

Proposition de **SUJET DE STAGE M2R/Ingénieur-3A**

Laboratoire : Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (UMR 9001)
Adresse : Bâtiment 220 de l'UFR Sciences / Université Paris-Sud



Contact: **Eric CASSAN**

Phone number: 01 69 15 78 52

e-mail : eric.cassan@u-psud.fr <http://silicon-photonics.ief.u-psud.fr/>

“ Estimation des paramètres non-linéaires d'ordre 3 de guides standard et à modes lents de la photonique silicium par simulation numérique et croisement à des mesures expérimentales ”

Projet scientifique :

La photonique silicium a connu ces dernières années un développement très marqué. Des avancées spectaculaires ont été obtenues en terme de guidage de la lumière (**Figs. 1 et 2**) et de développement de composants optoélectroniques dans la fenêtre télécom. Ces résultats ont conduit à des démonstrations successives qui ont rendu tout à fait viable une co-intégration de l'électronique CMOS et de la photonique intégrée sur les mêmes substrats silicium (sur isolant). Ces développements, basés sur l'intégration de circuits optiques complets sur puce, de modulateurs électro-optiques fonctionnant à ~50GHz typiquement, et de photodétecteurs germanium compact et rapides (~50GHz), commencent à être portés par les industriels de la microélectronique. Simultanément, des limites à cette approche apparaissent : la puissance consommée par les circuits, de plus en plus prohibitive, devient un enjeu, et les débits d'informations peinent à dépasser les 50GHz par longueur d'onde.

Pour ces raisons, l'utilisation de **solutions tout-optiques** de traitement des informations est devenue un enjeu. Dans cette approche, les **effets optiques nonlinéaires d'ordre 3** sont principalement utilisés en photonique CMOS car le silicium (non contraint mécaniquement) ne présente pas d'effet électro-optique à l'ordre 2 (effet Pockels). L'utilisation des nonlinéarités d'ordre 3 du silicium, et des matériaux qui peuvent être intégrés sur silicium, permet d'accéder à un **panel d'effets pouvant conduire à un éventail de fonctions optiques nonlinéaires : modulation tout-optique** (un faisceau pompe de forte puissance venant moduler un faisceau signal), modulation croisée, génération de fréquences et de peignes de fréquences, génération de supercontinuum, voire de solitons, etc (voir **Fig. 3**). La propagation d'impulsions de lumière (typiquement picosecondes) dans de tels guides résulte principalement d'une intrication entre trois effets : les effets de polarisation nonlinéaire d'ordre 3, la présence de porteurs (électrons et trous), et les effets dispersifs (les guides silicium, à fort confinement du champ, sont très dispersifs du point de vue de la vitesse de groupe : GVD, pour Group Velocity Dispersion). Il en résulte une **physique riche mais rapidement complexe pour interpréter les résultats de mesures** et extraire les paramètres effectifs nonlinéaires des guides silicium et silicium-hybride exploités en nanophotonique silicium. A ceci s'ajoute le fait que le fonctionnement des structures photoniques étudiées repose souvent sur des mécanismes de renforcement du champ électromagnétique (guides à modes lents et cavités) : voir **Figs. 4 et 5**. L'extraction précise des paramètres nonlinéaires des guides et matériaux rapportés sur silicium est cruciale pour le développement de fonctions de traitement tout-optique sur puce. Différentes approches expérimentales existent mais on note dans la littérature une certaine dispersion des valeurs rapportées par ces méthodes. Ces méthodes sont le plus souvent croisées à des méthodes de simulation numérique de la propagation des impulsions optiques en présence des porteurs et, le cas échéant, de plusieurs signaux optiques (pompe, signal, voire des configurations plus complexes).

Dans ce contexte, **le sujet de stage proposé vise à développer des simulations numériques permettant d'extraire, à partir de campagnes de mesures expérimentales et de références bibliographiques les paramètres nonlinéaires effectifs de guides silicium** : indice Kerr (n_2), coefficient d'absorption à deux photons (β_{TPA}), notamment. La méthode classique de résolution de l'équation nonlinéaire de propagation (**équation de Schrödinger nonlinéaire : NLSE**) est maîtrisée dans notre groupe mais son extension et sa généralisation à des structures à modes lents et à des guides hybrides constituent des points à étendre entièrement.

A la période du stage, un chercheur post-doctorant travaillera dans le groupe au développement d'un banc optique dédié à la mesure des effets optiques nonlinéaires dans la fenêtre télécom et au-delà (Mid-IR). Une participation à ces campagnes de mesure et une calibration des codes de simulation à partir des données expérimentales directement collectées seront donc possibles.

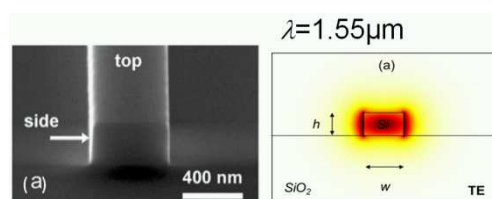


Fig. 1 : Guide optique ruban en silicium

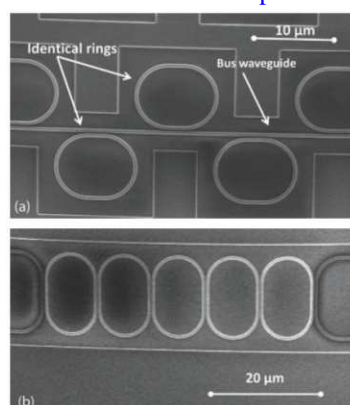


Fig. 2 : Microrésonateurs en anneau et filtres en photonique silicium

$$P_{NL}(t) = \epsilon_0 \chi^{(3)} \cdot E(t)E(t)E(t)$$

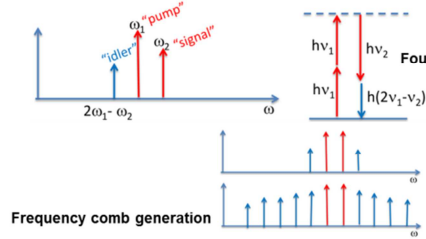


Fig. 3 : Quelques fonctions de la photonique silicium nonlinéaire

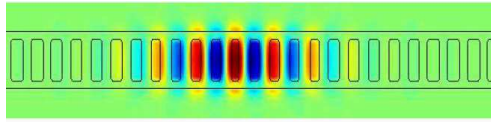


Fig. 4 : Cavité optique de type nanobeam (vue de dessus) ; champ électrique à $\lambda=1.55\mu\text{m}$

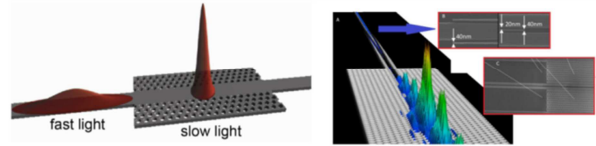


Fig. 5 : Guide silicium à modes lents et à fente (à droite)

L'enjeu de ces travaux est le développement d'outils indispensables à l'extraction des paramètres optiques nonlinéaires indispensables à la qualification de l'intégration de nouveaux matériaux actifs sur silicium et à la définition de fonctions de traitement tout-optique des signaux sur puce.

METHODOLOGIE DU STAGE :

1) Bibliographie (accompagnée) du sujet

- Lecture ciblée des articles principaux => Physique à prendre en compte.
- Recensement des variantes de la méthode numérique split-step Fourier transform de résolution de l'équation de Schrödinger nonlinéaire appliquée à l'étude de la propagation d'impulsions optiques dans les nanoguides optiques silicium en présence de porteurs libres.
- Prise en compte des données antérieures du groupe et définition d'une stratégie de travail

2) Contribution à l'avancement de la méthode :

- Développement accompagné du code (python, Matlab)
- Benchmarking par rapport à des solutions connues et aux résultats expérimentaux du groupe.
- Co-définition, avec le tuteur de stage, de situations physiques intéressantes à explorer.
- Participation à quelques expériences sur banc optique pour relever des données expérimentales à comparer aux résultats de simulation et appréhender ce que ce sont les mesures sur banc optique de guides et structures photoniques.

3) Rédaction du rapport et préparation de la présentation orale

- Mise en point concertée du plan, rédaction de premières versions des parties et rétro-actions avec le tuteur du stage
- Préparation d'un premier jeu de planches et répétitions orales avant de se présenter devant le jury de Master.

BIBLIOGRAPHIE LIEE AU SUJET :

- 1) "Nonlinear silicon photonics", J. Leuthold, C. Koos, and W. Freude, Nature Photonics 4, 535 - 544 (2010)
- 2) "Observation of soliton compression in silicon photonic crystals", A. Blanco-Redondo, C. Husko, D. Eades, Y. Zhang, J. Li, T.F. Krauss & B.J. Eggleton, <http://www.nature.com/articles/ncomms4160>
- 3) "Soliton Propagation with Cross Phase Modulation in Silicon Photonic Crystal Waveguides", Matthew Marko, Xiujuan Li, Jiangjun Zheng, <https://arxiv.org/pdf/1302.0438.pdf>

QUALITES RECHERCHEES CHEZ LE(LA) CANDIDATE :

- Goût pour l'électromagnétisme et l'optique
- Goût pour la simulation numérique (python, Matlab, logiciels électromagnétiques dédiés)
- Capacité à communiquer et à travailler au sein d'un groupe de 15 personnes environ (3 chercheurs / enseignants chercheurs, 1 ingénieur, 5 post-docs, et ~6 doctorants)
- Implication forte dans le travail mené.