

Accélérateurs de particules et sources de lumière à électrons libres sur puce

Centre de Nanosciences et de nanotechnologies
10 Boulevard Thomas Gobert – 91120 PALAISEAU – FRANCE

DIRECTEUR DE THÈSE ET ENCADRANT : Xavier Checoury – xavier.checoury@c2n.upsaclay.fr

Mots clés :

Nanophotonique, accélérateurs, cristaux photoniques, laser, diamant, silicium.

Profil et compétences recherchées :

- Modélisation : connaissances en physique et plus particulièrement en électromagnétisme.
- Simulation : connaissance d'un langage de programmation
- Goût pour l'expérimentation, la mesure et l'instrumentation : une première expérience en caractérisation optique ou en réalisation de micro-composants en salle blanche sera fortement appréciée.
- Maîtrise de l'anglais scientifique

Présentation détaillée du projet doctoral :

Les récents progrès en nanophotonique offrent de nouvelles opportunités pour étudier les interactions entre un faisceau d'électrons et les modes de guides optiques ou de microcavités. Dans ce contexte, on a vu récemment émerger plusieurs concepts d'accélérateurs de particules sur puce [1], où un faisceau laser guidé dans une structure généralement périodique vient céder son énergie à un faisceau d'électrons. Ce type d'accélérateur a de nombreuses applications potentielles : en physique avec la réalisation d'accélérateurs ultra-compacts, en imagerie avancée ou en médecine avec la génération de faisceaux de particules pour les traitements en oncologie, la production d'isotopes. Inversement, en fonction des paramètres utilisés, un faisceau d'électrons évoluant à proximité d'une micro-structure peut céder son énergie pour générer de la lumière (rayonnement Tcherenkov). Un intérêt particulier se développe actuellement pour générer de la lumière, à partir d'une source à électrons libres intégrée sur une puce de taille micrométrique [2]. Cela permettrait d'adresser une plage de longueurs d'onde inaccessible aux lasers à semiconducteurs, tout en ayant un encombrement plus faible de plusieurs ordres de grandeurs que les infrastructures de type laser à électrons libres.

Grâce aux compétences de l'équipe QD [3], au sein de laquelle sera réalisée la thèse, ainsi qu'aux moyens de la salle blanche du C2N, on se propose d'étudier les interactions entre un faisceau d'électrons et des modes optiques confinés pour concevoir, fabriquer et caractériser des composants photoniques capables de manipuler un faisceau d'électrons évoluant à leur proximité immédiate. Le but final est de réussir à intégrer sur une même puce, un canon à électrons et une structure optique capable d'accélérer des électrons ou de générer un rayonnement lumineux monochromatique de l'ultraviolet à l'infrarouge, ce qui sera une première.

Objectif et contexte :

On se propose de concevoir, réaliser et caractériser des composants (nano-)photoniques pour manipuler un faisceau d'électrons évoluant à leur proximité immédiate. Excitées par laser, ces structures photoniques, intégrées sur puces permettront de réaliser des accélérateurs de particules très compacts pour la physique, l'imagerie ou la médecine. Elles permettront aussi de réaliser des lasers à électrons libres Tcherenkov intégrés sur puce, émettant de l'ultraviolet au moyen infrarouge, ce qui serait une première.

Lorsque l'on parle d'accélérateurs de particules, on pense aux très grands instruments de la physique tels le Large Hadron Collider (LHC). Cependant, la physique fondamentale n'est pas le

seul domaine où sont utilisés des faisceaux de particules accélérées. La médecine est aussi une grande utilisatrice de faisceaux d'électrons accélérés pour l'imagerie médicale, notamment pour la génération de rayon X, et aussi pour le traitement de certains cancers ou la stérilisation d'instruments. Il existe aussi un très grand nombre d'applications industrielles des accélérateurs de particules de basse énergie ($\ll 100$ MeV) comme l'implantation ionique ou l'irradiation électronique dans l'industrie des semi-conducteurs, la préparation de radioisotopes, la découpe et la soudure par faisceau d'électrons, la microscopie électronique à balayage pour l'imagerie, l'analyse par faisceaux d'ions, la stérilisation des aliments, générant plus de 400 G€ de revenus dans le monde [4].

Dans le cas de l'accélération d'électrons, les accélérateurs utilisent de très hautes tensions, jusqu'à plusieurs centaines de kilovolts ou des ondes électromagnétiques à des fréquences de quelques GHz se propageant dans des guides d'ondes métalliques. Ces dispositifs, dans lesquels circulent de hautes puissances, sont limités par les pertes par absorption métallique et l'échauffement qui en résulte. Les champs électriques pour l'accélération ne dépassent alors guère les 30 MV/m si bien que ces dispositifs sont volumineux et coûteux en raison des longueurs nécessaires pour obtenir des énergies élevées [1]. Par comparaison, l'utilisation de structures diélectriques et de lasers s'avèrent prometteuses et permettent de créer des champs bien supérieurs à 1 GV/m. Ainsi l'utilisation de lasers pour alimenter des accélérateurs de particules comportant des structures diélectriques, similaires à celles utilisées usuellement dans le domaine de la nanophotonique, est un domaine de recherche qui suscite un intérêt croissant [1,5].

Se limiter à la seule accélération laser de faisceaux d'électrons serait n'aborder que la moitié du problème. En effet, si une onde électromagnétique peut accélérer un faisceau d'électrons, transférant de l'énergie du faisceau lumineux vers les électrons, l'inverse est aussi possible. Ainsi, les sources à électrons libres restent couramment utilisées pour les applications de très haute puissance, comme le sont par exemple les magnétrons dans les fours à micro-ondes de nos cuisines, capables de restituer 1000W à 2,4 GHz. Dans le domaine de l'optique, lorsque l'on ne dispose pas de matériaux capables d'amplifier la longueur d'onde visée, par exemple aux longueurs d'onde des rayons X, les lasers à électrons libres sont quasiment les seules alternatives possibles. À l'opposé de ces infrastructures imposantes, un intérêt particulier se développe actuellement pour générer de la lumière, de l'UV à l'infra-rouge à partir d'une source à électrons libres intégrée sur puce de taille micrométrique [6-7].

L'équipe QD [3], au sein de laquelle se déroulera la thèse, dispose d'une expertise reconnue dans la fabrication en salle blanche, la modélisation et la caractérisation de structures et composants photoniques (CP) pour le traitement du signal, l'optique non linéaire et les lasers. Nous avons notamment obtenu des facteurs de qualité records dans des cavités à cristal photonique en silicium et diamant ainsi que développé de nombreux modèles numériques et semi-analytiques pour différents types de lasers. Cette expertise permettra de réaliser rapidement des échantillons pertinents pour l'accélération et la génération de lumière au début de la thèse.

Méthode :

On va s'intéresser dans un premier temps à l'étude de microstructures permettant d'exalter l'interaction entre un faisceau d'électrons libre et de la lumière afin de permettre l'accélération des électrons ou au contraire la réalisation de sources de lumière. Des structures périodiques dans plusieurs directions de l'espace, appelées cristaux photoniques, sont des candidates intéressantes auxquelles on s'intéressera car elles permettent de confiner très fortement le champ électromagnétique du fait de leur faible volume modal. Elles permettent d'obtenir des champs extrêmement intenses même si elles sont excitées par un faisceau laser de faible puissance. Elles offrent donc un fort potentiel pour l'accélération mais aussi pour la génération de lumière.

Le doctorant recruté simulera les modes électromagnétiques se propageant dans ces structures en utilisant les outils numériques disponibles au laboratoire (Différence finie dans le domaine temporel, onde plane, éléments finis,...) . Les capacités des structures pour l'accélération d'électrons et la génération de lumière seront évaluées par des méthodes semi-analytiques

(théorie des modes couplés) et numériques. On comparera les résultats obtenus avec les sources bibliographiques.

Les structures à cristal photonique préalablement simulées ainsi qu'un canon à électrons directement intégré sur puce seront fabriquées par le doctorant au C2N, dans les matériaux les plus adaptés aux objectifs. Cela pourra être du silicium [8], facile à micro-structurer, de la silice ou du diamant [9,10] capable de tenir des flux lasers intenses, ou encore d'autres matériaux identifiés durant la thèse. Le C2N abrite la plus grande salle blanche académique de France et dispose de tous les équipements technologiques nécessaires à la réalisation des échantillons en silicium, silice ou diamant, comme la lithographie par faisceau électronique, la gravure ionique réactive ICP.

Des caractérisations optiques des structures photoniques réalisées seront effectuées au C2N, comme les courbes de dispersion, les spectres de transmission ou d'émission en présence du faisceau d'électrons. Elles seront comparées aux simulations et modèles pour les affiner si besoin. Des premiers tests d'accélération seront faits avec nos collaborateurs du Laboratoire de Physique du Solide à Orsay (LPS) sur des électrons sub-relativistes issus d'un microscope électronique. En fonction des résultats obtenus, des tests à plus haute énergie, pourront être envisagés.

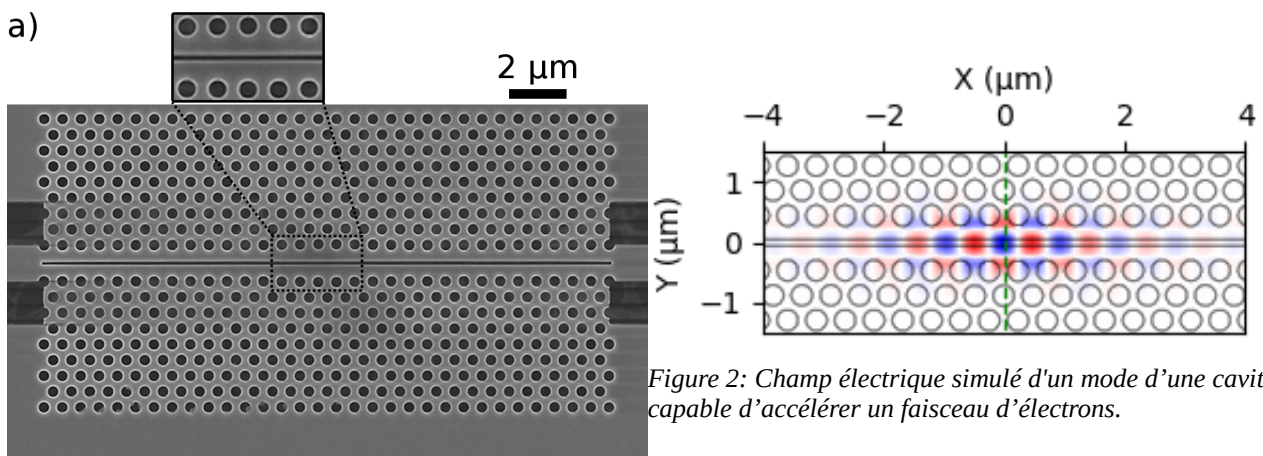


Figure 2: Champ électrique simulé d'un mode d'une cavité capable d'accélérer un faisceau d'électrons.

Figure 1: Vue au microscope électronique à balayage d'un cristal photonique en diamant fabriqué à C2N [10]. La largeur de la fente est de 130 nm. Au centre, les trous sont décalés de quelques nanomètres pour créer une cavité à mode de défaut.

Résultats attendus :

Accélérateurs d'électrons sub-relativistes sur puce
Sources de lumière à électrons libres.
Modèles théoriques associés.

Conditions scientifiques matérielles (conditions de sécurité spécifiques) et financières du projet de recherches :

Le doctorant sera accueilli au Centre de Nanosciences et Nanotechnologies à Palaiseau
Travail en salle blanche.
Un financement via une bourse de l'école doctorale EOBE est envisagé.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant :

- Participations à des colloques internationaux
- Publications dans des revues internationales à comité de lecture.
- Dépôt de brevets.

Collaborations envisagées :

LPS (Orsay) pour la caractérisation de l'accélération de faisceaux électroniques. Des discussions sur l'accélération sont en cours pour de possibles collaborations avec différents laboratoires de Paris-Saclay.

Références bibliographiques

- [1] R. J. England, et al., Rev. of Modern Physics 86, 1337 (2014).
- [2] C. Roques-Carmes, et al., Nature communications 10, 3176 (2019).
- [3] Quantum dot & photonic nanostructures group :
<http://www.qdgroup.universite-paris-saclay.fr/index.html>
- [4] Les accélérateurs en france :
https://indico.lal.in2p3.fr/event/5423/attachments/14400/17762/brochure_accelerateurs_2019_lecture.pdf,
- [5] K. P. Wootton, et al., Reviews of Accelerator Science and Technology 09, 105–126 (2016).
- [6] F. Liu, et al., Nature Photonics 11, 289 (2017).
- [7] Y. Yang, et al., Nature Physics 14, 894 (2018).
- [8] Z. Han, X. Checoury, D. Néel, S. David, M. El Kurdi, and P. Boucaud, Optics Communications 283, 4387 (2010).
- [9] C. Blin, X. Checoury, et al., Advanced Optical Materials, 1: 963-970 (2013)
- [10] C. Blin, et al., Optics Letters 41, 4360 (2016).