# Titre de la thèse

Accordabilité des composants photoniques à base de structures hybrides graphène/diélectrique adressables par la surface

# Résumé

L’émergence d’une grande variété de structures photoniques, au cours des dernières décennies, a permis le développement de composants intégrés sur puce réalisant des fonctions optiques en espace libre de plus en plus complexes. Parmi elles, les structures diélectriques membranaires ont permis d’implémenter une large panoplie de composants optiques planaires, allant du filtrage spectral résonant à la mise en forme de faisceau avec de faibles pertes. Toutefois, si ces structures permettent d’obtenir un contrôle quasi-total du champ électromagnétique rayonné, ce contrôle est généralement statique et déterminé par la fabrication. Un nombre croissant d’applications – telles que les télécommunications en espace libre, les capteurs pour systèmes autonomes ou encore l’imagerie – nécessitent pourtant des composants photoniques agiles, motivant ainsi la recherche de moyens de contrôle actifs de la réponse optique à implémenter au sein des structures diélectriques.

À cette fin, différentes propriétés du graphène s’avèrent prometteuses. En particulier, la possibilité de moduler dynamiquement son absorption ouvre de nombreuses perspectives pour le contrôle électrique et optique des structures photoniques intégrant du graphène. Des modulateurs électro-optiques et tout-optique ont ainsi pu être réalisés, s’appuyant sur le développement récent de procédés de transfert des matériaux 2D qui permettent aujourd’hui d’obtenir des structures hybrides graphène/diélectrique de grande qualité.

Dans ce contexte, les travaux présentés dans cette thèse cherchent à exploiter l’absorption modulable du graphène pour obtenir une accordabilité dynamique de la réponse optique des composants adressables par la surface, dans le cas particulier de structures photoniques diélectriques travaillant dans le proche infrarouge.

Un modèle générique de composant hybride diélectrique/ graphène est tout d’abord développé en théorie des modes couplés afin d’identifier les paramètres d’intérêt pour maximiser le contrôle permis par l’absorption du graphène. Dans le cas à une résonance, le comportement du système est principalement déterminé par la condition de couplage critique classiquement définie pour l’étude de l’absorption du graphène. Dans le cas à deux résonances en revanche, un nouveau paramètre de contrôle – associé à la différence d’absorption induite sur les résonances – permet d’obtenir un levier d’accordabilité supplémentaire. Différentes stratégies de maximisation de ce paramètre sont proposées et les procédés technologiques nécessaires à leur implémentation sont étudiés expérimentalement afin d’évaluer – par le biais de la spectroscopie Raman et de la spectroscopie de photoélectrons – leur effet sur la qualité structurelle et chimique du graphène, intégré dans de telles structures.

La modulation spatiale de l’absorption du graphène – proposée pour différencier l’absorption induite sur différents modes optiques – est ensuite étudiée expérimentalement à l’aide de structures exploitant le transfert de charges entre le graphène et un oxyde à grand travail de sortie, à savoir l’oxyde de tungstène. Les dispositifs réalisés permettent d’obtenir une modulation du potentiel chimique du graphène de 0.1eV – caractérisée par nano-XPS (ligne ANTARES du synchrotron SOLEIL) et spectroscopie Raman – pouvant aboutir à une modulation de l’absorption supérieure à 70% pour certaines longueurs d’onde.

Finalement, une architecture de composant hybride actif permettant d’obtenir un contrôle dynamique de l’émission laser est proposée. Cette architecture repose sur l’utilisation d’une membrane à brisure de symétrie verticale et permet, en principe, d’obtenir une commutation entre deux angles d’émission par la modulation de l’absorption du graphène. L’intérêt de ces structures pour parvenir à une accordabilité continue de l’angle d’émission est également exposé.

# Mots-clés

nanophotonique, optique intégrée, modulation optique, accordabilité dynamique, cristaux photoniques, métasurfaces diélectriques, matériaux 2D, graphène, oxydes à grand travail de sortie, théorie des modes couplés, spectroscopie Raman, spectroscopie de photoélectrons

# Thesis title

Tunability of surface-addressable photonic devices based on graphene/dielectric hybrid structures

# Abstract

The emergence of a wide variety of photonic structures over the past decades has enabled the realization of on-chip devices performing increasingly complex free-space optical functions. Among them, dielectric membrane structures have made it possible to implement a wide range of planar optical devices, ranging from resonant spectral filtering to beam shaping, with negligible losses. While these structures provide almost a full control of the radiated electromagnetic field, this control is usually static and determined by manufacturing. An increasing number of applications - such as free-space telecommunications, sensors for autonomous systems or imaging - require agile photonic devices, thus motivating the search for means of active control of the optical response to be implemented within the dielectric structures.

To this purpose, various properties of graphene are proving promising. In particular, the capability to modulate its absorption opens up numerous prospects for the electrical and optical control of photonic structures that integrate graphene. This has led to the demonstration of various electro-optic and all-optical modulators, by leveraging the recently developed 2D material transfer processes, which have made it possible to obtain high-quality hybrid graphene/dielectric structures.

In this context, the work presented in this thesis seeks to exploit graphene’s tunable absorption to achieve dynamic control of surface-addressable device’s optical response, in the special case of dielectric photonic structures operating in the near infrared.

A generic coupled mode theory model is first developed and adapted to hybrid dielectric/ graphene structures in order to identify the key parameters for maximising the control allowed by graphene absorption. In the single resonance case, the system’s response is mainly determined by the critical coupling condition classically defined for the study of graphene’s absorption. In the two-resonance case however, a new control parameter – associated with the absorption difference between the resonances – provides an additional tunability factor. Different strategies for maximising this parameter are therefore proposed and the technological processes underlying their implementation are studied experimentally in order to assess - by means of Raman spectroscopy and photoelectron spectroscopy - their effect on the structural and chemical quality of graphene.

The spatial modulation of graphene’s absorption – here proposed to differentiate the absorption induced on different optical modes – is then studied experimentally using structures exploiting the charge transfer effect at the interface between graphene and an oxide with high workfunction, namely tungsten oxide. The devices developed here allow to obtain a graphene’s chemical potential modulation of 0.1eV - characterized by nano-XPS (ANTARES beamline of the SOLEIL synchrotron) and Raman spectroscopy - which can lead to an absorption modulation higher than 70% for certain wavelengths.

Ultimately, an active hybrid device architecture enabling dynamic control of the laser emission is proposed. This architecture is based on a vertical symmetry breaking membrane and allows us, in principle, to switch between two emission angles by modulating graphene’s absorption. The interest of these structures in achieving continuous tunability of the emission angle is also presented.

# Keywords

nanophotonics, integrated optics, optical modulation, dynamical tunability, photonic crystals, dielectric metasurfaces, 2D materials, graphene, high workfunction oxides, coupled mode theory, Raman spectroscopy, photoelectron spectroscopy