

# Abstract

Plasmonics based on 2D materials is a burgeoning field in photonics with potential ground-breaking technological implications for diagnostics, energy, and data communication. Graphene, a unique 2D material with excellent plasmonic properties is a promising alternative to conventional noble metals in plasmonics notably due to its tunable properties. Graphene is modelled in this thesis as an infinitesimally thin current carrying sheet in a fully vectorial finite element Galerkin framework as opposed to more conventional models where graphene is considered to be of finite thickness. A cross-sectional model is validated against the established analytical and numerical results of graphene-coated nanowire structure, and then used to conduct cross-sectional studies of graphene-covered waveguides of various geometries. The studies reveal the behaviour of graphene plasmon modes with wavelength and width of the waveguides, further the properties of hybrid modes are studied. A rigorous study of the behaviour of the electromagnetic field along the propagation direction in an open ridge waveguide is carried out by modelling graphene as a 1D conductive scatterer which acts as a local perturbation. The scattering model is verified through a full energy balance in different geometries. Further the scattering formalism for linear materials is free of approximations and it is independent of any hypothesis regarding size, shape, or permittivity. Both the modal eigenvalue problem and the 2D open waveguide scattering problem demonstrate without ambiguity the increased accuracy and computational ease of incorporating graphene as a 2D conductive sheet rather than modelling graphene via a bulk permittivity. The large momentum mismatch that exists between the waveguide mode and the graphene plasmon mode in a graphene-based waveguide severely alters the coupling between these two modes. To overcome this, a coupler is designed using the developed scattering field formalism. In the designed non-tapered waveguide-based coupler, an incident dielectric TM dielectric waveguide mode is coupled to the graphene plasmon mode in a plane graphene sheet of finite length. A significantly tight field confinement around the plane graphene sheet is obtained in comparison to noble metals. Graphene Fermi level tuning studies are conducted with the proposed coupler which makes the coupling tunable using electrostatic biasing even after fabrication. Elaborate studies of the beating phenomenon observed in the coupler are performed. The designed waveguide coupler is apt for graphene of lengths equal to or shorter than the order of the wavelength ( $10\ \mu\text{m}$ ). Several studies involving the various diffraction orders of the grating coupler, waveguide thickness, etc. are conducted. The parameters of the coupler are then optimized to yield a compact and integrated graphene based grating coupler of efficiency as high as 80% in the infrared region at  $12\ \mu\text{m}$ .

# Résumé

La plasmonique basée sur les matériaux 2D est un domaine en plein essor dans la photonique, avec des implications technologiques potentielles révolutionnaires dans des domaines aussi variés que le diagnostic, l'énergie et la communication. Le graphène, un matériau 2D unique et doté d'excellentes propriétés plasmoniques, est une alternative prometteuse aux métaux nobles conventionnels dans le domaine de la plasmonique, notamment en raison de ses propriétés accordables en fréquence. Le graphène est modélisé dans cette thèse comme une feuille conductrice infiniment mince dans le cadre des éléments finis (vectoriels) de Galerkin, par opposition aux modèles plus conventionnels où la feuille de graphène est considérée comme ayant une épaisseur finie. Un modèle considérant la section transversale d'un guide recouvert d'une feuille de graphène est validé par rapport aux résultats analytiques et numériques existant dans la littérature, puis utilisé pour mener des études de section transversale de guides d'ondes recouverts de graphène dans différentes géométries et configurations. Ces problèmes aux valeurs propres révèlent le comportement des modes plasmoniques du graphène en fonction de la longueur d'onde et de la largeur des guides d'ondes, et les propriétés des modes hybrides sont également étudiées. Une seconde étude 2D rigoureuse du comportement du champ électromagnétique le long de la direction de propagation dans un guide d'ondes ouvert est réalisée en modélisant le graphène comme un diffuseur (1D) qui agit comme une perturbation locale au guide (éclairé par un des modes du guide nu). Le modèle de diffusion est vérifié par un bilan énergétique complet ainsi que des études de convergences, et ce, dans différentes géométries. Le problème modal aux valeurs propres et le problème de la diffusion dans un guide d'ondes ouvert en 2D démontrent sans ambiguïté la précision accrue et la facilité de calcul de l'incorporation du graphène comme une feuille conductrice en 2D plutôt que de modéliser le graphène par une permittivité volumique. Enfin, l'important décalage d'indice effectif qui existe entre le mode du guide d'ondes diélectrique et le mode plasmonique du graphène altère le couplage. Pour surmonter ce problème, un coupleur est conçu à l'aide du formalisme direct en champ diffracté développé. Dans le coupleur conçu à base de petits éléments de graphène, on cherche à coupler un mode de guide d'ondes diélectrique TM incident au mode plasmonique du graphène. Un confinement de champ significatif est obtenu autour de la feuille de graphène plane, en comparaison avec ce qui est obtenu avec les métaux nobles de la plasmonique. Des études paramétriques sur le niveau de Fermi du graphène sont menées avec le coupleur proposé, ce qui rend le couplage accordable via un champ électrostatique extérieur, même après fabrication. Des études approfondies du phénomène de battement observé dans le coupleur sont également réalisées. Le coupleur de guide d'ondes conçu est adapté au graphène de longueurs égales ou inférieures à l'ordre de la longueur d'onde ( $10 \mu\text{m}$ ). Plusieurs études impliquant les différents ordres de diffraction du réseau coupleur, l'épaisseur du guide d'ondes, etc. sont menées. Les paramètres du coupleur sont ensuite optimisés pour obtenir un coupleur à réseau compact et intégré à base de graphène dont l'efficacité atteint 80% à dans l'infrarouge à  $12 \mu\text{m}$ .