

Sujet thèse / PhD subject 2025

Titre Thèse	Etude de nano-matériaux par la technique de microscopie térahertz en champ proche	
PhD Title	Study of nano-materials thanks to the terahertz near-field microscopy technique	
(Co)-Directeur	Jean-François Lampin	E-mail : jean-francois.lampin@univ-lille.fr
(Co)-Directeur		E-mail :
(Co)-Encadrant (s)		E-mail :
Laboratoire	IEMN	Web : www.iemn.fr
Groupe(s)	Photonique THz	Web : www.iemn.fr/la-recherche/les-groupes/photonique-thz
Projet phare principal	NanoCaractérisation	
Demande de fléchage IEMN ? (Energie / Nanocaractérisation / Technologies Neuromorphiques)	Oui ./ Non : Oui Flagship choisi : Nanocaractérisation	
Demande de labellisation Université de Lille (GREAL, labellisée)	Oui / Non : Oui Label :	
Financement acquis Oui ☐ Non ☐ Partiel X	Si acquis (total ou partiel), préciser : (contrat, organisme, Université étrangère, ,) : Contrat ANR QuickTera (1/2 Thèse)	
Financement demandé	Contrat Doctoral Etablissement	ULille X Centrale Lille ☐ JUNIA ☐
	Région ou Autre X Préciser :	Co financement (Préciser l'origine, demande en cours, et si acquis ou pas) : Contrat ANR QuickTera (1/2 Thèse)

Résumé / Abstract :

Les nano-matériaux sont une vaste famille de matériaux émergents pour la microélectronique et la photonique qui présentent une grande variété de propriétés électroniques, diélectriques, phononiques, magnétiques... Leur forme est structurée à l'échelle nanométrique : soit dans les trois directions de l'espace (fullerènes, nanocristaux...), soit dans deux directions de l'espace (matériaux dits « 1D » comme les nanotubes de carbone ou de nitrure de bore,...), soit dans une direction de l'espace (matériaux « 2D » comme le graphène, le nitrure de bore,...). Ces matériaux ont en commun le fait qu'il est possible d'en faire la croissance ou le report sur une très grande variété de substrats. Il est également possible de les agencer afin d'obtenir des propriétés particulières ce qui démultiplie le nombre de degrés de liberté disponibles pour la réalisation de dispositifs nouveaux. L'utilisation de substrats constitués de matériaux répandus et dont la fabrication est peu énergivore permet d'envisager une électronique à plus faible coût et plus respectueuse des ressources planétaires disponibles. Il est toutefois nécessaire de mettre au point les techniques de croissance et/ou de report de ces nano-matériaux, il est également nécessaire de caractériser les propriétés de ces nano-matériaux aux échelles nanométriques afin d'optimiser leurs procédés de fabrication. Les techniques d'imagerie à sonde locale sont bien adaptées pour ce type de caractérisation, en particulier la microscopie en champ proche optique à balayage (scanning optical near-field microscopy ou SNOM). Elle s'est avérée très puissante pour la caractérisation de nano-matériaux : nanocristaux, nanofils, matériaux 2D. Elle permet d'acquérir simultanément la topographie d'un échantillon et le comportement électromagnétique du matériau situé sous la sonde de mesure. Grâce au faible rayon de courbure de celle-ci il est possible d'obtenir des résolutions spatiales de quelques dizaines de nanomètres compatibles avec les technologies actuelles. La thèse vise à étudier différents nano-matériaux grâce à un SNOM fonctionnant dans la gamme moyen-infrarouge et térahertz, une gamme de fréquence particulièrement intéressante pour étudier les oscillations collectives d'électrons (plasmons) et les vibrations des structures cristallines (phonons) des nano-matériaux. Ces études seront complétées par d'autres caractérisations complémentaires comme la spectroscopie Raman, la spectroscopie térahertz dans le domaine temporel, la photoluminescence et la spectroscopie FTIR au synchrotron SOLEIL. Enfin les applications de ces nano-matériaux pour la réalisation de dispositifs aux fréquences térahertz sera envisagée.

Nano-materials are a vast family of emerging materials for microelectronics and photonics which have a wide variety of electronic, dielectric, phononic, magnetic properties... Their shape is structured at the nanometric scale: either in the three directions of space (fullerenes, nanocrystals, etc.), either in two directions in space (so-called

“1D” materials such as carbon or boron nitride nanotubes, etc.), or in one direction in space (“2D” materials such as graphene, boron nitride, etc.). These materials have in common the fact that it is possible to grow or transfer them on a very wide variety of substrates. It is also possible to arrange them in order to obtain particular properties, which multiplies the number of degrees of freedom available for the production of new devices. The use of substrates made of widespread materials and whose manufacture is energy efficient makes it possible to envisage electronics at lower cost and more respectful of the available planetary resources. However, it is necessary to develop growth and/or transfer techniques for these nano-materials, it is also necessary to characterize the properties of these nano-materials at nanometric scales in order to optimize their manufacturing processes. Local probe imaging techniques are well suited for this type of characterization, in particular scanning near-field optical microscopy (SNOM). It has proven to be very powerful for the characterization of nano-materials: nanocrystals, nanowires, 2D materials. It makes it possible to simultaneously acquire the topography of a sample and the electromagnetic behavior of the material located under the measurement probe. Thanks to its radius of curvature, it is possible to obtain spatial resolutions of a few tens of nanometers compatible with current technologies. The thesis aims to study different nano-materials thanks to a SNOM operating in the mid-infrared and in the terahertz range, a particularly interesting frequency range to study the collective oscillations of electrons (plasmons) and the vibrations of the crystalline structures (phonons) of nano-materials. These studies will be supplemented by other complementary characterizations such as Raman spectroscopy, terahertz spectroscopy in the time domain, photoluminescence, and FTIR spectroscopy at SOLEIL synchrotron. Finally, the applications of these nano-materials for the production of devices at terahertz frequencies will be considered.

Liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet en soulignant celles du laboratoire.

- [1] R. Hillenbrand, T. Taubner, and F. Keilmann, "Phonon-enhanced light-matter interaction at the nanometre scale," *Nature*, vol. 418, pp. 159-162, 2002/07/01 2002.
- [2] S. Dai et al., Tunable Phonon Polaritons in Atomically Thin van der Waals Crystals of Boron Nitride, *Science* 343 (2014).
- [3] X. Guo et al., Terahertz nanoscopy: Advances, challenges, and the road ahead, *Appl. Phys. Rev.* 11, 021306 (2024).
- [4] X. Chen, D. Hu, R. Mescall, G. You, D. N. Basov, Q. Dai, *et al.*, "Modern Scattering-Type Scanning Near-Field Optical Microscopy for Advanced Material Research," *Advanced Materials*, vol. 31, p. 1804774, 2019.
- [5] A. J. Huber, F. Keilmann, J. Wittborn, J. Aizpurua, and R. Hillenbrand, "Terahertz Near-Field Nanoscopy of Mobile Carriers in Single Semiconductor Nanodevices," *Nano Letters*, vol. 8, pp. 3766-3770, 2008/11/12 2008.
- [6] C. Liewald, S. Mastel, J. Hesler, A. J. Huber, R. Hillenbrand, and F. Keilmann, "All-electronic terahertz nanoscopy," *Optica*, vol. 5, pp. 159-163, 2018/02/20 2018.
- [7] A. Pagiès, G. Deokar, D. Ducatteau, D. Vignaud, and J. Lampin, "THz near-field nanoscopy of graphene layers," in *2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, 2015, pp. 1-2.
- [8] B. Walter et al., Terahertz near-field imaging using batch-fabricated cantilevers with 70 μm long tips, *44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2019.
- [9] L. Thomas et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14, 32608, (2022).
- [10] C. N. Santos et al., Ultraconfined THz polaritons in van der Waals PbI₂ crystals (Article en préparation, sera soumis à un journal à fort IF).