

Résumé de thèse:

“All dielectric nonlinear nanophotonics – Nanophotniqne nonlinéaire diélectrique”

Valerio Flavio Gili

Immédiatement après la commercialisation des premiers ordinateurs analogiques, le besoin de miniaturisation des systèmes a augmenté pas à pas avec l'espace occupé et de la consommation d'énergie. Cette demande a en suite été satisfié par l'émergence des circuits intégrés monolithiques, aboutissant au standard technologique dit "Complementary Metal-Oxide-Semiconductor" (CMOS). Parallèlement, une tendance similaire à la miniaturisation et à l'intégration a caractérisé le domaine de la photonique, après la démonstration de la première diode laser à semi-conducteur III-V en 1962, qui a rapidement suivi l'invention du laser en 1960 et celui du diode électroluminescente en 1955. Plus récemment, le paradigme des Circuits Intégrés Photoniques (CIP) suscite de plus en plus d'attention, car on prévoyait une saturation de la loi de Moore sur les circuits électroniques au cours de la prochaine décennie, dû à l'approche de la limite physique d'intégration. Jusqu'à présent, le succès des CIPs a été énorme, avec la réalisation de blocs de construction de base tels que modulateurs de lumière, détecteurs, guides d'ondes, coupleurs, multiplexeurs etc., utilisant un matériau à faible coût comme le Silicium. Malgré le succès, l'application des CIPs en Si-sur-puce a été limitée aux fonctionnalités passives, à cause de la présence des pertes nonlinéaires dans ce matériau. D'autre part, les éléments du groupe III-V de la table périodique offrent une large gamme d'alliages semi-conductrices, tels que l'arséniure d'aluminium et de gallium (AlGaAs), l'arséniure d'indium et de gallium (InGaAs), le phosphure d'indium (InP), etc., qui présentent toutes les caractéristiques directes requises: une bande interdite directe pour les applications laser, et une réponse optique nonlinéaire énorme aux longueurs d'onde des telcommunications. Malgré ces avantages, une plateforme monolithique semiconductrice III-V n'a jamais été développée. Dans ce cadre, l'effort de mon travail de thèse, était la réalisation et validation d'une plateforme monolithique AlGaAs-sur-oxyde pour la conversion de fréquence, basée sur l'oxydation sélective d'une couche d'AlGaAs riche en Al, permettant l'intégration des micro/nanostructures sur un substrat d'oxyde à faible indice. Nos efforts technologiques ont été validées dans des nanostructures (~ 100 nm) résonantes pour des longueurs d'onde de pompe à $1,55 \mu\text{m}$. Avec ce choix, nous avons pu accéder au régime physique de la théorie de Mie, défini par un paramètre de taille $x = l/\lambda \sim 1$. L'intérêt de sonder ce régime est motivé par le grand nombre de résultats obtenus pendant une vingtaine d'années dans le domaine de la plasmonique, qui définit l'interaction entre une onde électromagnétique et le nuage des électrons libres entourant un métal, qui donne lieu à un confinement de champ sous-longueur d'onde. L'emploi d'un matériau diélectrique permet au

contraire de surmonter les limitations causées par les pertes ohmiques dans les métaux. La fabrication et la caractérisation nonlinéaire de tels objets est le résultat d'un travail de collaboration impliquant plusieurs groupes de recherche dans le cadre du projet NANOPHI, financé par l'Union Européenne, incluant The Australian National University, Australie, The King's College, Londres, Politecnico di Milano, Italie et Università di Brescia, Italie. Mes efforts en vue de la fabrication efficace d'une plateforme monolithique AlGaAs-sur-AlOx ont tout d'abord conduit à la démonstration de la Génération de Seconde Harmonique (SHG) dans des nanocylindres isolés, présentant une efficacité de conversion de plus de cinq ordres de grandeur plus élevée, comparée à la valeur typique dans des nanostructures plasmoniques. Après cette première étude, nous avons analysé plus en détail la réponse en polarisation et l'influence du substrat en oxyde sur la SHG. Pour améliorer la directionnalité de radiation, on a en suite exploité deux approches: reconfiguration de la pompe et utilisations des réseaux de diffraction intégrés. De plus, nous avons étudié des dimères et des structures hybrides métal-diélectrique excités à la condition dite Anapole, afin de mieux comprendre la physique des nanorésonateurs de Mie et augmenter l'efficacité SHG. Notre étude a finalement porté sur la mesure d'autres effets non linéaires de second ordre, tels que la Génération de Fréquence Somme et la Conversion Paramétrique Descendante Spontanée (SPDC), permettant de démontrer la plus petite source de paires de photons corrélées. Les résultats obtenus pendant de cette thèse conduisent à des applications intéressantes, notamment la goniométrie non linéaire, l'holographie non linéaire et la vision nocturne. Pour résumer, ma thèse a été basée au début sur le développement technologique d'une plateforme photonique monolithique AlGaAs-sur-AlOx, où le substrat d'oxyde est obtenu par oxydation sélective. Par rapport à l'état de l'art, nous avons réussi à démontrer pour la première fois un substrat épais (jusqu'à deux microns), grâce à l'intégration de deux couches de transition optiquement négligeables, qui minimisent les contraintes mécaniques pendant l'oxydation. Après, la deuxième partie de ma thèse a été consacrée à la caractérisation de cette plateforme dans le régime de la nanophotonique nonlinéaire. Les résultats obtenus pointent vers un possible changement dans les paradigmes de la photonique nonlinéaire moderne, avec la possibilité de dépasser les limitations du Silicium sans perdre la commodité d'une plateforme monolithique.