



Rayonnement micro-ondes hautement localisé vers des qubits à l'aide d'une micro-antenne boucle

Sangjun Noh, Minghao Jiang, Javier Noé Ramos-Silva, Philip Hemmer, Kamel Haddadi, Peter Burke

► To cite this version:

Sangjun Noh, Minghao Jiang, Javier Noé Ramos-Silva, Philip Hemmer, Kamel Haddadi, et al.. Rayonnement micro-ondes hautement localisé vers des qubits à l'aide d'une micro-antenne boucle. 24èmes Journées Nationales Microondes (JNM 2026), Institut d'Électronique de Microélectronique et Nanotechnologie (IEMN) de Villeneuve d'Ascq et l'Université Catholique de Louvain (UCL) en Belgique, May 2026, Lille, France. ⟨hal-05677209⟩

HAL Id: hal-05677209

<https://hal.science/hal-05677209v1>

Submitted on 2 Jul 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Rayonnement micro-ondes hautement localisé vers des qubits à l'aide d'une micro-antenne boucle

Sangjun Noh¹, Minghao Jiang², Javier Noé Ramos-Silva¹, Philip Hemmer³, Kamel Haddadi⁴, Peter Burke¹

¹Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California Irvine, Irvine, USA

²Department of Physics and Astronomy, University of California Irvine, Irvine, USA

³Department of Electrical and Computer Engineering Texas A&M University College Station, USA

⁴Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520 - IEMN - Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie - Lille, France
{ kamel.haddadi@univ-lille.fr ; pburke@uci.edu }

Résumé – Nous démontrons un rayonnement micro-ondes hautement localisé vers des qubits à l'aide d'une micro-antenne boucle, permettant une excitation contrôlée et spatialement résolue. L'état quantique des qubits, constitués d'ensembles de centres NV (Nitrogen-Vacancy) dans le diamant, est mesuré par résonance magnétique détectée optiquement (ODMR). Une antenne à boucle sur circuit imprimé de $600 \times 600 \mu\text{m}^2$, positionnée avec une précision micrométrique à l'aide d'un micromanipulateur piézoélectrique, est utilisée pour générer un champ micro-ondes localisé. Des balayages unidimensionnels et bidimensionnels permettent de cartographier la distribution du champ proche micro-ondes. Ces résultats établissent une plateforme expérimentale robuste pour la cartographie ODMR résolue spatialement, la caractérisation de champs micro-ondes et ouvrent la voie à la manipulation locale et programmable d'états quantiques pour des applications en détection quantique.

1. Introduction

La détection quantique basée sur des spins à l'état solide offre une approche puissante pour la mesure précise de champs électromagnétiques, de décalages de fréquence et de variations thermiques dans des conditions ambiantes [1]. Parmi les plateformes disponibles, les centres NV (Nitrogen-Vacancy) dans le diamant se distinguent par leur initialisation et leur lecture optiques, leur longue cohérence de spin et leur fonctionnement stable à température ambiante [2]. Lorsqu'ils sont excités par un laser vert, les centres NV se polarisent dans l'état fondamental $m_s = 0$, associé à une forte fluorescence, tandis qu'un champ micro-ondes résonnant induit des transitions vers les états $m_s = \pm 1$, entraînant une diminution mesurable de la fluorescence. Ce mécanisme constitue la base de la résonance magnétique détectée optiquement (ODMR).

Les mesures ODMR spatialement résolues nécessitent une instrumentation capable de coordonner la détection optique de la fluorescence avec un rayonnement micro-ondes dépendant de la position. Les techniques de fluorescence à super-résolution peuvent améliorer le rapport signal-sur-bruit et la résolution optique de l'émission des centres NV [3], et des travaux antérieurs ont démontré la faisabilité de l'ODMR à l'aide de microscopes confocaux ou à super-résolution du commerce [4]. Toutefois, ces approches ne permettent ni

de balayer une source micro-ondes au-dessus de l'échantillon ni de cartographier le contraste ODMR en fonction de la position de l'antenne.

Dans ce travail, nous présentons une plateforme ODMR à balayage intégrant un système optique en espace libre développé sur mesure, une micro-antenne boucle sur circuit imprimé et un micromanipulateur piézoélectrique de haute précision. Le déplacement contrôlé de l'antenne au-dessus de la surface du diamant permet de visualiser directement le champ proche micro-ondes via les variations de fluorescence et de contraste ODMR. Contrairement aux approches ODMR statiques ou en imagerie grand champ, cette méthode permet des mesures de champ micro-ondes spatialement résolues.

2. Banc de test expérimental

La configuration de mesure est présentée à la Figure 1. Une antenne micro-ondes à boucle de $600 \times 600 \mu\text{m}^2$ est positionnée à environ $150 \mu\text{m}$ au-dessus d'une particule de diamant contenant des centres NV, puis déplacée selon les directions x–y–z afin de mesurer la fluorescence et le contraste ODMR en fonction de la position.

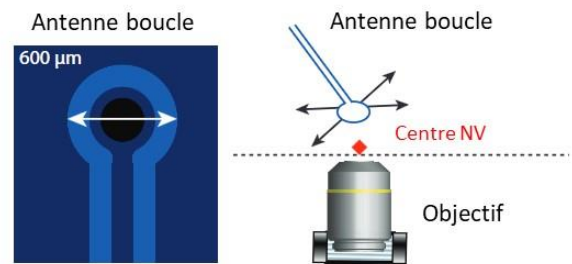


Figure 1. Schéma conceptuel. Une antenne micro-ondes boucle de $600 \times 600 \mu\text{m}^2$ est balayée au-dessus d'une particule de diamant contenant des centres NV afin de mesurer les variations spatiales de la fluorescence et du contraste ODMR.

La Figure 2 présente le banc expérimental. La plateforme se compose d'un trajet optique en espace libre, de l'antenne boucle, d'une carte RFSoc XilinxTM 4x2, d'un amplificateur micro-ondes haute puissance (Mini-CircuitsTM ZHL-16W-43-S+), d'un atténuateur variable (NardaTM Microline 4704-99), d'un coupleur directionnel (MAC Technology Inc.TM, 20 dB), d'un analyseur de spectre (RIGOLTM DSA832E) et d'un micromanipulateur tri-axes (SensapexTM µMp-3). La carte RFSoc génère les

signaux micro-ondes et numérise les données de fluorescence, l'ensemble des composants étant synchronisé via un programme de contrôle Python exécuté sur un ordinateur.

La géométrie de l'antenne oriente la boucle perpendiculairement à la face avant du circuit imprimé, ce qui permet un positionnement vertical par rapport aux particules de diamant contenant des centres NV déposées sur une lame de microscope. Cette configuration verticale réduit les couplages parasites avec le plan de masse ou d'autres conducteurs, améliorant ainsi la stabilité lors des mesures en champ proche. L'antenne est montée sur la platine Sensapex™ et positionnée à environ 150 μm au-dessus de l'échantillon de diamant, permettant un balayage tridimensionnel précis pendant l'acquisition ODMR.

L'échantillon de diamant NV est préparé par dépôt de micro-diamants d'un diamètre moyen d'environ 15 μm sur une lame de verre. Chaque particule présentant une orientation cristallographique distincte, les fréquences de résonance ODMR peuvent varier légèrement dans des conditions expérimentales identiques. La fréquence de résonance de la particule sélectionnée est donc mesurée avant le balayage.

Les mesures ODMR sont réalisées par détection de la fluorescence des centres NV à l'aide d'un détecteur de photons uniques (SPD). La carte RFSoc Xilinx™ 4×2 balaie la fréquence micro-ondes de 2,7 à 3,0 GHz avec une puissance de +35 dBm, par pas de 1 MHz, tout en enregistrant les comptes niveaux de fluorescence. Les spectres obtenus sont ajustés par des fonctions lorentziennes afin de déterminer la fréquence de résonance et la puissance micro-ondes optimale. Pour les mesures ODMR en balayage, la fréquence micro-ondes est fixée à la résonance déterminée (2874 MHz) et l'antenne à boucle est déplacée au-dessus de l'échantillon pendant l'enregistrement des signaux de fluorescence temporels. L'ensemble des données est traité et visualisé à l'aide du logiciel Igor Pro 9.

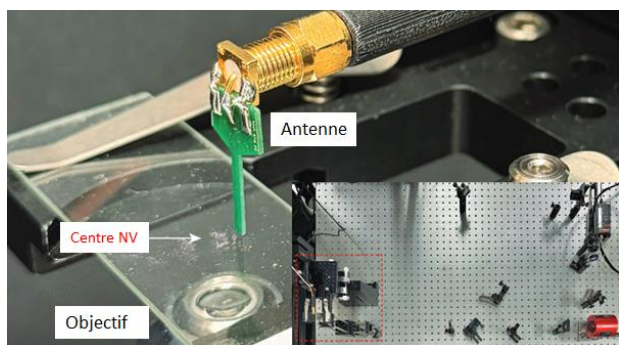


Figure 2. Vue agrandie de l'antenne montée verticalement au-dessus du diamant contenant des centres NV. L'encart montre l'ensemble du banc optique, la zone en pointillés indiquant la région antenne-échantillon.

3. Résultats expérimentaux

La Figure 3 résume la caractérisation ODMR initiale d'un micro-diamant NV unique. Comme illustré en Figure

3(a), l'imagerie de photoluminescence (PL) a d'abord été utilisée pour localiser et sélectionner une particule individuelle à mesurer. L'ODMR a ensuite été mesurée en configuration à onde continue (CW) en surveillant la fluorescence des centres NV, chaque point de fréquence étant moyenné 500 fois afin de réduire le bruit.

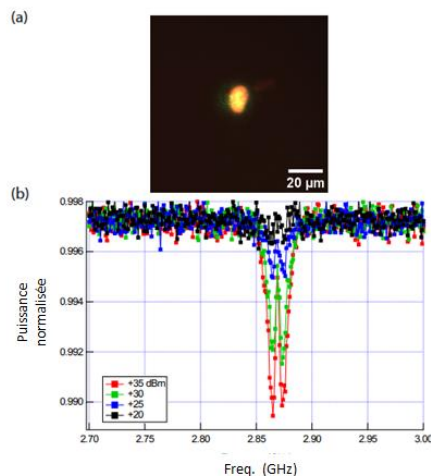


Figure 3. (a) Image de photoluminescence (PL) du diamant contenant des centres NV. (b) Spectres ODMR mesurés pour différentes puissances micro-ondes.

La fréquence micro-ondes a été balayée de 2,7 à 3,0 GHz par pas de 1 MHz, et la Figure 3(b) compare les spectres obtenus pour quatre niveaux de puissance micro-ondes. Une résonance nette apparaît autour de 2874 MHz dans tous les cas. À +35 dBm, le contraste atteint environ 1 % et la largeur à mi-hauteur (FWHM) est mesurée à $2,1 \times 10^7$ Hz, correspondant à un rapport contraste-largeur de raie de $4,76 \times 10^{-10}$ Hz⁻¹. En raison des différences d'orientation cristallographique pouvant décaler la fréquence de résonance d'une particule à l'autre, cette résonance spécifique à la particule (2874 MHz à +35 dBm) a été utilisée pour les mesures de balayage ultérieures.

La Figure 4 présente les résultats ODMR en balayage unidimensionnel obtenus en déplaçant l'antenne à boucle au-dessus de la particule NV sélectionnée. Le profil d'intensité de photoluminescence (PL, courbe bleue) et le profil de contraste ODMR (courbe rouge) présentent tous deux un creux marqué à la position de la particule, démontrant une correspondance spatiale précise entre l'imagerie optique et les variations de résonance induites par les micro-ondes. Le profil PL présente une largeur à mi-hauteur (FWHM) d'environ 16 μm , comparable à la taille physique du micro-diamant, tandis que la réponse ODMR s'étend sur environ 970 μm . Cette réponse spatiale étendue résulte de la distribution du champ proche générée par l'antenne à boucle de $600 \times 600 \mu\text{m}^2$ positionnée à 150 μm au-dessus de l'échantillon.

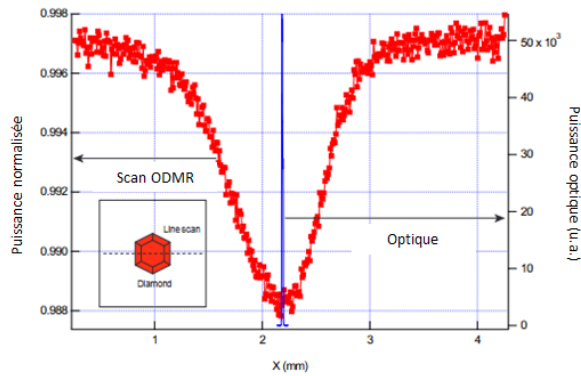


Figure 4. Profils linéaires de l'intensité de fluorescence (bleu) et du contraste ODMR en balayage (rouge) à travers une particule de diamant contenant des centres NV.

La Figure 5 présente la cartographie ODMR bidimensionnelle obtenue en balayage. L'antenne a été déplacée sur une zone de 4×4 mm² dans le plan X-Y avec un pas de 100 μ m, et la fluorescence des centres NV a été enregistrée à chaque position. Une forte diminution de la photoluminescence est observée près du centre de la zone balayée, là où le champ proche micro-ondes est le plus intense, tandis que la fluorescence augmente progressivement vers les régions périphériques. Cette cartographie permet de visualiser l'empreinte spatiale du champ proche micro-ondes généré par l'antenne à boucle via et est cohérente avec le profil étendu observé lors des mesures en balayage linéaire.

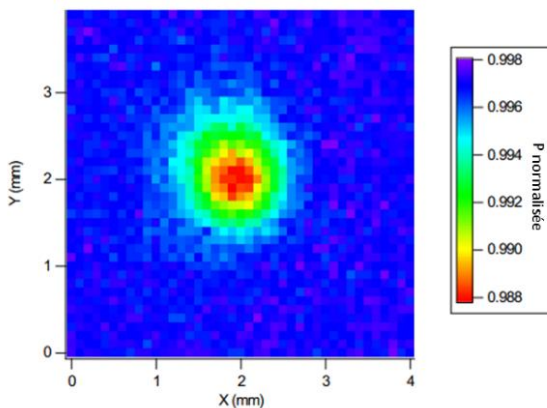


Figure 5. Cartographie ODMR bidimensionnelle.

4. Conclusion

Nous avons développé une plateforme ODMR en balayage intégrant un système optique développé sur mesure et une antenne boucle sur circuit imprimé, permettant la cartographie spatiale du contraste ODMR autour de particules de diamant contenant des centres NV. La spectroscopie ODMR a permis d'identifier la fréquence de résonance et la puissance micro-ondes optimales, puis des balayages linéaires et surfaciques ont été réalisés afin de visualiser le champ proche micro-ondes en une et deux dimensions.

La coïncidence des minima de fluorescence et de contraste ODMR confirme une localisation précise des centres NV. La largeur spatiale beaucoup plus étendue de la réponse ODMR (~ 970 μ m) par rapport à la largeur optique à mi-hauteur (16 μ m) indique que la résolution spatiale est principalement limitée par la taille de l'antenne à boucle et la distribution de son champ. Des antennes micro-fabriquées de plus petite taille devraient permettre des champs micro-ondes plus confinés et une résolution améliorée.

Dans l'ensemble, cette plateforme constitue une méthode compacte et pratique pour la cartographie de champs micro-ondes basée sur les centres NV et fournit une base solide pour des applications futures en détection quantique à haute résolution. Nous envisageons que les prochaines générations de ce dispositif permettront le rayonnement localisé de séquences d'impulsions micro-ondes vers des qubits individuels, ouvrant la voie à la manipulation d'états quantiques et à un adressage programmable et évolutif des qubits pour les applications en sciences et technologies de l'information quantique.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Air Force Office of Scientific Research (AFOSR) dans le cadre des contrats FA9550-23-1-0061 et FA9550-23-1-0436, ainsi qu'en partie par la National Science Foundation (NSF) sous le contrat n° 2153425, et par la Noyce Foundation. Les opinions, résultats et conclusions ou recommandations exprimés dans ce document sont ceux des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les points de vue de l'United States Air Force. Le projet a bénéficié du soutien du contrat Plan État-Région IMITECH (CPER 2021–2027).

Références

- [1] G. Balasubramanian *et al*, "Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions," *Nature* 2008 455:7213, vol. 455, pp. 648–651, 10 2008
- [2] J. M. Taylor, *et al* "High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution," *Nature Physics*, vol. 4, pp. 810–816, 9 2008.
- [3] J. Huff, "The airyscan detector from zeiss: confocal imaging with improved signal-to-noise ratio and super-resolution," *Nature Methods*, vol. 12, p. ii, 12 2015.
- [4] S. Noh, M. Jiang, J. J. Leon, P. J. Hemmer, and P. J. Burke, "Quantum sensing with an off-the-shelf super resolution microscope." *SPIE-Intl Soc Optical Eng*, 3 2025, p. 33.