



Sujet de Thèse

Encadrant : Aurélien BRUYANT

Equipe(s) : LNIO, UTT, FRANCE

Projet : Nanospectroscopie de champ proche infrarouge : thermométrie

Encadrant : Hassan Amoud,

Equipe : UL, Tripoli

Autres collaborations : ST-microelectronics, LIMMS (Japan), American University of Beirut

Mots-clés (5 maximum) : Microscopie de champ proche optique, nano-optique, force optique, transport thermique.

Contact : aurelien.bruyant@utt.fr

hassan.amoud@gmail.com

Sujet : Au dos

Contexte et Problématique

Le “thermal-aware design” en microélectronique est en enjeu de première importance pour la performance des composants mais aussi pour la maîtrise énergétique à l’échelle des pays. Près de 30% de la consommation électrique aux Etats-Unis est en effet consacrée aux écrans d’affichage et aux dispositifs électroniques (PC, tablette, etc.) dont le caractère pléthorique pose un problème croissant. La recherche de solutions technologiques aux problèmes de dissipation et d’optimisation thermique dans les circuits intégrés est donc, plus que jamais, d’actualité et fait l’objet de nombreux travaux, pour des raisons environnementales évidentes, mais aussi pour prévenir la défaillance et accroître les performances de ces systèmes. Les clés pour réduire la dissipation thermique résident dans le contrôle non trivial des états de surfaces et des interfaces et dans le choix et la qualité cristalline des matériaux.

Pour mener à bien ce travail, la **cartographie de conductivité thermique (K)** et plus généralement la mesure des **champs de température** au sein des composants à l’échelle caractéristique de ces derniers (quelques dizaines de nanomètres) est un besoin critique pour l’industrie microélectronique. Cependant cette industrie ne dispose pas d’outil de caractérisation pleinement satisfaisant pour effectuer cette analyse (cf. complément scientifique A).

Ce projet vise ainsi à développer une méthode non conventionnelle de **cartographie de température (ultérieurement de conductivité thermique) à très haute résolution spatiale**. (cf. Illustration Figure 1)

Pour effectuer ces caractérisations, l’équipe projet rassemble des compétences fortes en **nano-optique, nanothermique et microélectronique**. En particulier, l’équipe LNIO spécialisée en **nano-optique** est en contact avec l’équipe « Mechanical & Thermal Modeling » de **STMICROELECTRONICS** à Crolles, pour développer l’approche avec notamment des échantillons pertinents (dépôt d’ANR prévu début 2018).

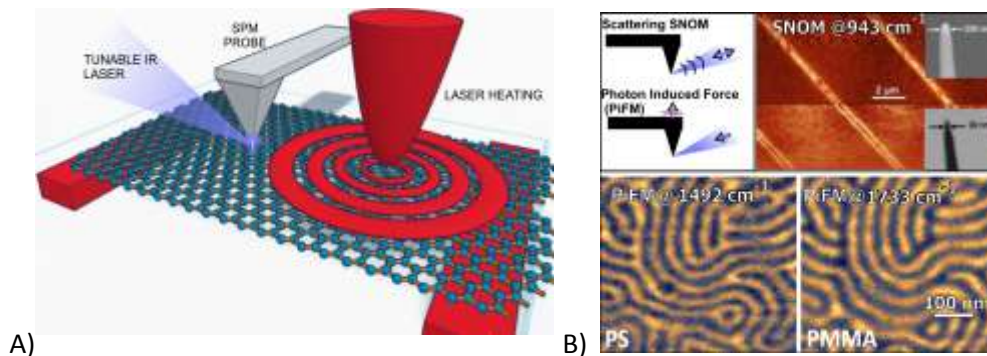


Figure 1. A) Approche expérimentale, ici dans le cas d’un matériau 2D. La lumière infrarouge rétrodiffusé par la sonde est enregistrée par un détecteur (mode scattering SNOM) à différentes longueur d’onde pour effectuer la mesure du décalage spectral induit par la température. Dans le mode PiFM, la mesure est mécanique, la lumière est modulée à une fréquence mécanique propre du levier dont les oscillations sont détectées par une photodiode à quadrant. B) Exemple d’images obtenues avec l’instrument développé au LNIO (SNOM) et récemment acquis (PiFM) des co-polymères (PS et PMMA).

Objectifs scientifiques

L'objectif premier d'intérêt scientifique et industriel est de développer une nouvelle méthode de cartographie de température (T) à l'échelle nanométrique, permettant également d'accéder à une cartographie de conductivité thermique.

- ⇒ Dans ce but, des images hyper-spectrales (nanospectroscopie résolue spatialement) seront réalisées par nanoscopie Infrarouge
- ⇒ Une approche multimodale unique (nanoscopie de type PiFM et SNOM infrarouge, cf. figure 1) permettra de raffiner la modélisation des données expérimentales.
- ⇒ Les échantillons pertinents pour l'industrie microélectronique seront également étudiés théoriquement (dynamique moléculaire, éléments finis) pour comparer modèles et mesures.

Méthodologie de la recherche

Une méthode spectroscopique particulièrement intéressante a en effet été récemment proposée et utilisée avec succès sur des matériaux de faible dimensionnalité comme du graphène. Cette technique, sans contact, dénommée 'Optothermal Raman Technique' (ORT) a obtenu un succès retentissant, mais reste limitée en terme de résolution spatiale.

Il s'agit ici de transposer cette approche de mesure spectroscopique à l'échelle nano en utilisant une microscopie de champ proche optique, domaine d'excellence du laboratoire LNIO. La mesure de température locale sera effectuée par nanospectroscopie Infrarouge, en mesurant le décalage spectral (de résonances phononiques) induit par l'échauffement au sein de l'échantillon produit par un faisceau de chauffe. Le coefficient de température caractérisant le décalage (cm⁻¹/K) est préalablement déterminé en portant l'ensemble de l'échantillon à différentes températures (équilibre thermique). La mesure est ensuite effectuée à différentes puissances de chauffe d'un laser focalisé au voisinage de la sonde. L'approche est illustrée sur la figure 1, accompagnées d'images de nanoscopie infrarouge à différentes longueur d'onde (en cm⁻¹).

Références

Méthode ORT (lien hypertexte):

- [1] [Thermal conductivity of isotopically modified graphene.](#) " *Nature materials* 11.3 (2012): 203-207
- [2] [Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials.](#) " *Nature materials* 10.8 (2011): 569-581 (2500 citations)

Spectro-nanoscopie par PiFM:

- [3] [Nowak, Derek, et al. "Nanoscale chemical imaging by photoinduced force microscopy." *Science advances* 2.3 \(2016\): e1501571](#) (by molecular vista inc.)

Approche concurrentes (SThM):

- [4] Williams, C. C., Wickramasinghe, H. K. (1986). "Scanning thermal profiler". *Appl. Phys. Lett.* 49 (23): 1587
- [5] GMELIN, E.; FISCHER, R.; STITZINGER, R. THERMOCHIM. ACTA 1998, 310 (1-2), 1-17.
- [6] SHI, L.; MAJUMDAR, A. MICROSCALE THERMOPHYS. ENG. 2001, 5 (4), 251-265.
- [7] THERMAL ANALYSIS OF POLYMERS; MENCZEL, J. D.; PRIME, R. B., Eds.; JOHN WILEY & SONS, INC.: NEW YORK, 2008.
- [8] GORBUNOV, V. V.; FUCHIGAMI, N.; HAZEL, J. L.; TSUKRUK, V. V. LANGMUIR 1999, 15 (24), 8340-8343.
- [9] TSUKRUK, V. V.; GORBUNOV, V. V.; FUCHIGAMI, N. THERMOCHIM. ACTA 2002, 395 (1-2), 151-158.
- [10] MAJUMDAR, A.; CARREJO, J. P.; LAI, J. APPL. PHYS. LETT. 1993, 62 (20), 2501-2503.
- [11] SHI, L.; KWON, O.; MINER, A. C.; MAJUMDAR, A. J. MICROELECTROMECH. SYST. 2001, 10 (3), 370-378.
- [12] SHI, L.; MAJUMDAR, A. J. HEAT TRANSFER 2002, 124 (2), 329-337.
- [13] POLLOCK, H. M.; HAMMICHE, A.; SONG, M.; HOURSTON, D. J.; READING, M. J. ADHES. 1998, 67 (1-4), 217-234.
- [14] PATRICK, C. F.; BYEONGHEE, L.; WILLIAM, P. K. NANOTECHNOLOGY 2012, 23 (3), 035401.
- [15] NAKABEPPU, O.; CHANDRACHOOD, M.; WU, Y.; LAI, J.; MAJUMDAR, A. APPL. PHYS. LETT. 1995, 66 (6), 694-696.
- [16] PYLKKI, R. J.; MOYER, P. J.; WEST, P. E. JPN. J. APPL. PHYS. 1994, 33, 3785-3790.
- [17] SINGAMANENI, S.; LEMIEUX, M. C.; LANG, H. P.; GERBER, C.; LAM, Y.; ZAUSCHER, S.; DATSKOS, P. G.; LAVRIK, N. V.; JIANG, H.; NAIK, R. R.; BUNNING, T. J.; TSUKRUK, V. V. ADV. MATER. 2008, 20 (4), 653-680.

Références bibliographique des directeurs/encadrant (équipe projet)

- A. Bruyant (UTT-LNIO, 39yo, h-factor 18, 1100 citation, 4 patents)

Liste des publications: https://scholar.google.fr/citations?hl=en&user=YNN4uFAAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate

- References includes near-field nanoscopy studies as well as IR/thermal investigation of nanostructures through collaborations

- Selected STMicroelectronics references du groupe MMT (STMicroelectronics):

"Thermo-mechanical characterization of passive stress sensors in Si interposer." *Microelectronics Reliability* 55.5 738-746. (2015)

"Thermal Effects of Silicon Thickness in 3-D ICs: Measurements and Simulations." *Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on* 4.8 1284-1292. (2014)

"Thermal correlation between measurements and FEM simulations in 3D ICs." *3D Systems Integration Conference (3DIC), 2013 IEEE International. IEEE, (2013)*

"Thermal behavior of stack-based 3D ICs." *Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), 2012 4th. IEEE, (2012)*

Plus de références: https://scholar.google.fr/scholar?start=10&q=author:+Gallois-Garreignot&hl=en&as_sdt=0,