



## L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

**Titre: Optique de transformation et métamatériaux pour l'infrarouge**

**Title: Transformation optics and metamaterials for infrared**

---

*R. Ghasemi\*, N. Dubrovina\*, P.-H. Tichit\*, A. Degiron\* \*\*, A. Lupu\* \*\*, A. De lustrac\*\*\*\**

*\*IEF, Univ. Paris-Sud, UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France*

*\*\*CNRS, Orsay, 91405, France*

*\*\*\*Université Paris Ouest, France*

---

Mots-clefs : Métamatériau, optique de transformation, composant optique, infrarouge. Metamaterials, Transformation optics, optical devices, infrared..

---

### Résumé :

Dans cette étude l'optique de transformation est appliquée à la conception d'un adaptateur de mode entre deux guides dans le domaine des télécoms en proche infrarouge. Le contrôle du profil du mode dans l'adaptateur est réalisé en utilisant un guide d'onde comportant une fine couche de métamatériau insérée entre une couche de 2 $\mu$ m de résine SU8 et un substrat de verre. Nous démontrons en simulation que cette fine couche de métamatériau réalisée par transformation d'espace permet un contrôle précis de la propagation. Des simulations numériques et des réalisations expérimentales d'un métamatériau multicouches sont réalisées afin de valider la conception du circuit et sa faisabilité.

### 1. Introduction :

Les métamatériaux ont attiré une attention considérable pour leurs propriétés électromagnétiques nouvelles. En utilisant ces propriétés, on peut créer des composants innovants tels que des lentilles parfaites [1,2], des modulateurs [3] et des capes d'invisibilité qui peuvent rendre invisible une région de l'espace [4]. Il faut noter qu'il existe un certain nombre de problèmes dans le domaine optique. Ces structures sont souvent métalliques avec des pertes importantes dues au coefficient d'absorption élevée de métaux dans les domaines infrarouge et visible. En outre, ces composites sub-longueurs d'onde nécessitent une précision nanométrique. Grâce au progrès des nanotechnologies, des métamatériaux optiques peuvent être réalisés d'une manière simple sous forme de structures monocouches planaires. Dans une étude précédente [5], nous avons démontré que ces métamatériaux planaires avaient le potentiel d'être utilisés en optique guidée afin de contrôler l'énergie circulant dans un guide SOI. Un adaptateur de mode à métamatériaux a été conçu par la transformation d'espace entre deux guides d'onde SOI. Ici, nous avons développé ce concept pour des guides d'onde à faible indice. Autrement dit ce contrôle efficace peut être réalisé quelque soit le type de guide.

### 2. Adaptateur de modes pour les guides d'onde polymères :

La structure étudiée ici consiste en deux guides d'onde large et étroit séparés par une région centrale qui fonctionne comme un adaptateur de mode. Ces deux guides d'onde sont basés sur un polymère commercial, SU8 avec  $n=1.57$ . La largeur des guides d'onde d'entrée et de sortie est respectivement de 10 $\mu$ m et 2 $\mu$ m. La structure est illustrée sur la figure suivante :

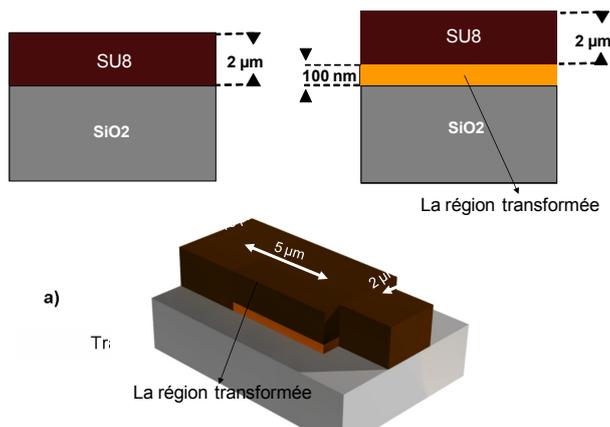


Figure1 : Structure de l'adaptateur de mode considérée dans cette étude.

La région en orange représente la région de l'adaptateur de mode où nous avons appliquée la transformation d'espace. Une série de simulations a montré que la transition entre les deux guides d'onde était la plus efficace lorsque la couche à métamatériaux était placée en dessous de la couche de polymère, ce qui permettait d'avoir un meilleur recouvrement entre le signal guidé et le métamatériau. L'adaptateur de mode est conçu par transformation d'espace. L'idée est de guider le signal comme si l'espace dans lequel il se propage était déformé [6]. Il faut noter que cette technique est ici bidimensionnelle (schéma gauche de la figure ci-dessous). Les coupes effectuées dans la simulation du guide montre que l'énergie converge progressivement du guide large vers le guide étroit en suivant la transformation d'espace de la couche située sous le guide.

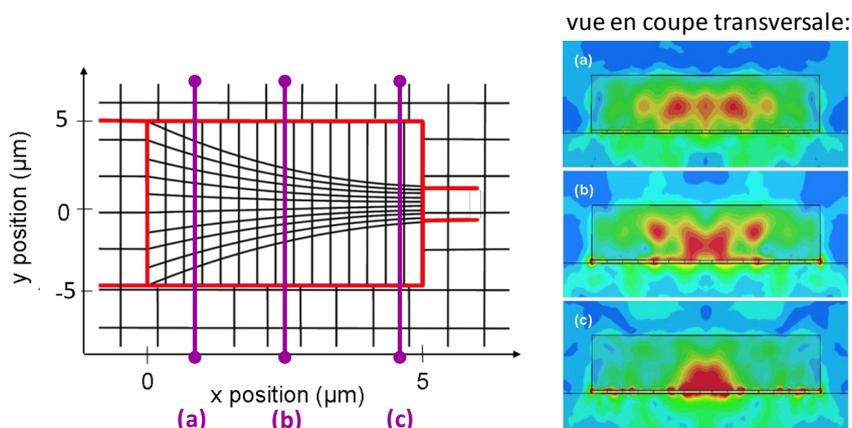


Figure2 : Gauche : Calculs de l'adaptateur de mode par la transformation d'espace. Droite : Coupe transversale de la structure dans les différentes positions (a), (b) et (c) de la région transformée (adaptateur de mode)

Une fois la transformation bidimensionnelle définie, nous l'avons appliquée dans la simulation de la structure en 3D où elle était insérée sous le guide large de 2 μm d'épaisseur afin de canaliser l'énergie sous la forme d'une fine couche de 100nm (couche orange de la figure 1). Pour analyser le comportement du signal dans la structure nous avons représentée sur la figure 2 des coupes transversales dans différentes positions de l'adaptateur. Ces positions sont indiquées sur le schéma de gauche de la figure2 dans les différents plans (a), (b) et (c). D'après l'évolution du champ dans la structure, on peut dire que le signal reste confiné à l'intérieur du polymère et que le profil du champ est assez gaussien. Donc cette couche fine de métamatériaux nous permet de guider le signal entre deux guides d'onde de différentes largeurs.

### 3. Fabrication : vers une structure réelle :

Pour réaliser un tel adaptateur, il importe de se demander quelle géométrie de métamatériau utiliser et ensuite de définir la technologie nécessaire de réalisation. Pour simplifier l'étude, dans un premier temps nous avons considéré les métamatériaux en configuration non guidée, en espace libre. C'est une étape indispensable pour réaliser cet adaptateur de mode. Il s'agit de réseaux de fils métalliques coupés superposés les uns sur les autres, dont les propriétés électromagnétiques peuvent être ajustées avec précision en ajustant le couplage entre les différents niveaux de fils, c'est-à-dire en modifiant leur alignement et leurs espacements. Ici nous avons réalisé différentes structures en variant les alignements par rapport à leurs voisins. La figure suivante montre ces différentes fabrications :

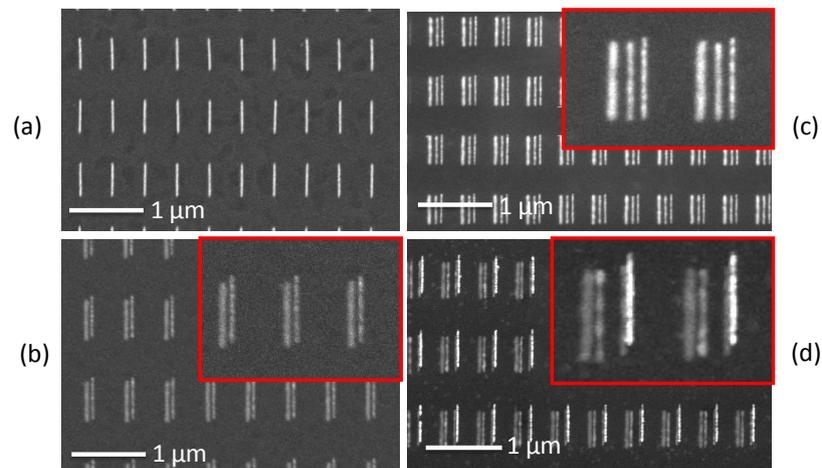


Figure 3 : Les structures multicouches fabriquées : (a) mono couche (b) 2 couches (c) 3 couches (d) 4 couches

L'épaisseur des fils est de 50nm, leur largeur est environ 30nm et leur longueur est de l'ordre de 440nm. La distance considérée entre les niveaux est ici de 65nm. Ces structures ont été réalisées dans la salle blanche de la Centrale de Technique Universitaire de l'IEF. Les dimensions et la période des fils coupés sont submicroniques de sorte que toute la couche se comporte comme un milieu homogène à une longueur d'onde de 1.55 $\mu$ m. Donc ces structures peuvent être réalisées par lithographie électronique puis métallisation (Ti-Au) et lift-off. Nous arrivons à réaliser des structures multicouches (jusqu'à 4 couches) sur un substrat de verre. Il faut préciser que nous sommes capable de contrôler la position de chaque couche de fil par rapport à ces voisins ce qui nous permet d'obtenir différents indices optiques. La figure suivante présente une comparaison des résultats numériques et expérimentaux de ces structures.

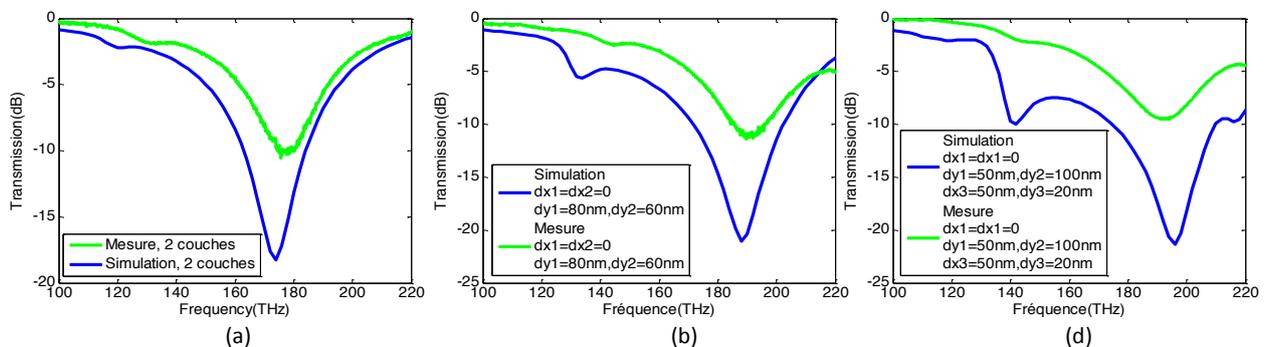


Figure 4 : Comparaison entre les résultats de mesure et simulations numériques pour les structures de 2 à 4 couches présentés dans la figure 6.

La courbe verte correspond aux résultats de mesures et la bleue représente les résultats de simulation. D'après les courbes quand le nombre de couches croît on observe un élargissement de la bande réfléchie de la structure du aux couplages entre couches. On constate un excellent accord entre les différentes courbes, à la différence près que les amplitudes des minima sont beaucoup plus marquées dans le cas des simulations. Cela s'explique par le fait que nos structures expérimentales sont éclairées à l'aide d'un faisceau convergent alors que les simulations sont effectuées avec une onde plane en incidence normale. Ces résultats nous permettent de générer des gradients d'indice complexes, adaptés à la transformations d'espace en infrarouge. Il faut rappeler que cette réalisation de métamatériaux multicouches en 3D sur substrat de verre est une étape intermédiaire vers la réalisation de l'adaptateur de mode, et d'autres dispositifs optiques en infrarouge.

#### 4. Conclusion :

Cette étude a montré que grâce à une couche fine calculée par la transformation d'espace placée entre deux guides d'onde, la propagation du signal à travers la structure peut être contrôlée de façon efficace. Les métamatériaux multicouches semblent d'être de bons candidats pour réaliser cet adaptateur de mode car d'après nos résultats en contrôlant la position des différentes couches par rapport à leurs voisins on peut faire de l'ingénierie d'indice de réfraction aux longueurs d'onde infrarouges.

Ce travail a été soutenu par l'Agence nationale Française de Recherche (ANR Metaphotonique, contrat n°7452RA09)

#### Références :

- [1] A. Grbic, and G. V. Eleftheriades, “Overcoming the diffraction limit with a planar left-handed transmission-line lens,” *Phys. Rev. Lett.* 92(11), 117403 (2004).
- [2] N. Fang, H. Lee, C. Sun, and X. Zhang, “Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens,” *Science* 308 (5721), 534–537 (2005).
- [3] H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide, A. C. Gossard, A. J. Taylor, and R. D. Averitt, “Active terahertz metamaterial devices,” *Nature* 444(7119), 597–600 (2006).
- [4] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, “Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies,” *Science* 314(5801), 977–980 (2006).
- [5] R. Ghasemi, P.H. Tichit, A. Degiron, A. Lupu, A. de Lustrac, “Efficient control of a 3D optical mode using a thin sheet of transformation optical medium”. *Opt. Express* 18, 20305 (2010).
- [6] P.-H. Tichit, S.N. Burokur, A. de Lustrac, “Waveguide taper engineering using coordinate transformation technology”. *Opt. Express* 18(2), 767 (2010)
- [7] S.N. Burokur, A. Sellier, B. Kante, A. De Lustrac, “Symmetry breaking in metallic cut wire pairs for negative refractive index”, *Appl. Phys. Lett.* 94, 201111 (2009)
- [8] B. Kante, S.N. Burokur, A. Sellier, A. De lustrac, J.-M. Lourtioz, “Controlling plasmon hybridization for negative refraction metamaterials”. *Phys. Rev. Lett.* B 79, 075121 (2009)