Abstract

Inspired from the Origami art of folding, the rolled-up nanotechnology has proved to be a competitive alternative toward the production of 3D microstructures through the self-rolling of pre-stressed membranes. This technique has enriched the palette of existing 3D microstructures, proposing unconventional geometries (tubes, coils) accessible with a large range of materials. Based on the stress-engineering method, a high degree of control over the size and geometry of the structures can be achieved, making them suitable in a wide range of applications. Among the variety of 3D architectures, rolled-up tubular microcavities have drawn great interest for optofluidic applications by combining their microchannel geometry and particular optical properties of the tube to produce highly sensitive fluid sensors.

Applying the stress-engineering method to fold more complex surfaces such as photonic nanostructured membranes generates a new class of 3D photonic micro-objects with original designs and tailored optical properties. Micrometer-sized patterning provides additional degrees of freedom with the modification of the dispersion of the planar membrane, leading to various optical functionalities including the guiding, the trapping, or the slowing of light. In particular, the combination between photonic crystal patterns and 3D rolled-up geometries offers new strategies for the management of light.

In this thesis, we propose the conception and characterization of “photon cages” based on the rolling of highly reflective 2D photonic crystal membranes. The reflecting walls allow to trap efficiently the light in the hollow low-index core, optimizing the overlap between the localized electromagnetic field and the surrounding medium, a keystone in sensing operations. Parameters of the photonic crystal membrane were adjusted to obtain an efficient reflector (reflectivity R>95 $\%$) over a large spectral range (>100 nm) in near infrared domain. The cylindrical cavity resonator model and FDTD simulations were used to predict the optical response of the rolled-up membrane. Tubular cavities were then fabricated using stress engineering technique. Near-field optical measurements were carried out to investigate the modes in the hollow of the cavity, revealing the presence of cavity modes in compliance with theoretical computations, and bringing an experimental validation to the photon cage concept.

In this work, we also exploit the rolled-up nanotechnology to extend the analogy between solid-state and photonic structures toward the fabrication and characterization of photonic crystal analogues of carbon nanotubes. Numerical simulations were performed to design graphene-like photonic structures with a Dirac point centred at 1.55 µm. Numerical calculations of the topological invariant and the band structure of graphene-like photonic ribbons with zig-zag edge shape demonstrated the existence of topological edge states. We calculated the optical dispersion of photonic microtubes in accordance with zone-folding predictions. We report highly reproducible fabrication of photonic nanotubes with honeycomb pattern. Preliminary angular-resolved spectral measurements of the structures have revealed dispersive features of the membrane wall but no signature of the microtube yet.

Résumé

Inspirée de l'art du pliage papier Origami, la technique de nano-fabrication par enroulement s'est avérée être une alternative compétitive à la production de microstructures 3D par l'auto-enroulement de nano-membranes précontraintes. Cette technique a enrichi la palette existante de microstructures 3D, en proposant des géométries originales (tubes, spirales) accessibles suivant une large gamme de matériaux. Basée sur la méthode d'ingénierie des contraintes, cette technique permet aussi un contrôle très précis sur la taille et la géométrie des structures 3D obtenues, les rendant ainsi adaptées à un large éventail d'applications. Parmi les architectures 3D réalisables, les microcavités tubulaires obtenues par enroulement ont suscité un grand intérêt pour les applications opto-fluidiques en combinant leur géométrie de microcanaux et les propriétés optiques particulières du tube pour produire des capteurs de fluide très sensibles.

La méthode d'ingénierie des contraintes appliquée au pliage de surfaces plus complexes telles que des membranes photoniques nano-structurées forme une nouvelle classe de micro-objets photoniques 3D avec des formes et des propriétés originales. La structuration de taille micrométrique offre des degrés de liberté supplémentaires avec la modification de la dispersion de la membrane plane, conduisant à diverses fonctionnalités optiques dont le guidage, le piégeage ou le ralentissement de la lumière. En particulier, l’association de motifs de cristal photonique avec des géométries enroulées 3D offre de nouvelles stratégies pour la gestion de la lumière.

Dans cette thèse, nous proposons la conception et la caractérisation de « cages à photons » basées sur l’enroulement de membranes à cristaux photoniques 2D hautement réfléchissantes. Les parois réfléchissantes permettent de piéger efficacement la lumière dans le noyau creux à faible indice, optimisant l’interaction entre le champ électromagnétique localisé et le milieu environnant, indispensable pour les applications de détection. Les paramètres de la membrane à cristal photonique ont été ajustés pour obtenir un réflecteur efficace (réflectivité R>95%) sur une large gamme spectrale (>100 nm) dans le domaine proche infrarouge. Le modèle de résonateur à cavité cylindrique et des simulations FDTD ont été utilisés pour prédire la réponse optique de la membrane enroulée. Les cavités tubulaires ont ensuite été fabriquées en utilisant la technique d'ingénierie des contraintes. Des mesures optiques en champ proche ont été réalisées pour étudier les modes à l’intérieur de la cavité, révélant la présence de modes de cavité en accord avec les calculs théoriques, et apportant une validation expérimentale au concept de cage à photons.

Dans ce travail, nous exploitons également la nanotechnologie par enroulement pour étendre l'analogie entre les structures de la physique du solide et celles de la photonique à la fabrication et caractérisation d'analogues de nanotubes de carbone dans la classe des cristaux photoniques. Des simulations numériques ont été réalisées pour concevoir des structures photoniques de type graphène avec un point de Dirac centré à 1,55 µm. Des calculs numériques d’invariant topologique et de structure de bandes de rubans photoniques avec motif nid d’abeille et un bord en zigzag ont démontré l'existence d'états de bord topologiques. Nous avons calculé la dispersion optique des microtubes photoniques qui concorde avec les prédictions obtenues avec la méthode de repliement de zone. Nous rapportons la fabrication très reproductible de nanotubes photoniques avec motif en nid d'abeille. Des mesures spectrales et résolues en angle préliminaires des structures ont révélé des caractéristiques dispersives de la paroi de la membrane mais aucune signature du microtube pour le moment.

**Titre thèse :**

Origamis semiconducteurs : résonateurs photoniques et applications à la topologie.

**Thesis title**

Semiconducting Origamis: photonic resonators and topological applications.

**Mots clés :**

Nanotechnologies par enroulement, cristaux photoniques, cages à photons, champ proche optique, photonique topologique

**Keywords :**

Rolled-up nanotechnology, photonic crystals, photon cages, near-field optics, topological photonics