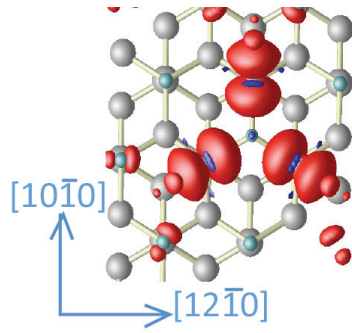


## Traitement quantique de l'information : jamais sans défaut !

**Le traitement quantique de l'information repose sur des propriétés quantiques de la matière, telles que la superposition et l'intrication d'états quantiques. Il a été montré récemment que certains défauts ponctuels dans les solides peuvent constituer des systèmes élémentaires adaptés. Dans ce cadre, à l'INSP, l'équipe « Couches nanométriques : formation, interfaces, défauts » est parvenue à identifier un défaut très prometteur du carbure de silicium (SiC), matériau déjà maîtrisé par l'industrie microélectronique et mature pour les applications envisagées. Il s'agit d'un défaut nommé « centre NV », composé d'une lacune de silicium associée à un atome d'azote, l'azote étant un dopant du SiC, l'azote étant un dopant du SiC. L'équipe a pu déterminer par résonance magnétique électronique sous excitation optique, ses propriétés magnéto optiques et les résultats expérimentaux ont été confrontés à des calculs théoriques réalisés en collaboration avec l'université de Paderborn (Allemagne) afin d'établir la structure, à l'échelle atomique, de ce défaut.**

Les défauts ponctuels dans la matière forment des objets quantiques isolés qui possèdent un moment magnétique intrinsèque (spin) non nul en raison de la réorganisation du cortège électronique dans leur environnement. Le contrôle et la manipulation à température ambiante par voie optique du spin de tels défauts a déjà abouti dans un cas particulier : le défaut du diamant appelé centre NV. Ce défaut est formé d'une lacune de carbone associée à un atome d'azote. L'azote est une impureté fréquente dans le diamant et peut y être également introduit par implantation. Ce défaut de spin  $S=1$  constitue en quelque sorte un atome artificiel isolé, protégé et stable au sein de la matrice cristalline du diamant. Son spin électronique peut être manipulé au moyen d'impulsions micro-ondes et lu optiquement. Ce défaut présente une luminescence parfaitement stable à température ambiante et constitue donc une source pratique de photon unique pour les applications de cryptographie quantique par exemple.

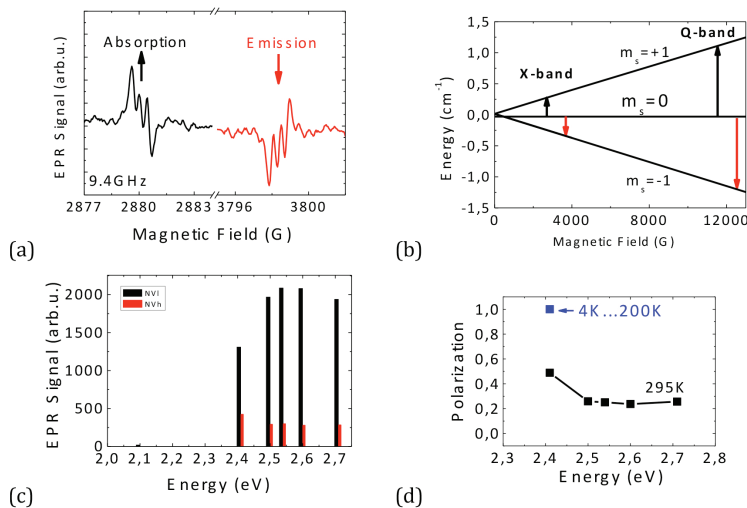
À l'INSP, nous sommes parvenus à identifier un défaut équivalent dans le carbure de silicium (SiC), un matériau cousin du diamant qui présente par rapport à ce dernier des avantages décisifs, à la fois fondamentaux et technologiques. D'une part, le SiC existe sous plusieurs structures cristallines, ce qui devrait permettre d'identifier d'autres défauts intéressants pour le traitement quantique de l'information et l'électronique de spin et, d'autre part, l'industrie microélectronique s'est déjà emparée de ce matériau qu'elle maîtrise pour des applications en électronique de puissance et hyperfréquence. Nous avons pu identifier et déterminer les propriétés magnéto optiques du centre NV dans le SiC par des études de résonance magnétique électronique sous excitation optique. Nos résultats expérimentaux ont été confrontés à des calculs théoriques réalisés en collaboration avec l'université de Paderborn (Allemagne) afin d'établir, à l'échelle atomique, la structure de ce défaut. La Figure 1 présente une modélisation de la densité de spin autour du centre, qui permet de rendre compte des résultats expérimentaux.



**Figure 1**

En rouge : représentation de la densité de spin électronique (électron paramagnétique) autour du centre NV dans le 4H-SiC (vue selon l'axe c ([0001]) du cristal).

Nous avons établi que ce centre possède un état de spin  $S=1$  polarisable optiquement. La Figure 2a montre les signaux RPE (bande X) de ce centre observés à 4K, sous excitation optique à 2,4eV. En accord avec le schéma de la Figure 2b, ces signaux correspondent à deux transitions résonantes entre les sous-niveaux Zeeman  $m_s=0$  et  $m_s=\pm 1$ . Ils sont observés en absorption (en noir) ou émission (en rouge) en raison de la polarisation préférentielle du sous-niveau fondamental  $m_s=0$ , induite par la lumière. Ceci permet d'envisager un contrôle de l'état de polarisation de spin du défaut, facilitant la manipulation de son spin pour les applications en calcul quantique. Le taux de polarisation en fonction de l'énergie de l'excitation optique peut être estimé par le rapport d'intensité de ces deux transitions. La Figure 2c montre ces intensités à température ambiante sous différentes énergies d'excitation montrant une énergie seuil de l'ordre de 2,3eV (en noir la transition en absorption, en rouge celle en émission). La Figure 2d montre qu'en dessous de 200K seul le niveau  $m_s=0$  est peuplé, permettant une polarisation totale du spin, tandis qu'à température ambiante, il existe une occupation partielle du niveau  $m_s=+1$ .



**Figure 2**

(a): Spectre RPE obtenu à 4K en bande X sous excitation laser à 2.4eV. (b) : diagramme d'énergie représentant les sous niveaux Zeeman du défaut NV ( $S=1$ ) en fonction du champ magnétique appliqué. (c): Intensité des transitions en absorption (en noir) ou émission (en rouge) observées en bande X à température ambiante en fonction de l'énergie d'excitation. (d) : estimation de la polarisation en spin du défaut à température ambiante et en dessous de 200K.

Des études avancées des propriétés optiques de ce défaut sont actuellement en cours à l'INSP et ces recherches sont étendues pour valider la pertinence d'autres défauts du SiC à des fins d'applications en traitement quantique de l'information.

## Référence

"Identification and magneto-optical properties of the NV center in 4H-SiC "

H. J. von Bardeleben, J. L. Cantin, E. Rauls, U. Gerstmann

PHYSICAL REVIEW B, 92, 064104 (2015)

## Contacts

Jean-Louis Cantin : cantin@insp.jussieu.fr, Jurgen von Bardeleben : vonbarde@insp.jussieu.fr