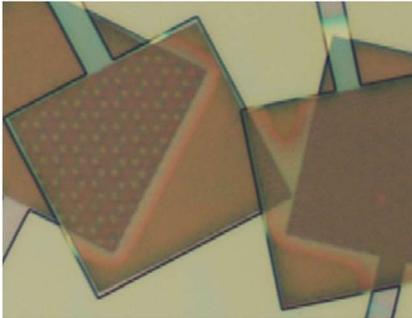


Sujet de thèse

Confinement de la lumière dans les moirés photoniques



Contexte :

Cette thèse s'inscrit dans le contexte général de la **Micro-Nano-Photonique** qui utilise les avancées technologiques pour structurer la matière à petite échelle afin de contrôler le comportement des photons dans des objets dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Cette démarche a rencontré un franc succès ces vingt dernières années et a permis des avancées majeures dans de nombreux domaines d'applications tels que les technologies de l'information, les

capteurs pour la santé et l'environnement ou la production d'énergie.

Les **motifs de moirés** sont des structures de super-réseau qui apparaissent lorsque deux réseaux (avec une orientation ou une période différente) sont superposés. Ce phénomène bien connu en optique classique, a été récemment exploité dans le domaine de la matière condensée. En particulier, des effets fascinants sont prévus lorsque l'effet moiré est obtenu à partir de deux feuillets de graphène superposés et twistés : en fonction de l'angle formé par les feuillets, des études montrent que le transport des électrons peut être complètement modifié et conduire à un phénomène de superconductivité pour des angles « magiques ».

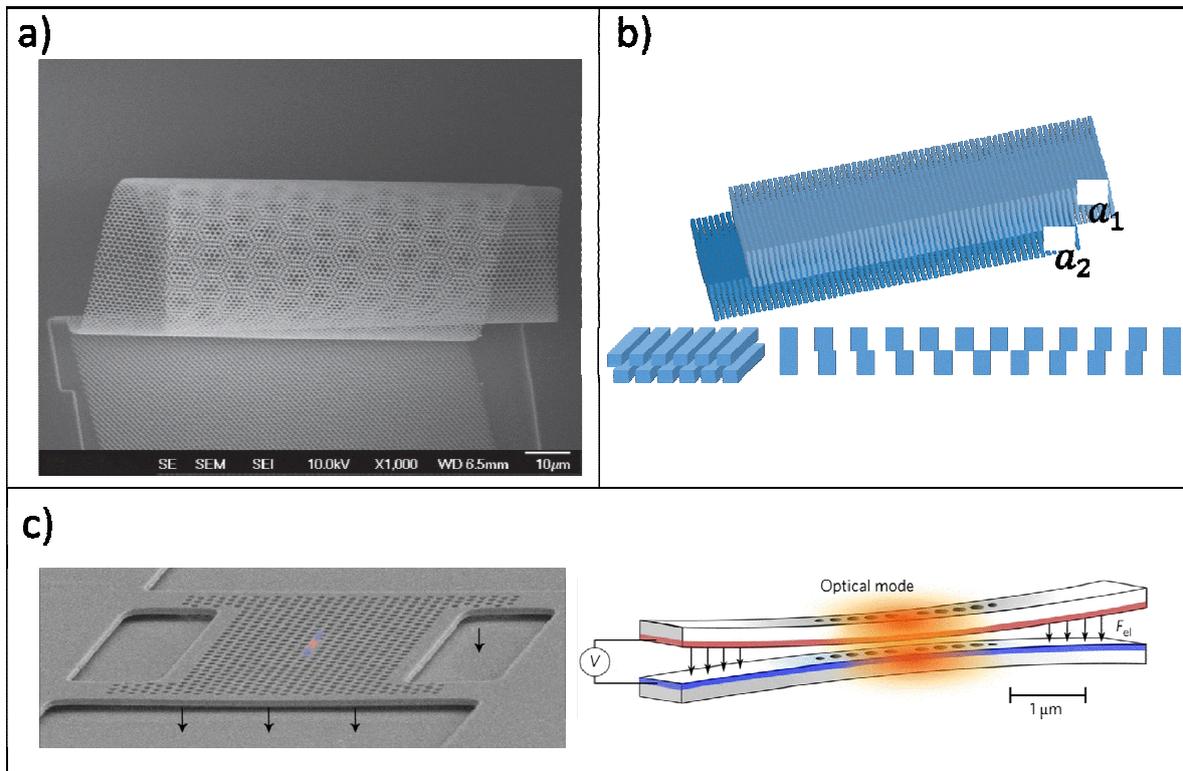
Dans le domaine de la nanophotonique, des effets tout aussi étonnants sont attendus à partir de moirés formés par la superposition de cristaux photoniques membranaires [1]. Objets emblématiques de la nanophotonique, les structures à base de cristaux photoniques sont actuellement une plateforme reconnue pour contrôler les propriétés de la lumière comme le confinement ultime de l'énergie électromagnétique, la vitesse de propagation des photons, la non-linéarité. L'équipe I-Lum de l'INL possède une expertise parfaitement établie dans ce domaine. En particulier, les chercheurs de l'INL ont récemment démontré que, dans les cristaux photoniques, l'exploitation de brisures de symétries, présentes aussi dans les moirés, permettait de façonner à volonté la relation de dispersion des photons, ouvrant ainsi la voie à une maîtrise inégalée des densités d'états optiques [2].

Mots-clefs : Cristaux Photoniques, Moirés, micro-résonateurs

Objectifs de la thèse :

L'objectif principal de cette thèse consiste à développer et appliquer les concepts de moirés photoniques pour **fabriquer des super-réseaux de micro-résonateurs dans lesquels les photons pourront être « stockés » efficacement**. Ces super-réseaux pourront être utilisés pour former les cavités résonantes de nouvelles sources de lumière (lasers monomodes grande surface par exemple).

Cet objectif passera par la réalisation de structures périodiques ou apériodiques, de type « Moirés », composés de 2 cristaux photoniques couplés décalés, « tiltés » ou de périodes légèrement différentes (voir figures ci-dessous).



Différentes voies technologiques pour fabriquer des « Moirés photoniques » : a) Moiré 2D « tilté » obtenu par auto-enroulement d'une membrane CP à l'INL [3], b) vues schématiques d'un Moiré 1D obtenu par double nanostructuration avec alignement c) Les technologies NOEMS (Nano-Systèmes Opto-Electro-Mécaniques) peuvent aussi être utilisées pour coupler des CP [4]

Verrous scientifiques

Le principal verrou réside dans la fabrication des structures qui nécessite d'aller au-delà des technologies planaires usuelles de la micro-opto-électronique, en combinant des savoir-faire en micro-nanostructuration et en micro-usinage sélectif de couches minces semiconductrices. La réalisation de ces objets d'étude consistera dans un premier temps à associer deux membranes à cristal photonique. Il s'agira de développer des procédés permettant de superposer deux de ces cristaux photoniques et d'ajuster leurs positions verticales et latérales respectives. La réalisation des cristaux photoniques élémentaires étant maîtrisée à l'INL, différentes pistes sont envisagées dans la thèse afin de contrôler leur superposition :

1. Fabrication successive de deux cristaux photoniques 2D en silicium, séparés par une couche d'oxyde de silicium de planarisation d'épaisseur finement ajustée. Le décalage latéral entre les deux structures photoniques sera contrôlé lors des étapes de lithographie.
2. Exploitation des procédés de sous-gravure sélective pour réaliser des cristaux photoniques membranaires déformables. Dans une première phase de l'étude, le positionnement des membranes superposées sera contrôlé en exploitant les effets de déplacement induit par la relaxation des contraintes mécaniques dans les couches minces, selon des procédés d'auto-enroulement développés dans un précédent projet. Dans une seconde phase, plus exploratoire, il s'agira d'étudier la faisabilité de contrôler activement les positions respectives des cristaux

photoniques membranaires (notamment par le biais d'un processus de type NOEMS, Nano-Systèmes Opto-Electro-Mécaniques).

Contributions originales attendues

Les objectifs de cette thèse visent avant tout à mettre en évidence les phénomènes fondamentaux prévus par des études théoriques sur des moirés formés de cristaux photoniques 1D. Les travaux réalisés permettront ainsi de mettre en évidence de nouvelles voies pour le confinement de la lumière et le contrôle de la relation de dispersion des composants. Les résultats expérimentaux obtenus en termes de fabrication de structures seront cependant génériques pour la production de nouveaux dispositifs optoélectroniques.

Le projet se concentrera plus particulièrement sur les deux pistes prometteuses que permettent de prévoir les propriétés remarquables des structures de type moiré :

- Génération naturelle et "spontanée", c'est-à-dire à très faible coût de conception en terme de paramètres ajustables, de dispositifs photoniques dotés de propriétés extraordinaires (par exemple production de pièges à photons miniaturisés et très résonants). Il est attendu, en corolaire, que la technologie d'élaboration de ces dispositifs soit particulièrement robuste.
- Capacité des dispositifs à base de moirés d'être modulables / commutables dans les domaines spatial, angulaire et fréquentiel, avec une très grande efficacité en terme du coût énergétique de leur actionnement.

Parmi les résultats attendus on peut citer :

- La **mise en place de procédés technologiques** permettant la fabrication de micro-objets tridimensionnels, ce qui peut donner lieu à des retombées bien au-delà de la photonique.
- La démonstration de **nouveaux mécanismes de confinement** des photons.
- **La réalisation de microsources** de lumière aux propriétés originales.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée

Le ou la doctorant(e) sera accueilli(e) au sein de l'équipe i-Lum de l'INL. Après un début de thèse consacré à l'étude bibliographique, à l'appréhension des concepts photoniques, ainsi qu'à la prise en main des différents outils expérimentaux nécessaires à la bonne marche du projet, le/la doctorant(e) aura tout particulièrement la charge d'optimiser les différentes étapes technologiques nécessaires à la fabrication des structures moirés. Il/elle sera amené(e) à tester et à évaluer les différentes voies de fabrication 3D afin de sélectionner celle(s) permettant l'obtention de structures photoniques fonctionnelles. Cette évaluation passera par la caractérisation optique des structures, à la fois en champ lointain et en champ proche, sur divers bancs optiques disponibles au laboratoire. Le/la doctorante pourra s'appuyer sur l'expertise reconnue de l'équipe i-Lum dans le domaine des structures à base de cristaux photoniques, ainsi que sur les moyens de la plateforme de technologie Nanolyon.

Le/la candidat(e)

Profil recherché (prérequis)

Le ou la candidat(e) doit avoir des connaissances solides en science de la matière et/ou en électromagnétisme, avec une forte motivation pour les travaux technologiques et expérimentaux.



Compétences développées au cours du doctorat

Cette thèse sera principalement centrée sur les aspects de fabrication et de caractérisation. Le ou la doctorant(e) recevra donc une solide formation technologique en environnement salle blanche sur des équipements tels que la lithographie électronique, la gravure sèche, la microscopie électronique,... De même, il/elle développera des compétences en simulation électromagnétique et en caractérisations optiques de dispositifs nanophotoniques (micro-photoluminescence à température ambiante et à froid, spectroscopie de Fourier, microscopie à champ proche optique,...).

Perspectives professionnelles après le doctorat :

Ces compétences acquises lors de la thèse lui permettront de poursuivre une carrière académique, ou de travailler dans l'industrie (microélectronique, R&D, ingénierie et management).

Financement de la thèse : Contrat doctoral de l'École Centrale de Lyon (sujet prioritaire)/ École doctorale EEA de Lyon.

Laboratoire : Institut des nanotechnologies de Lyon, site de l'École Centrale de Lyon

Contacts :

Xavier Letartre (directeur de thèse) xavier.letartre@ec-lyon.fr

Sékolène Callard (co-directrice de thèse) segolene.callard@ec-lyon.fr

Sébastien Cueff (co-encadrant de thèse) sebastien.cueff@ec-lyon.fr

-
- [1] P. Wang et al., Nature 577, 42–46 (2020). Voir aussi : G. Hu et al., Nano Lett. 20, 5, 3217–3224 (2020) et G. Hu. Et al., Nature 582, 209–213 (2020)
- [2] H.S. Nguyen et al., Phys. Rev. Lett. 120, 066102 (2018)
- [3] A Danescu et al., Nanotechnology 29, 285301 (2018)
- [4] L. Midolo et al., Nature Nanotechnology 13, 11–18 (2018)

