

## SUJET DE THESE

### **Métrologie des techniques de microscopie à sonde locale micro-onde appliquées aux mesures de transport dans le domaine des semiconducteurs**

La thèse proposée ici a pour objectif le développement d'outils métrologiques pour les microscopes à sonde locale micro-onde SMM couramment utilisés pour les mesures locales d'impédance aux petites échelles. Le SMM (Scanning Microwave Microscope) est un microscope champ proche qui travaille à haute fréquence. Il permet de connaître les comportements des matériaux entre 0,5 et 20 GHz, et d'en déduire une cartographie d'impédance complexe. Le SMM est un des instruments de la plateforme NAEL du LNE dédiée à la caractérisation métrologique de propriétés électriques de nanomatériaux. Les outils développés dans ce projet prendront la forme de développements expérimentaux (fabrication de pointes blindées, fabrication de structures de référence) et de méthodes d'étalonnage appuyés par des travaux de modélisation. La réduction des incertitudes de mesure de capacité à quelques % est envisageable dans des conditions optimales pour des valeurs allant d'une centaine d'attofarads à la dizaine de femtofarads. Ce même niveau d'incertitude est également visé pour les mesures locales de propriétés de matériaux tels que la mesure de concentration de dopants sur des jonctions photovoltaïques individuelles à nanofils (GaAs), la mesure par spectroscopie d'impédance de forte valeur de permittivité relative ( $> 1000$ ) de films minces (PZT, PMN-PT), ou la détermination de la résistance en feuille sur du graphène ou d'autres matériaux 2D.

#### **CONTEXTE :**

La microscopie en champ proche adaptée aux mesures locales de grandeurs électriques à l'échelle nanométrique, communément appelée microscopie à sonde locale électrique, est largement utilisée en recherche et développement et en qualification (test de défaillance) pour les nano-circuits et nano-composants électroniques. Cependant, en dépit des progrès considérables sur les deux dernières décennies, la microscopie à sonde locale électrique, n'est pas encore comprise comme une véritable technique expérimentale quantitative par manque d'outils métrologiques adaptés. Une attention particulière devrait être portée sur la traçabilité des mesures d'impédance et de courant qui devient critique pour un certain nombre de domaines industriels tels que celui de la micro et nanoélectronique mais aussi ceux qui relèvent de l'énergie, de la santé et de la sécurité. Ainsi, dans sa feuille de route 2015, le comité de l'ITRS explicite les défis métrologiques à relever dans les matériaux émergents (graphène et matériaux 2D, matériaux à forte permittivité électrique ...) et dans la caractérisation de leurs propriétés électriques à l'échelle nanométrique.

La thèse proposée ici s'inscrit dans le cadre du développement de l'activité nanométrie électrique permettant à l'institut LNE-Nanotech de répondre à ces attentes industrielles et sociétales en matière de métrologie pour la micro et nanoélectronique. Les travaux de thèse s'intégreront dans la contribution du LNE à des projets de recherche européens tels que le projet « Nanowire » qui démarrera en juin 2020 sur le développement d'outils nanométriques pour caractériser des dispositifs de récupération d'énergie à base de nanofils.

## **TRAVAIL DE THESE :**

Les missions confiées sont les suivantes :

- Conception et développement d'étalons (par exemple des microstructures de référence capacitive) et de méthodes de mesure et d'étalonnage pour les techniques SMM ;
- Améliorations significatives des performances du SMM pour le rendre métrologique. Il s'agira principalement de concevoir et développer des pointes blindées. Le circuit HF au niveau du système pointe - levier sera modélisé pour déterminer les facteurs (épaisseur du diélectrique...) d'optimisation électromagnétique et mécanique à prendre en compte dans la fabrication de pointes blindées ;
- Etude des paramètres clés affectant l'exactitude des mesures. Des travaux de modélisation seront réalisés pour évaluer l'effet du ménisque d'eau à l'interface pointe – échantillon sur la mesure de capacité, mais aussi l'interaction électromagnétique pointe - échantillon, et l'effet de la déformation de la pointe (usure) lors du balayage. Ces travaux s'appuieront sur des mesures SMM de la permittivité complexe de l'eau au voisinage de l'apex sur une large gamme de fréquence, sur des observations au microscope électronique à balayage (MEB) de la morphologie des pointes SMM et sur des mesures dimensionnelles (AFM, MEB) et électromagnétiques (SMM) effectuées sur des structures de référence;
- Réalisation des mesures à l'échelle nanométrique de propriétés électriques (impédance, constante diélectrique, profils de dopants, résistance en feuille) sur différents nanodispositifs et nanomatériaux et établissement des bilans d'incertitude associés.
- Réalisation de mesures à l'échelle nanométrique en mode Scanning Capacitance Microcopy (SCM) et comparaison avec les mesures réalisées par SMM. En particulier, des échantillons de référence, dont la concentration de dopants est connue, seront utilisés pour mettre en œuvre une procédure d'étalonnage. Evaluation de l'utilisation de pointes blindées pour la mise en œuvre des mesures de type SCM (une adaptation du porte pointe sera nécessaire pour prendre les contacts sur le blindage des pointes).

## **APTITUDES ET CONNAISSANCES PARTICULIÈRES :**

- Caractérisations : une première expérience en caractérisation champ proche : AFM, Mesures électriques par SMM ou conductive AFM sera fortement appréciée.
- Modélisation et simulation
- Goût pour la mesure et l'instrumentation.
- Rigueur, imagination et dynamisme sont des qualités nécessaires.
- Une aptitude à la rédaction de rapport est fortement requise. Bonne maîtrise de l'Anglais

## **CONTACT :**

François Piquemal : francois.piquemal@lne.fr, 01 30 69 21 73

Brice GAUTIER : [brice.gautier@insa-lyon.fr](mailto:brice.gautier@insa-lyon.fr), 04 72 43 70 03