



Microscopie champ-proche micro-ondes basée sur une sonde nano-coaxiale pour applications quantiques

Sangjun Noh, Clément Lenoir, Mohamed Sebbache, Philip Hemmer, Hung-Ju Lin, Johannes Hoffmann, Kamel Haddadi, Peter Burke

► To cite this version:

Sangjun Noh, Clément Lenoir, Mohamed Sebbache, Philip Hemmer, Hung-Ju Lin, et al.. Microscopie champ-proche micro-ondes basée sur une sonde nano-coaxiale pour applications quantiques. XXIVèmes 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-05677256⟩

HAL Id: hal-05677256

<https://hal.science/hal-05677256v1>

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

Microscopie champ-proche micro-ondes basée sur une sonde nano-coaxiale pour applications quantiques

Sangjun Noh¹, Clément Lenoir², Mohamed Sebbache², Philip Hemmer³, Hung-Ju Lin⁴,
Johannes Hoffmann⁴, Kamel Haddadi², Peter Burke^{1,5}

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

²Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520 - IEMN - Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie - Lille, France

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

⁴High Frequency Laboratory Federal Institute of Metrology METAS Bern-Wabern, Switzerland

⁵Department of Biomedical Engineering, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Department of Materials Science and Engineering, University of California Irvine, Irvine, USA
{ kamel.haddadi@univ-lille.fr ; pburke@uci.edu }

Résumé – Nous présentons une plateforme de mesure hybride intégrant un microscope à fluorescence à super-résolution avec un microscope micro-ondes à balayage basée sur une sonde nano-coaxiale ouverte. Ce système est appliqué sur des particules de diamant, qui émettent simultanément une fluorescence intense provenant de centres NV (Nitrogen vacancy). La structure de l'apex nano-coaxial se compose d'un diélectrique en silice (diamètre extérieur : 5 μm), d'un conducteur interne en platine ($\sim 1,2 \mu\text{m}$ de diamètre), recouvert d'un bicouche Cr/Au (10 nm/200 nm). Cette preuve de concept démontre l'imagerie micro-onde et optique simultanée d'une nouvelle classe de matériaux quantiques et pourrait, à terme, trouver des applications dans la manipulation d'états quantiques de qubits grâce au confinement nanométrique d'impulsions micro-ondes.

1. Introduction

L'émergence de la science de l'information quantique [1] a suscité une demande croissante pour de nouvelles classes de matériaux et de technologies capables de contrôler des qubits dans des matériaux à l'état solide et à température ambiante. De manière générale, ceux-ci reposent sur les degrés de liberté de charge et de spin, par exemple les centres NV (Nitrogen vacancy) dans le diamant [2]. La caractérisation de ces matériaux est essentielle en vue de leur utilisation finale dans des systèmes de traitement de l'information quantique. Cela nécessite une « métrologie pour la seconde révolution quantique » [3]. Par conséquent, des techniques avancées sont requises afin de permettre une caractérisation précise des matériaux quantiques émergents.

La microscopie champ-proche micro-ondes à balayage (Near-field Scanning Microwave Microscopy, NSMM) a récemment été développée, optimisée et démontrée pour un large éventail d'applications de caractérisation, incluant la science des matériaux, la caractérisation de dispositifs semi-conducteurs, et même des systèmes biologiques vivants [4], [5]. Afin d'améliorer le confinement spatial des champs, nous avons récemment étendu les travaux coaxiaux initiaux de l'Université du Maryland [6], [7] des années 1990, en les adaptant aux systèmes biologiques à température

ambiante [8], et en faisant évoluer la géométrie de la pointe de l'échelle millimétrique vers les échelles micro- et nanométriques [9]. Ces innovations technologiques, combinées à un accès optique simultané à super-résolution aux bits quantiques dans des systèmes à l'état solide [10], constituent des éléments idéaux pour fournir, à terme, des signaux radiofréquence (RF) localement adressables à des qubits individuels.

Dans ce travail, nous franchissons une étape dans cette direction. Nous utilisons une structure nano-coaxiale comme pointe de sonde NSMM afin de caractériser des particules de diamant de 15 μm contenant des centres NV accessibles optiquement. Le NSMM est intégré à un microscope à super-résolution au sein duquel nous avons précédemment démontré la manipulation d'états quantiques de ces particules [10]. Ce système intégré permet de réaliser à la fois des mesures NSMM et la manipulation d'états quantiques au sein d'une plateforme unique, fournissant une démonstration de preuve de concept de la caractérisation micro-ondes de matériaux quantiques.

2. Banc de test expérimental

Le dispositif expérimental intègre un NSMM basée sur une structure nano-coaxiale avec un microscope à fluorescence à super-résolution. La configuration complète du système est présentée en figure 1. Une sonde nano-coaxiale miniaturisée à extrémité ouverte est connectée à un analyseur de réseau vectoriel (VNA) USB à un port (Anritsu™ MS46121B) afin de mesurer le coefficient de réflexion micro-onde complexe S_{11} .

La sonde nano-coaxiale est réalisée à l'aide d'une technique modifiée d'étirage de nano-pipettes. Un capillaire en silice fondue (diamètre extérieur : 1,2 mm ; diamètre intérieur : 0,4 mm) constitue la base structurale. Un fil de platine (Pt) de 0,15 mm de diamètre est inséré avant l'étirage afin de former le conducteur interne. La pointe obtenue présente des dimensions micrométriques à l'apex, avec des diamètres typiques de 5 μm pour le conducteur externe et d'environ 1,2 μm pour le conducteur interne. La surface externe est ensuite revêtue par pulvérisation cathodique d'un bicouche Cr/Au (10 nm / 200 nm), constituant le

conducteur externe de la ligne de transmission coaxiale. Cette configuration aboutit à une géométrie coaxiale blindée. Le procédé de fabrication détaillé est décrit dans la référence [9].

La sonde est montée sur une platine de nano-positionnement piézoélectrique (SmarAct™ série SLC-17), offrant une course de 1,2 cm et une résolution de déplacement en boucle fermée de 1 nm selon les axes X, Y et Z. La platine et le VNA sont synchronisés et pilotés automatiquement à l'aide d'un logiciel de commande dédié basé sur LabVIEW™.

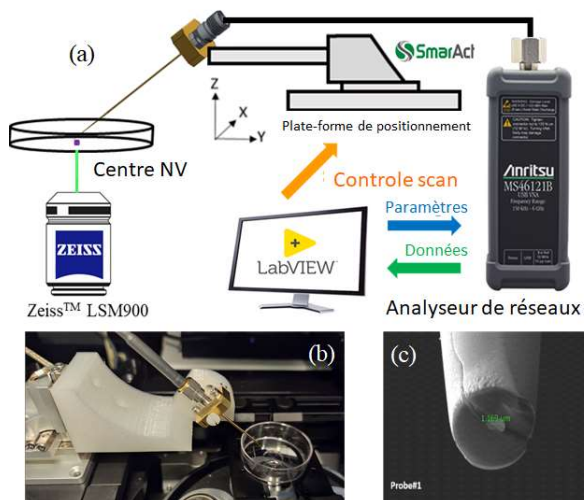


Figure 1. (a) Schéma du système intégré combinant la fluorescence et la microscopie micro-ondes. (b) Photographie de la sonde nano-coaxiale intégrée à un microscope confocal. (c) Image en microscopie électronique à balayage (MEB) de l'apex de la sonde.

La sonde est utilisée en mode sans contact à une hauteur fixe au-dessus de l'échantillon, et est balayée selon des modes unidimensionnel (balayage linéaire) ou bidimensionnel (balayage surfacique). À chaque position spatiale, le coefficient de réflexion S_{11} est mesuré. La sonde est connectée au VNA au moyen d'un câble coaxial flexible (MegaPhase™ Ultraphase, 1,85 mm, longueur 12 pouces). Le VNA fonctionne sur une plage de fréquences comprise entre 150 kHz et 6 GHz. La puissance radiofréquence (RF) incidente est fixée à 3 dBm pour les fréquences inférieures ou égales à 4 GHz, et à -5 dBm dans la plage 4–6 GHz.

Avant les mesures, la sonde est caractérisée à l'entrée de son connecteur (figure 2). La réponse attendue est de 0 dB et indépendante de la fréquence. Expérimentalement, une perte d'insertion d'environ 5 dB est observée, principalement attribuée aux pertes résistives de la sonde. La réponse demeure approximativement constante jusqu'à 3 GHz. En conséquence, l'ensemble des mesures présentées est réalisé à une fréquence continue (CW) de 2 GHz.

Le balayage couvre une surface de $40 \times 40 \mu\text{m}$ avec un pas de $2 \mu\text{m}$, correspondant à 400 points de mesure (20×20). À chaque position, deux mesures sont effectuées en mode CW et la valeur finale est calculée comme la moyenne des deux acquisitions. Avec une largeur de bande de fréquence intermédiaire (IFBW) de

10 Hz, correspondant à un temps d'acquisition de 100 ms par point, le temps total par pixel est d'environ 200 ms, ce qui conduit à un temps total de balayage de 80 s par image.

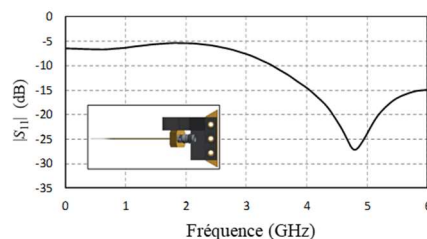


Figure 2. Amplitude mesurée du coefficient de réflexion S_{11} à l'entrée du connecteur coaxial.

Pour les mesures optiques, la fluorescence est enregistrée à l'aide d'un microscope confocal à super-résolution (Zeiss™ LSM900 équipé d'un détecteur Airyscan 2). L'excitation est réalisée à 561 nm, et la fluorescence est détectée dans la bande spectrale 600–700 nm.

3. Résultats expérimentaux

L'échantillon étudié est une particule de diamant de $15 \mu\text{m}$ contenant des centres NV (Adamas Nanotechnologies™, MDNV15umHi30mg), avec une concentration en NV d'environ 3,5 ppm. Le diamant est monté sur une lamelle de verre afin d'assurer la compatibilité avec le microscope confocal. Les centres NV constituent des fluorophores très lumineux, et la manipulation d'états quantiques par résonance magnétique détectée optiquement (ODMR) a déjà été démontrée dans ce système [10].

La figure 3(a) présente une image en champ clair de l'ensemble des particules, ainsi qu'une image de fluorescence d'un centre NV au sein d'une particule de diamant individuelle. La pointe de la sonde de balayage est également visible dans l'image optique (données non présentées), ce qui permet une identification précise de la particule analysée. Les Figures 3(b) et 3(c) montrent des cartographies NSMM de l'amplitude non calibrée et du déphasage du coefficient de réflexion complexe S_{11} , acquises sur la même région. Un fort contraste micro-onde est observé à l'emplacement de la particule de diamant. Le balayage est réalisé à une hauteur de pointe d'environ $1 \mu\text{m}$ au-dessus de la surface de l'échantillon. Ces résultats confirment la corrélation spatiale entre les signaux de fluorescence et micro-ondes, et démontrent la capacité de la sonde coaxiale à caractériser la réponse électromagnétique localisée à l'échelle nanométrique.

4. Discussion

La variation mesurée de $|S_{11}|$, d'environ 1 mdB, est cohérente avec le comportement attendu pour un échantillon isolant. Cette réponse résulte de l'interaction pointe-échantillon, qui se distingue du cas du vide principalement par la permittivité locale. L'interaction avec les centres NV est vraisemblablement beaucoup plus faible et n'est pas observable dans cette expérience. Bien que l'objectif à long terme de ce système soit de permettre le couplage micro-onde aux états de qubit à deux niveaux des centres NV, de telles interactions dépassent le cadre de ce travail. Dans des études antérieures, nous avons démontré une sensibilité du

NSMM atteignant 10^{-6} dB [11]-[12]. L'étalonnage n'a pas été pris en compte dans cette démonstration de preuve de concept. La résolution spatiale de l'image NSMM (figure 4) est d'environ $10\text{ }\mu\text{m}$, inférieure à celle attendue compte tenu du diamètre de la pointe. Cette limitation peut être attribuée aux champs de fuite ou à la séparation pointe-échantillon.

5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons développé une plateforme de mesure intégrée combinant l'imagerie de fluorescence à super-résolution et la microscopie micro-ondes à balayage (NSMM) au moyen d'une sonde coaxiale miniaturisée. Le système a été démontré sur des particules de diamant contenant des centres NV, montrant que la configuration NSMM coaxiale est capable de détecter des réponses diélectriques localisées en étroite corrélation avec des structures définies optiquement. Cette démonstration de preuve de concept établit la faisabilité de la caractérisation NSMM appliquée aux matériaux quantiques émergents. Les travaux futurs porteront sur la mise en œuvre de mesures quantitatives et étalonnées des qubits, ainsi que sur la possibilité d'adresser individuellement des qubits par l'injection localisée de séquences d'impulsions micro-ondes pour la manipulation d'états quantiques.

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).

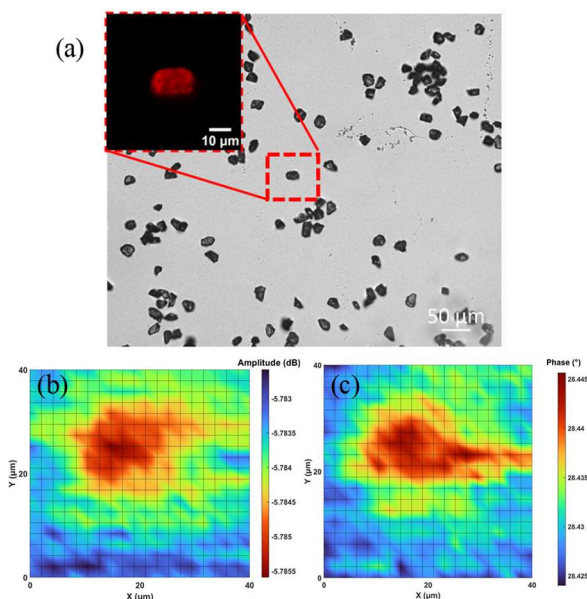


Figure 3. a) Image de particules de diamant contenant des centres NV. Image NSMM de (b) amplitude et (c) déphasage de S_{11} , sur la particule centrale de (a). $F = 2\text{ GHz}$.

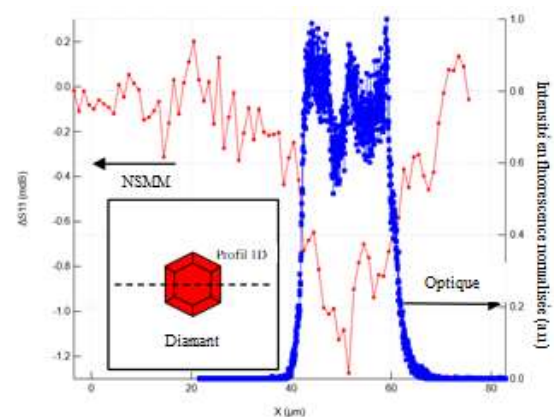


Figure 4. Balayage 1D de l'intensité de fluorescence et du signal d'amplitude NSMM relatif (ΔS_{11}).

Références

- [1] M. M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum computation and quantum information*. Cambridge University Press, 2010.
- [2] R. Schirhagl *et al.*, "Nitrogen-vacancy centers in diamond: Nanoscale sensors for physics and biology," *Annu. Rev. Phys. Chem.*, vol. 65, no. 1, pp. 83–105, Apr. 2014.
- [3] H. Lehmann *et al.*, "Metrology for the second quantum revolution," *Measurement: Sensors*, vol. 1, p. 101857, Feb. 2025.
- [4] A. Imtiaz *et al.*, "Near-field scanning microwave microscopy: An emerging research tool for nanoscale metrology," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 15, no. 1, pp. 52–64, Jan. 2014.
- [5] P. H. Siegel, "Microwaves are everywhere: 'SMM: Nano-microwaves,'" *IEEE J. Microw.*, vol. 1, no. 4, pp. 838–852, Oct. 2021.
- [6] D. E. Steinhauer *et al.*, "Surface resistance imaging with a scanning near-field microwave microscope," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, no. 12, pp. 1736–1738, Sep. 1997.
- [7] C. P. Vlahacos *et al.*, "Near-field scanning microwave microscope with 100 m resolution," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 21, pp. 3272–3274, 1996.
- [8] C. H. Lee *et al.*, "Combined super-resolution fluorescence and coaxial 3-D scanning microwave microscopy: Proof-of-concept in-liquid live-cell imaging—Toward a biological nano-radar," *IEEE Microw. Wireless Technol. Lett.*, vol. 35, no. 1, pp. 131–134, Jan. 2025.
- [9] B. Eckmann *et al.*, "Coaxial tips for a scanning microwave microscope and its calibration with dielectric references," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 8, p. 085010, May 2024.
- [10] S. Noh *et al.*, "Quantum sensing with an off-the-shelf super resolution microscope," in *Proc. Quantum Effects and Measurement Techniques in Biology and Biophotonics II*, Mar. 2025, p. 33.
- [11] J. Li *et al.*, "Scanning microwave microscopy of vital mitochondria in respiration buffer," in *Proc. IEEE/MTT-S Int. Microw. Symp. (IMS)*, Jun. 2022.
- [12] J. Hoffmann *et al.*, "Comparison of impedance matching networks for scanning microwave microscopy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1–9, May 2024.