

Titre : Contrôle micro-onde et opto-électronique de Qubits du SiC de type V2 implantés en guides et cavités photoniques : fabrication puis étude par ODMR et micro-photoluminescence.

Directeur(s) de Thèse : TRIBOLLET Jérôme, MC-HDR

Unité(s) d'Accueil(s) : Laboratoire ICube – département DESSP - équipe MaCEPV

Établissement de rattachement : Université de Strasbourg

Collaboration(s) (s'il y a lieu) : Collaborations internes au sein du DESSP d'ICube entre, les membres de l'équipe MaCEPV (dont le directeur de thèse, J. Tribollet), l'équipe EM3 (W. Uhring), l'équipe IPP (S. Lecler) et les membres de la plateforme C3Fab (D. Muller).

Rattachement à un programme (s'il y a lieu) : Projet de recherche sur les Technologies Quantiques en SiC en développement à ICube au sein du DESSP depuis 2023, récemment soutenu par un financement IDEX de l'Université de Strasbourg (projet CARSILIQ, 2023-2025, porteur : J. Tribollet). Axe transverse d'ICube en Ingénierie des Matériaux pour l'Energie et l'Environnement (IMEE)

Résumé (1500 caractères au maximum) :

Parmi tous les qubits envisagés, les qubits de spins électroniques codés sur certains centres colorés des semiconducteurs à grand gap, comme le carbure de silicium (SiC), sont particulièrement prometteurs, de très longs temps de cohérence de spin (T_2) ayant été mesurés dans les matériaux massifs. Ces qubits sont des défauts du cristal, généralement créés par implantation ionique. Ils sont non seulement paramagnétiques (spin électronique non nul), mais aussi photoluminescents, répondant donc aux excitations laser et aux excitations micro-ondes. Plus encore, leurs propriétés optiques sont, pour certains comme les centres V2 du 4H SiC, corrélées à leurs propriétés de spin électronique dans l'état fondamental, permettant leur étude par résonance magnétique détectée optiquement (ODMR) par photoluminescence. Cette dernière pouvant être détectée avec la sensibilité du photon unique, un spin unique peut donc maintenant être détecté par ODMR. Pour fabriquer de futurs dispositifs quantiques, processeurs ou capteurs quantiques, utilisant ces qubits V2, leur insertion en guide ou nanocavité optique est requise. Il n'est donc pas garanti que la cohérence quantique des V2 du matériau massif sera maintenue lors du passage en nanostructures photoniques. Cette thèse vise à fabriquer ces nanostructures photoniques en SiC implantées en V2 et à en étudier les propriétés optiques et magnétiques, statiques et dynamiques, notamment par microscopie de photoluminescence et par résonance magnétique pulsée détectée optiquement.

Descriptif du sujet :

L'équipe Matériaux pour Composants Electroniques et Photovoltaïques (MaCEPV) d'ICube développe actuellement une nouvelle thématique de recherche sur les technologies quantiques en carbure de silicium (capteurs quantiques et processeurs quantiques en SiC, sources de photons uniques en SiC). Ce développement s'appuie sur ses compétences et son savoir-faire dans le domaine des semi-conducteurs, sur ses équipements lourds (salle blanche avec gravure sèche et lithographie optique, implantateur, dépôt de films minces, ...), et sur l'arrivée récente de Jérôme Tribollet au sein de l'équipe, expert de la résonance magnétique des spins électroniques et des technologies quantiques à base de ces mêmes qubits de spins, en particulier dans le SiC.

Parmi les qubits de spins du SiC, les centres colorés paramagnétiques du SiC sont très prometteurs, notamment les lacunes de silicium de type V2 (en site cubique) du polytype 4H-SiC qui est le plus répandu. Ce sont des défauts du cristal 4H-SiC, généralement créés par implantation ionique, qui sont non seulement paramagnétiques (spin électronique $S=3/2$ avec une légère anisotropie magnétique), mais aussi photoluminescents (raie d'émission à zero phonons dite ZPL, à 917 nm environ), répondant donc aux excitations laser et aux excitations micro-ondes.

Un dispositif expérimental combinant photoluminescence et résonance magnétique détectée optiquement (ODMR) par photoluminescence existe déjà à MaCEPV, fruit d'une collaboration au sein du département DESSP d'ICube, impliquant non seulement l'équipe MaCEPV mais aussi l'équipe EM3, spécialisée notamment en microélectronique. Ce dispositif d'ODMR permet d'enregistrer des spectres de résonance magnétique et de photoluminescence des centres colorés du SiC à basse température, et de réaliser des expériences de contrôle quantique cohérent des spins électroniques par des impulsions micro-ondes (oscillation de RABI).

Les centres V2 du SiC massif sont connus [1] pour avoir une excellente cohérence quantique de spin ($T_2 > 20$ ms à 17K) et une très bonne cohérence optique (raie ZPL de largeur quasi seulement déterminée par la recombinaison radiative à 5K), ne nécessitant donc pas de cryostat à dilution (mK) pour rester très cohérents, contrairement à d'autres qubits, supraconducteurs, moléculaires, de type boîtes quantiques ou même de type centre colorés dans d'autres semi-conducteurs à grand gap. Ceci n'est pas un détail car l'utilisation d'impulsions optiques et micro-ondes pour le contrôle cohérent des qubits produit inévitablement un échauffement et donc peut poser de sérieux problèmes de cohérence quantique dès lors qu'on travaille avec des qubits dans un cryostat à dilution (mK).

Cette excellente cohérence quantique des V2 à une température raisonnablement accessible (5K-20K), combinée à l'existence de substrats SiC de grande taille et à une technologie du SiC déjà très avancée, grâce notamment à l'électronique de puissance en SiC (automobile, aéronautique, ...), fait du SiC, en particulier du polytype 4H SiC, une des plateformes quantiques les plus prometteuses pour le développement d'un ordinateur quantique à grande échelle, combinant des centaines ou milliers de composants de nanophotonique et de nanoélectronique intégrés sur un même dispositif ou substrat de SiC. Un tel nombre de qubits sur puce serait déjà considérable, mais les centres colorés du SiC comme le V2, offrent en plus une interface spin-photon efficace qui permet d'envisager un réseau quantique à encore plus grande échelle. Dans ce dernier, des « nœuds quantiques » avec des qubits de spins type V2 seraient connectés par des photons émis par les V2, photons voyageant en guide d'onde "on chip" pour les distances de l'ordre du centimètre et en fibre optique pour les grandes distances allant des mètres au dizaines de kilomètres. Ces photons étant corrélés aux états de spin des V2 qui les émettent, ils permettraient de réaliser l'approche dite du « calcul quantique distribué à grande échelle ».

Dans ce contexte, une autre collaboration interne au DESSP, entre l'équipe MaCEPV et l'équipe IPP, spécialisée notamment en nano-optique et en modélisation de systèmes optiques,

est en cours de développement pour la modélisation précise de nanostructures photoniques diverses en SiC.

On notera ici que les expériences de résonance magnétique avancées démontrant ces belles propriétés de cohérence quantique n'ont pas été démontrées à ce jour dans des cavités optiques de 4H SiC, mais seulement dans des monocristaux de 4H SiC. Il est donc absolument nécessaire de vérifier le potentiel de ces qubits V2 dans des micro- et nano-structures de 4H SiC réalistes et associés aux éléments clés d'un ordinateur quantique distribué, à savoir dans des guides et cavités optiques. Il n'est en effet pas garanti que la cohérence quantique exceptionnelle des V2 du massif soit préservée dans de telles nanostructures présentant des interfaces voisines souvent imparfaites par fabrication et intégrées à d'autres matériaux fonctionnels dans le dispositif quantique complet. Dans ce même contexte, le contrôle opto-électronique des V2 doit en plus être démontré dans ce type de nanostructures photoniques, afin de pouvoir mettre la raie ZPL du V2 en résonance avec le mode d'une cavité optique. Ceci, afin de réduire la durée de vie radiative du V2 par effet Purcell et ainsi augmenter l'efficacité de l'interface spin-photon comparativement au taux de décohérence quantique des qubits de spins.

Ces dernières remarques soulignent le fait que la thématique des technologies quantiques avec des centres colorés, comme les V2 du 4H SiC, est maintenant autant une thématique d'ingénierie des matériaux et de leur environnement nanophotonique et microélectronique, qu'une thématique de physique fondamentale. Les matériaux, leurs transformations et leurs caractérisations étant la spécialité de l'équipe MaCEPV, la microélectronique étant la spécialité de l'équipe EM3 et la nanophotonique étant la spécialité de l'équipe IPP, le laboratoire ICube et son département du DESSP est donc idéalement placé pour mener de front, en synergie et efficacement, tous ces défis technologiques et scientifiques visant au développement du calcul quantique distribué sur la plateforme quantique SiC.

Le porteur de ce projet sur les technologies quantiques en SiC à ICube, Jérôme Tribollet, a déjà étudié par résonance paramagnétique pulsée combinée au pompage optique par laser, la cohérence des spins des V2 du 4H SiC massif, natifs [2] ou implantés [3]. Il a également proposé des architectures de nœuds quantiques et de capteurs quantiques combinant le SiC et le YIG ferrimagnétique [4,5]. Nos expériences plus récentes à ICube basée sur la technique ODMR, ont été à ce jour principalement réalisées sur du SiC massif implanté en centres V2 à ICube, grâce à l'implanteur d'ICube. Mais le développement en cours de la micro-photoluminescence combinée à l'ODMR avec comptage de photons, projet ICube soutenu par un financement IDEX de l'Université de Strasbourg (projet CARSILIQ, porteur J. Tribollet) devrait nous permettre dès 2024 de mener le même type d'études ODMR et optiques que précédemment mais dans des nanostructures de SiC type guides ou cavités optiques implantés en qubits de type V2, grâce à une résolution spatiale micrométrique et grâce à une sensibilité accrue en détection de la photoluminescence des V2 utilisée en ODMR. Le développement de l'ingénierie du matériau SiC est également en cours à ICube, soutenue financièrement par le laboratoire ICube, par sa plateforme C3Fab, et également par l'Université de Strasbourg dans le cadre du même projet IDEX (CARSILIQ). Dans ce cadre, nous utilisons des méthodes connues de modification/structuration du SiC telles que la gravure sèche avec masque, des méthodes de recuits thermiques, d'implantations ioniques et autres, et nous en développons d'autres également.

Ce projet de thèse visera donc à la fois à développer davantage la technologie du matériau SiC à ICube, mais aussi à utiliser nos capacités expérimentales actuelles et celles en développement, pour mesurer les propriétés optiques et magnétiques des qubits de spins électroniques des centres colorés créés par implantation dans des micro-nano structures en SiC, de type guide d'onde optique et cavité optique en SiC.

Même si le projet est principalement présenté ici dans le contexte du développement du calcul quantique distribué sur la plateforme SiC, il est clair que les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse pourront également permettre d'envisager d'autres applications à plus court terme,

telles que des capteurs quantiques en SiC ou des sources de photons uniques à 917 nm, par exemple pour la cryptographie quantique ou le calcul quantique tout photon.

Le/la candidat/e à cette thèse contribuera fortement à la fabrication en salle blanche (gravure et lithographie) et à l'étude expérimentale à l'aide de divers dispositifs et diverses techniques expérimentales (Photo-Luminescence, ODMR, SEM, AFM, Profilométrie, ...), des micro- et nano- structures photoniques en SiC implantées en qubits de spins. De bonnes connaissances en mécanique quantique et en physique statistique sont nécessaires pour une bonne compréhension du sujet et de certaines expériences de résonance magnétique et/ou d'optique, mais un gout et des compétences pour l'expérimentation sont les principales qualités recherchées chez le/la candidat/e à la thèse proposée, ainsi que de bonnes capacités de travail en équipe et de communication, car ce projet en développement à ICube est fortement pluridisciplinaire et multi-équipe.

Le/la candidat/e sélectionné/e bénéficiera de l'encadrement de son directeur de thèse (J. Tribollet, HDR), mais aussi du soutien d'autres membres du département DESSP d'ICube impliqués dans le projet sur les technologies quantiques en SiC, notamment de collègues spécialisés en ingénierie des matériaux (MaCEPV), en microélectronique (EM3), et en nano-optique (IPP).

Cette thèse sur les technologies quantiques en SiC à ICube sera financée par une bourse doctorale fléchée sur l'équipe MaCEPV.

Durée de la thèse en années¹: 3

Directeur de thèse: Jérôme Tribollet
Mél : tribollet@unistra.fr

Laboratoire d'accueil : ICube – équipe MaCEPV (campus Cronenbourg)

Adresse : ICube UMR 7357

Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie

Département D-ESSP - Equipe MaCÉPV – bat 28

23, rue du Loess - BP 20 CR - 67037 STRASBOURG

(<https://macepv.icube.unistra.fr/index.php/Accueil>)

Candidature: veuillez envoyer un CV détaillé, une lettre de motivation, les relevés de notes de M2 et le classement final de M2, ainsi que deux lettres de recommandation, à Jérôme Tribollet (tribollet@unistra.fr).

Bibliographie liée au projet:

[1] D. M. Lukin, et al., *Physical Review X* 1, 020102 (2020)

<https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.1.020102>

[2] J. Tribollet, *Hybrid nanophotonic-nanomagnonic SiC-YiG quantum sensor: II/dark spins quantum sensing with V2 spins and fiber based OP-PELDOR/ODMR*, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 90, 20103 (2020) <https://doi.org/10.1051/epjap/2020200063>

¹ Début de la thèse attendu pour septembre 2024. A discuter.

[3] J. Tribollet, D. Muller, S. Roques, J. Bartringer and T. Fix, Shallow implanted SiC spin qubits used for sensing an internal spin bath and external YIG spins, Nanoscale 13, 13827 (2021)
<https://doi.org/10.1039/D1NR02877D>

[4] J. Tribollet, Hybrid nanophotonic-nanomagnonic SiC-YiG quantum sensor: I/theoretical design and properties, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 90, 20102 (2020)
<https://doi.org/10.1051/epjap/2020200062>

[5] J. Tribollet, Hybrid paramagnetic-ferromagnetic quantum computer design based on electron spin arrays and a ferromagnetic nanostripe, Eur. Phys. J. B 87, 183 (2014)
<https://doi.org/10.1140/epjb/e2014-50147-8>