfraction (InP) et l'autre présentant un faible indice (verre). Les résultats obtenus démontrent la possibilité d'exploiter une telle structure pour le nano-positionnement mais ils interpellent aussi les expérimentateurs quant à la modification de la résonance des sondes induite par la présence de l'objet à analyser.

Mots-clés: nano-antenne à ouverture papillon (bowtie nano-aperture), capteur optique, résonateurs optiques, plasmonique

ABSTRACT

In this paper a numerical study based on a three-dimensional finite-difference time-domain method (3D-FDTD) was presented to demonstrate the high sensitivity of a Bowtie nano-aperture antenna BNA, engraved on the end of a metal-coated tip operating in near-field optical microscopy. This sensitivity is revealed through the modification of the resonance properties of the nano-antenna as a function of the distance that separates it from a given substrate. The study discussed the case of an antenna operating in emission mode (EM), as well as in collection mode (CM), in the presence of two types of substrates: high refractive index (InP) and low index (glass). The results obtained demonstrate the possibility of using such a structure for optical nano-positioning, but experimentalists should also pay attention to, and take into consideration, the resonance modification of the probes induced by the presence of the object to be analyzed.

Keywords: bowtie nano-aperture, optical sensor, optical resonators, plasmonics

INTRODUCTION

L'évolution en nanotechnologie et nano-fabrication a boosté de nombreuses études concernant les nano-objets et leurs propriétés optiques. Grâce à ces progrès technologiques de fabrication, plusieurs types de nanostructures ont été conçus et ont permis plusieurs applications dans le domaine de la nano-photonique. Parmi ces structures, on peut citer les nanofils métalliques (Muskens *et al.*, 2007), les ouvertures circulaires (Ebbesen *et al.*, 1998), les ouvertures coaxiales (Ndao *et al.*, 2013), les antennes patch (Fromm *et al.*, 2004; Fischer & Martin, 2008) et l'antenne à ouverture papillon (BNA) (Sendur & Challener, 2003; Guo *et al.*, 2008; Ibrahim *et al.*, 2010; Mivelle *et al.*, 2010). L'exaltation du champ (γ) et la longueur d'onde de résonance (RW) sont les deux paramètres les plus importants caractérisant ces nano-antennes (NA). Par conséquent, plusieurs études ont été menées afin d'évaluer la relation entre ces propriétés optiques et la géométrie de l'antenne ainsi que la nature du matériau la constituant (Fischer & Martin, 2008; Ibrahim *et al.*, 2010; Yousif & Samra, 2012). Le but premier est l'optimisation de l'efficacité de ces nanostructures pour diverses applications comme la nano-lithographie (Wang *et al.*, 2006; Wen *et al.*, 2014), le piégeage optique (Berthelot *et al.*, 2014; El Eter *et al.*, 2014; Hameed *et al.*, 2014), l'imagerie optique en champ proche (Wang & Xu, 2007; Vo *et al.*, 2012; Mivelle *et al.*, 2014), l'exaltation du champ magnétique (Grosjean *et al.*, 2011)

La distance d'interaction entre la NA et le matériau d'intérêt est un paramètre essentiel qui pourrait affecter les propriétés optiques de la NA. Par exemple, en lithographie, l'intensité du spot lumineux généré par la NA sera grandement affectée en l'approchant de la résine si l'on ne tient pas compte de la modification de la longueur d'onde de résonance de la nano-antenne. Ainsi, notre étude vise à quantitativement évaluer la réponse optique (exaltation du champ électromagnétique et longueur d'onde de résonance) d'une BNA gravée à l'extrémité d'une pointe métallisée (Mivelle *et al.*, 2010) placée à une distance D d'un substrat donné comme indiqué sur la Figure 1. Pour atteindre notre objectif nous allons discuter le cas d'une BNA opérant en mode émission (EM) ainsi qu'en mode collection (CM).

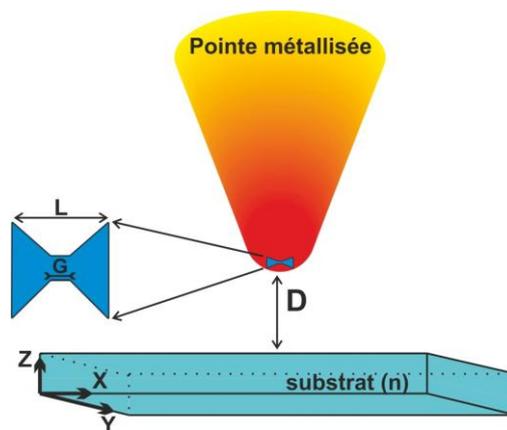


Figure 1. BNA gravée à l'extrémité d'une fibre effilée en cône et métallisée placée à une distance D d'un substrat d'indice n . L et G représentent la longueur totale de la BNA et celle de l'entrefer respectivement.

MÉTHODE ET PARAMÈTRES

Notre étude est basée sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel opérant à trois dimensions (3D-FDTD : three dimensional finite-difference time-domain) et qui a été développée au sein du département d'optique de FEMTO-ST. Le code utilisé intègre la PML (Perfectly Matched Layer) comme conditions d'absorption sur les limites de la fenêtre de calcul. De même, les propriétés optiques de la couche métallique de la pointe sont décrites à travers l'implémentation d'un modèle analytique de la dispersion (modèle de Drude). Dans la fenêtre de la simulation, on considère un substrat d'indice de réfraction $n = 3,17$ (1,5) dans le cas de l'InP (verre) placé à une distance D de la nano-antenne fibrée. La pointe a une forme conique (polymère d'indice optique $n = 1,52$) avec un sommet en demi-sphère de rayon $R = 500$ nm le tout recouvert d'une couche d'aluminium de 105 nm. La BNA, gravée à son extrémité, a une longueur latérale $L = 215$ nm, et un entrefer de dimension $G = 45$ nm, un angle de papillon $\theta = 45^\circ$ et une épaisseur égale à celle de la couche d'aluminium (Figure 1). Ces paramètres géométriques sont choisis de telle sorte que la longueur d'onde de résonance de l'antenne reste, lorsque D varie, dans le domaine spectral d'une source laser dont on dispose au département pour d'éventuelles expérimentations. Un maillage non uniforme est appliqué pour décrire avec précision les détails fins de la structure en utilisant un petit pas spatial $\delta x = \delta y = \delta z = 5$ nm dans la région avoisinant la BNA tandis qu'un grand pas $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 15$ nm est considéré pour la partie restante de la fenêtre de calcul. La forme globale de cette dernière est un parallélépipède de $3,165 \times 3,165 \times 3,665 \mu\text{m}^3$.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Une étude préliminaire discutant le cas de la nano-antenne fibrée opérant dans le vide en mode collection (sans la présence d'un substrat) est réalisée. La Figure 2a montre la réponse spectrale en champ proche de la BNA sur fibre avec un maximum d'exaltation du champ électrique à $\lambda_R = 1118,5$ nm. Cette résonance correspond à la longueur d'onde de coupure du mode fondamental du guide d'onde métallique infiniment long ayant une section en forme de nœud papillon (Ibrahim *et al.*, 2010). La Figure 2b présente la racine quatrième de l'intensité du champ électrique dans le plan de polarisation de l'onde incidente (plan yOz de la Figure 1) passant par l'axe de la sonde. La figure montre clairement le fort confinement du champ électrique à l'intérieur de la BNA (dans l'entrefer). Ce confinement est dû au fait que, à la longueur d'onde de coupure du mode guidé, la vitesse de groupe tend vers zéro tandis que la vitesse de phase tend vers l'infini (Ibrahim *et al.*, 2010). Ceci a pour effet d'augmenter la densité d'états à la résonance et ainsi d'exalter le champ électromagnétique dans l'entrefer de la nano-antenne. Il est à noter que ce mode guidé est polarisé selon les ailes métalliques de la nano-antenne (direction Oy de la Figure 1) et que cette résonance ne sera induite dans la BNA que si l'onde incidente est polarisée selon cette direction Oy (Mivelle *et al.*, 2010). La Figure 2c, quant à elle, montre les variations de l'intensité le long de l'axe de la pointe. À partir de cette courbe, on peut estimer une distance $d=38$ nm pour laquelle l'intensité diminue d'un facteur de $1/e^2$. Ainsi, dans une première approximation, on peut dire qu'un objet peut affecter la résonance de la BNA si et seulement si, il est placé à une distance inférieure à 38 nm. Cette hypothèse devrait être validée par la suite à travers les simulations numériques de la structure globale avec substrat.

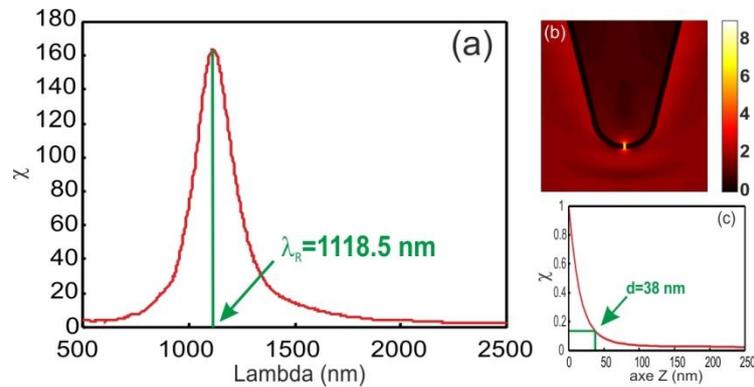


Figure 2. Cas d'une BNA fibrée opérant dans le vide : a) spectre de résonance en champ proche, b) racine carrée de l'amplitude du champ électrique lumineuse normalisé ($\sqrt{|E_{norm}|}$) dans le plan YZ, c) évolution de l'intensité lumineuse émise par la sonde en fonction de la distance sur l'axe Z.

Dans la suite on présentera les résultats obtenus dans les deux modes EM et CM. Notons que, dans le cas du mode collection (CM), on discutera les résultats obtenus en champs proche et lointain tandis que dans le cas du mode émission (EM) seuls les résultats en champ proche seront présentés. Concernant le champ proche, la longueur d'onde de résonance RW^{NF} sera déterminée à travers la détection du signal au milieu de l'entrefer de la BNA tandis que celle du champ lointain RW^{FF} l'est en calculant l'énergie collectée par la fibre (flux du vecteur de Poynting à travers une section transversale de la fibre).

Mode collection

Dans ce mode, l'éclairage est effectué depuis le substrat sous forme d'onde plane linéairement polarisée selon les ailes métalliques de la BNA et se propageant parallèlement à l'axe de la sonde (perpendiculaire à l'interface substrat-vide). La Figure 3 montre les variations de la RW en champ proche en fonction de la distance D entre la BNA et le substrat entre 0 et 300 nm. Les courbes vertes montrent la variation de l'exaltation du champ suivant la distance tandis que les courbes rouges correspondent à celle de la longueur d'onde de résonance. D'après la Figure 3a on peut clairement voir que, en champ proche, le changement en termes de RW est plus important pour le substrat d'indice optique élevé (InP). Une grande sensibilité de l'antenne en termes de longueur d'onde de résonance à la variation de distance est obtenue en particulier pour $D < 100$ nm dans le cas du substrat de haut indice (InP). En fait, dans le cas de l'InP, la RW^{NF} diminue de 1808 nm pour $D = 0$ nm à 1319 nm à $D = 10$ nm alors qu'il ne varie que de 1233 nm à 1190 nm dans le cas du verre. Néanmoins, cette variation de $\Delta RW^{NF} = 43$ nm est accompagnée par une petite variation de l'exaltation du champ ($\chi_{verre}^{NF} : 180 \rightarrow 160$) dans le cas du verre alors que le comportement n'est pas monotone pour l'InP. En effet, en mode collection, les variations de ce facteur d'amplification dépendent fortement de l'indice optique du substrat en raison du phénomène d'interférence qui se produit entre le sommet de la pointe et le substrat.

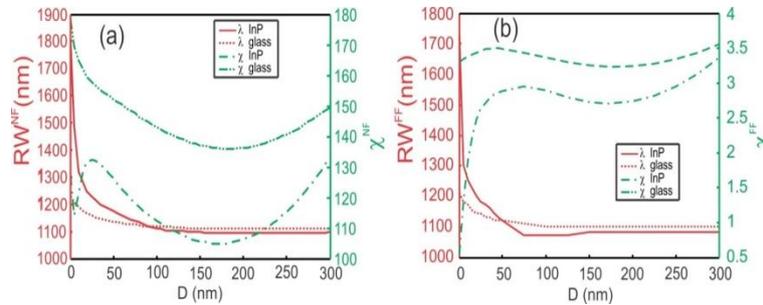


Figure 3. Variations en fonction de la distance BNA-substrat (D) de la longueur d'onde de résonance (RW en rouge) et du facteur d'exaltation de l'intensité électrique (χ en vert) calculées : (a) au milieu de la nano-antenne (RW^{NF}, χ^{NF}) et (b) en champ lointain à travers le signal collecté par la fibre (RW^{FF}, χ^{FF}). Le cas de deux substrats différents est étudié (InP avec n=3.17 et verre ayant n=1.5) pour une sonde opérant en mode collection.

De même, la Figure 3b présente les résultats correspondant au champ lointain. D'une part, la variation du RW^{FF} en fonction de la distance est similaire à celle de RW^{NF} de la Figure 3a à l'exception d'un léger déplacement vers le bleu (plus petites valeurs de la longueur d'onde). Ce léger déplacement vers le bleu est attribué à la diffusion en champ lointain d'une source ponctuelle (BNA). En effet, l'intensité diffusée du signal linéaire (diffusion de Rayleigh) est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde ($I \propto 1/\lambda^4$). Ainsi, plus la longueur d'onde est grande moins le signal diffusé est intense d'où un déplacement du maximum de l'intensité vers les faibles longueurs d'onde. D'autre part, le facteur d'exaltation χ^{FF} varie d'une manière croissante pour les petites valeurs de D puis il présente une oscillation qui est due aux réflexions multiples entre la pointe et le substrat. En effet, l'interprétation physique de ce comportement n'a pas une grande valeur car χ^{FF} est calculée pour différentes valeurs de la longueur d'onde (à la résonance) qui, elles-mêmes, dépendent de D. Pour mieux comprendre la variation de χ en fonction de la distance, on présente sur la Figure 4 des spectres de résonance de la BNA fibrée pour quelques valeurs de D, (coupes verticales prises sur la Figure 4). Ces courbes montrent que, suivant la longueur d'onde du signal injecté, l'exaltation peut augmenter (coupe A), diminuer (coupe B) ou présenter un maximum pour D≠0 (coupe C).

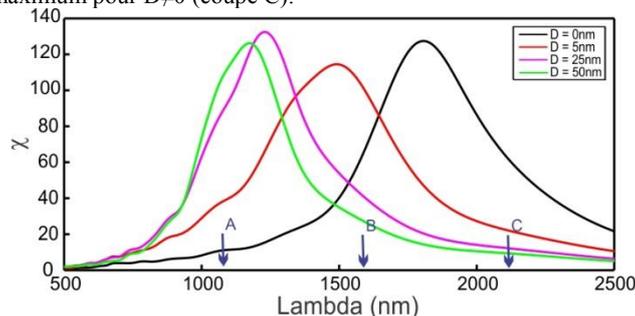


Figure 4. Spectres de résonance de la BNA placée à différentes distances D d'un substrat d'InP.

Mode émission

Dans ce cas, on injecte le mode guidé linéairement polarisée dans la partie haute (plus grande section) de la sonde. La Figure 5 présente les variations de la longueur d'onde de résonance (courbes rouges) et de l'exaltation du champ (courbes vertes) en fonction de la distance D . Le comportement de la longueur d'onde de résonance est similaire à celui obtenu dans le cas du mode collection. Similairement au mode collection, un ΔRW plus important est obtenu pour l'indice le plus élevé. L'exaltation du champ présente une variation croissante pour des petites valeurs de D en plus d'oscillations résultant d'un phénomène d'interférence plus marqué qu'en mode collection entre la sonde et le substrat. Notons que dans ce cas, les spectres normalisés sont déterminés comme étant le signal mesuré en champ (15nm devant la BNA) divisé par le même signal calculé dans le cas d'une pointe non métallisée (donc sans BNA ni couche métallique).

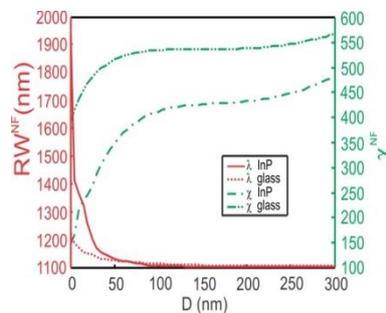


Figure 5. Effet de la distance BNA-substrat (D) sur la longueur d'onde de résonance (RW^{NF} en rouge) et sur le facteur d'exaltation (χ^{NF} en vert) de l'intensité électrique calculés au milieu de la nano-antenne pour deux substrats différents (InP avec $n=3.17$ et verre ayant $n=1.5$) dans le cas d'une sonde opérant en mode émission.

CONCLUSION

Notre étude a démontré une forte sensibilité des propriétés de résonance d'une BNA fibrée placée en face d'un substrat de fort indice de réfraction. Cette sensibilité est moindre pour un substrat d'indice inférieur. Néanmoins, les propriétés optiques de la BNA sont fortement affectées par le substrat qui est en face même si celui-ci se trouve à des distances supérieures à celle associée à la décroissance des ondes évanescentes émises par la sonde dans l'air ($d=38\text{nm}$ ici). Cette grande sensibilité devrait être prise en compte afin d'optimiser la résonance de la NA dans plusieurs domaines tels que le piégeage optique, le contrôle du couplage avec un autre résonateur optique, la conception de sondes pour la nano-lithographie optique fonctionnant avec des substrats spécifiques, la sélectivité spectrale de certains effets non-linéaires, ...

RÉFÉRENCES

- Berthelot, J., Aimovi, S.S., Juan, M.L., Kreuzer, M.P., Renger, J. et Quidant, R. 2014. Three-dimensional manipulation with scanning near-field optical nanotweezers. *Nature Nanotechnology*, 9: 295–299.

- Ebbesen, T.W., Lezec, H.J., Ghaemi, H.F., Thio, T. et Wolff, P.A. 1998. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature*, 391: 667669.
- El Eter, A., Grosjean, T., Viktorovitch, P., Letartre, X., Benyattou, T. et Baida, F.I. 2014. Huge light- enhancement by coupling a bowtie nano-antenna's plasmonic resonance to a photonic crystal mode. *Optics Express*, 22: 14464-14472.
- Fischer, H. et Martin, O.J. 2008. Engineering the optical response of plasmonic nanoantennas. *Optics Express*, 16: 91449154.
- Fromm, D.P., Sundaramurthy, A., Schuck, P. J., Kino, G. et Moerner, W.E. 2004. Gap-dependent optical coupling of single "Bowtie" nanoantennas resonant in the visible. *Nano Letters*, 4: 957-961.
- Grosjean, T., Mivelle, M., Baida, F.I., Burr, G.W. et Fischer, U.C. 2011. Diabolo nanoantenna for enhancing and confining the magnetic optical field. *Nano Letters*, 11: 1009 – 1013.
- Guo, H., Meyrath, T.P., Zentgraf, T., Liu, N., Fu, L., Schweizer, H. et Giessen, H. 2008. Optical resonances of bowtie slot antennas and their geometry and material dependence. *Optics Express*, 16: 7756-7766.
- Hameed, N., El Eter, A., Grosjean, T. et Baida, F. 2014. Stand-alone three-dimensional optical tweezers based on fibred bowtie nanoaperture. *IEEE Photonics Journal*, p. 1 – 10.
- Ibrahim, I.A., Mivelle, M., Grosjean, T., Allegre, J.-T., Burr, G.W. et Baida, F.I. 2010. Bowtie-shaped nanoaperture: a modal study. *Optics Letters*, 35: 2448-2450.
- Mivelle, M., Ibrahim, I.A., Baida, F., Burr, G.W., Nedeljkovic, D., Charrat, D., Rauch, J.-Y., Salut, R. et Grosjean, T. 2010. Bowtie nano-aperture as interface between near-fields and a single-mode fiber. *Optics Express*, 18: 15964-15974.
- Mivelle, M., Viktorovitch, P., Baida, F.I., El Eter, A., Xie, Z., Vo, T.-P., Atie, E., Burr, G.W., Nedeljkovic, D., Rauch, J.-Y., Callard, S. et Grosjean, T. 2014. Light funneling from a photonic crystal laser cavity to a nano-antenna: overcoming the diffraction limit in optical energy transfer down to the nanoscale. *Optics Express*, 22(12): 15075-15087.
- Muskens, O.L., Giannini, V., Sánchez-Gil, J.A. et Gómez Rivas, J. 2007. Optical scattering resonances of single and coupled dimer plasmonic nanoantennas. *Optics Express*, 15(26): 17736 – 17746.
- Ndao, A., Belkhir, A., Salut, R. et Baida, F.I. 2013. Slanted annular aperture arrays as enhanced- transmission metamaterials: Excitation of the plasmonic transverse electromagnetic guided mode. *Applied Physics Letters*, 103: 211901.
- Sendur, K. et Challener, W. 2003. Near-field radiation of bowtie antennas and apertures at optical frequencies. *Journal of Microscopy*, 210: 279283.
- Vo, T.-P., Mivelle, M., Callard, S., Rahmani, A., Baida, F., Charrat, D., Belarouci, A., Nedeljkovic, D., Seassal, C. et Burr, G.W. 2012. Near-field probing of slow bloch modes on photonic crystals with a nanoantenna. *Optics Express*, 20, 41244135.
- Wang, L. et Xu, X. 2007. High transmission nanoscale bowtie-shaped aperture probe for near-field optical imaging. *Applied Physics Letters*, 90: 261105.
- Wang, L., Uppuluri, S.M., Jin, E.X. et Xu, X. 2006. Nanolithography using high transmission nanoscale bowtie apertures. *Nano Letters*, 6: 361364.
- Wen, X., Traverso, L.M., Srisungsitthisunti, P., Xu, X. et Moon, E.E. 2014. Optical nanolithography with $\lambda/15$ resolution using bowtie aperture array. *Applied Physics A*, 117: 307 - 311.
- Yousif, B.B. et Samra, A.S. 2012. Modeling of optical nanoantennas. *Physics Research International*, 2012: 321075.