

Crystal photonic based SPR sensor for high-sensitivity applications

Directeur : Catherine ALGANI ; Co-directeur/suiveur : Elodie RICHALOT,
Maha BEN RHOUMA, Salim FACI
Laboratoire ESYCOM / ED MSTIC

Contexte

Les capteurs biologiques et chimiques jouent un rôle crucial dont l'utilisation répond à une demande croissante pour la surveillance de l'environnement afin de mesurer les contaminants tels que les polluants atmosphériques et les substances chimiques dangereuses dans l'air, l'eau ou le sol. Également, pour répondre au besoin de diagnostics médicaux plus rapides, plus fiables et à faible coût. D'autres secteurs d'activité tels que l'industrie alimentaire et la sécurité utilisent largement les capteurs.

L'une des familles de capteurs les plus performants est celle des capteurs plasmoniques basés sur l'utilisation des propriétés très sélectives des plasmons de surface (modes optiques ou plus généralement électromagnétiques 'vivants' à l'interface entre un métal et un diélectrique) qui ont fait la preuve de leur supériorité en tant que capteurs chimiques et biologiques [1], [2]. Ces capteurs plasmoniques exploitent la variation de la lumière lorsqu'elle interagit avec les substances d'intérêt. Cette catégorie de capteurs sans marquage est plus intéressante parce qu'elle ne nécessite pas une étape de préparation des échantillons assez longue à mettre en place, parfois critique et permet de préserver les fonctions biologiques. Le capteur photonique est composé d'une surface mise en contact avec l'analyte (substance), d'une source de lumière et d'un détecteur. L'interaction de la lumière avec la surface modifie ses paramètres ou propriétés. Le plus souvent, on souhaite mesurer la variation de l'indice de réfraction liée à la capture des substances d'intérêt au voisinage de la surface avec la technique d'interférométrie ou à l'aide du suivi du décalage spectral d'une résonance optique. Cette technique permet une mesure quantitative en temps réel de la densité de substances capturées.

Une autre famille de capteurs est celle basée sur des résonateurs dont le principe est d'exciter un mode de galerie dans l'anneau. L'ajout des cristaux photoniques constitués d'un réseau périodique de trous dans le substrat permet de contrôler la lumière, de la guider et ainsi d'améliorer la sensibilité du capteur. C'est une forme d'hybridation dans le but d'améliorer le volume d'interaction lumière/matière [3].

La photonique sur plateforme silicium est assez mature pour prévoir des composants innovants intégrés sur une même puce. La technologie hybride III-V sur silicium permet d'offrir des sources lasers de haute performance et de photodétecteurs à proximité de composants passifs sur silicium. L'intérêt d'utiliser le silicium est la compacité du circuit à cause de l'indice de réfraction élevé qui offre un fort guidage, un coût réduit et une compatibilité avec la technologie CMOS.

L'objectif de la thèse est la conception de capteurs hybrides à base de cristaux photoniques et plasmon de surface localisé de haute sensibilité. Ce capteur photonique fonctionne aux longueurs d'onde télécom afin de bénéficier de la technologie hybride III-V sur silicium offrant une forte intégrabilité. L'étude de ce type de capteur sera une première au niveau du laboratoire mais bénéficiera de l'expertise de l'équipe d'encadrement en modélisation, photonique sur silicium, dispositifs à plasmon de surface et cristaux photoniques.

Sujet de la thèse

1. Divers travaux à l'échelle nationale et internationale sur différents types de capteurs plasmoniques et photoniques. Par exemple, ces travaux répondent au besoin de développement de biocapteurs performants répondant aux critères du *Point-of-Care* offrant une détection sur le lieu de l'intervention, que ce soit au chevet du patient, dans un cabinet de médecin, etc. Ces capteurs ont pour objectif principal de réduire la durée nécessaire aux analyses, afin d'être en mesure de prendre une décision thérapeutique la plus rapide [4] ou dans le cas de la surveillance de l'environnement ;

2. Le point majeur dans cette thèse est l'hybridation des deux catégories de capteurs mais également d'exploiter le progrès de la photonique sur silicium pour concevoir un capteur intégré et compact. Ce type d'hybridation a été déjà étudié comme dans [5], le schéma de détection est celui de la variation de la résonance du capteur, la méthode de modélisation est la FDTD. Nous proposons aussi d'analyser la phase en fonction de la variation de l'indice, qui doit présenter une meilleure sensibilité que la variation de l'intensité. Également, nous nous intéresserons à l'intégrabilité du capteur avec la source laser et le photodétecteur ;
3. Publications dans les IEEE Sensors, IEEE J Quantum Electronics, Optics Letters.

Travail demandé

Dans un premier temps, l'étude portera sur les architectures simples à plasmon de surface de type Kretschmann ou Otto ainsi que sur des architectures simples de capteurs à cristaux photoniques sur silicium. Il s'agit de sélectionner la meilleure configuration à base d'îlots ou de trous de silicium de différents diamètres. Les diagrammes de dispersion de ces dispositifs seront déterminés. Les outils de modélisation seront développés avec la méthode modale de Fourier (FMM : Fourier Modal Method) qui constitue un moyen de calcul original et très performant pour analyser la propagation et la diffraction de la lumière à travers les structures périodiques [6], [7]. C'est une méthode électromagnétique rigoureuse car elle résout les équations de Maxwell dans toute leur généralité sans recourir à des approximations. Avec cette méthode, différents coefficients peuvent être déterminés comme la réflexion, la transmission ou l'absorption mais également les cartographies des champs électrique et magnétique dans toute la structure. L'amplitude et la phase du champ électrique sont ainsi accessibles. Il serait aussi envisageable d'associer une méthode d'optimisation à cette méthode et d'exploiter le calcul en parallèle pour les structures complexes.

S'en suit l'étude d'optimisation du capteur hybride avec la sélection des matériaux métalliques et l'analyse de la dispersion technologique. L'excitation des plasmons de surface est tributaire du métal, de la périodicité du réseau et des diamètres des cristaux photoniques.

La réalisation du capteur sera envisagée dans une version non optimale. L'intégration de la source laser et photodétecteur avec le capteur sera en fonction des éventuelles opportunités et l'avancement des travaux de thèse. En effet, la durée du Run de la technologie hétérogène III-V sur silicium est supérieure à une technologie classique.

La dernière étape concerne la quantification du capteur. Il s'agira de déterminer la sensibilité et le facteur de mérite en fonction des choix faits au niveau de l'étape précédente.

Profil recherché

1. The PhD candidate should have a multidisciplinary knowledge with a special focus on: Material sciences, applied physics, applied mathematics, nanotechnology and sensor.
1. Les pré-requis nécessaires pour mener à bien le présent projet de thèse sont de deux ordres : (i) le/la candidat.e doit avoir de solides connaissances des principes physiques de l'interaction onde/matière, électromagnétisme et des méthodes numériques lui permettant d'aborder l'étude des structures plasmoniques et cristaux photoniques envisagées dans la thèse et (ii) citer les compétences expérimentales éventuelles

Contact

Co-directrices de thèse

Catherine Algani, professeur des universités, catherine.algani@lecnam.net

Elodie Richalot, professeur des universités, elodie.richalot-taisne@univ-eiffel.fr

Co-encadrement

Maha BEN RHOUMA, Maître de conférences, maha.ben-rhouma@univ-eiffel.fr

Salim FACI, Maître de conférences, salim.faci@lecnam.net

Le laboratoire ESYCOM s'inscrit dans les domaines de l'ingénierie des systèmes de communication, des capteurs et des microsystèmes pour la ville, l'environnement et la personne.

Les thèmes abordés sont plus spécifiquement :

- les antennes et propagation en milieux complexes, les composants photoniques - micro-ondes ;
- les microsystèmes pour l'analyse de l'environnement et la dépollution, pour la santé et l'interface avec le vivant ;
- les micro-dispositifs de récupération d'énergie ambiante mécanique, thermique ou électromagnétique.

Bibliographie

- [1] J. Homola, "Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species", *Chemical Reviews* 2008 108 (2), 462-493
- [2] J. Homola, S. S. Yee, and G. Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors," *Sensors and Actuators B : Chemical*, vol. 54, no. 1, pp. 3–15, 1999.
- [3] M. Scullion, A. Di Falco, and T. Krauss, "Slotted photonic crystal cavities with integrated microfluidics for biosensing applications," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 27, pp. 101–105, Sept. 2011
- [4] S. Vashist, "Point-of-Care Diagnostics : Recent Advances and Trends," *Biosensors*, vol. 7, p. 62, Dec. 2017.
- [5] Hajshahvaladi, L., Kaatuzian, H., Moghaddasi, M. et al. Hybridization of surface plasmons and photonic crystal resonators for high-sensitivity and high-resolution sensing applications. *Sci Rep* 12, 21292 (2022).
- [6] B. Guizal, H. Yala, and D. Felbacq. Reformulation of the eigenvalue problem in the Fourier modal method with spatial adaptive resolution. *Opt. Lett.*, 34(18):2790– 2792, Sep 2009
- [7] M. Ben Rhouma," Graphene based 1D photonic crystals via the Fourier Modal Method", *Superlattices and Microstructures*, Vol. 111, pp : 466-474, November (2017).