

Spectroscopie micro-onde par couplage électro-élastique

Développement du dispositif de mesures pour la caractérisation des couches minces isolantes à haute fréquence

- Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : Emmanuel Géron / section 63
- Co-encadrant : Étienne Maréchal (Ingénieur de Recherche CNRS)
- Unité de recherche : UMR 8213 Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux (LPEM)
- Établissement de rattachement : Sorbonne Université/ESPCI Paris-PSL/CNRS
- Domaine : micro-ondes et radio-fréquences

Projet

Les propriétés électriques d'un matériau conditionnent le dimensionnement du dispositif électronique dans lequel il est utilisé. Pour un isolant, les propriétés électriques les plus souvent utilisées sont la permittivité et la conductivité. Ces propriétés sont presque toujours mesurées par impédancemétrie sur des structures MIM (Métal/Isolant/Métal) où l'isolant correspond au matériau testé. L'impédance électrique en amplitude et en phase de la structure MIM est mesurée en fonction de la fréquence ce qui permet de repérer la dynamique des différents dipôles présents dans le matériau, responsables notamment des pertes diélectriques. À haute fréquence, il existe d'autres types de pertes que les pertes purement diélectriques. En effet, lorsqu'on applique un champ électrique variable à un isolant, un couplage électro-élastique se produit par effet électrostatique, électrostrictif voire piézoélectrique. Les ondes ultrasonores ainsi générées emportent une partie de l'énergie ce qui équivaut, du point de vue de la mesure, à une perte. Sachant que le couplage électro-élastique dépend directement de la densité de charges électriques dans le matériau testé, il est possible d'estimer la distribution du champ électrique à l'intérieur de ce matériau par spectroscopie. Cette information est capitale pour l'étude du vieillissement des matériaux isolants. L'accès à cette information à haute fréquence et de manière non-destructive permet l'étude de couches minces, comme par exemple celles utilisées en micro-électronique de puissance. La présence de charges dans les couches isolantes des transistors peut en effet décaler les seuils de ces transistors et mettre à mal le système dans lesquels ils sont inclus.

Le Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux, Unité Mixte de Recherche ayant pour tutelles Sorbonne Université, l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles et le CNRS, est spécialiste dans l'étude et le développement de dispositifs micro-ondes et dans la caractérisation des matériaux isolants. Il a ces dernières années démontré la faisabilité de la méthode de mesure par spectroscopie micro-onde avec un potentiel de résolution spatiale inférieur à 100 nm, soit une amélioration de plus d'un facteur 100 par rapport à toutes les méthodes de mesure concurrentes.

Les dernières avancées sur le dispositif de mesure pour les échantillons en couches minces, maintenant sous pointes et avec un traitement numérique des mesures totalement repensé, ont amené une amélioration sensible de la qualité de la mesure et de la résolution d'un échantillon de test en polymère piézoélectrique. Néanmoins si ces mesures sont remarquables, la prochaine étape est d'appliquer le dispositif de mesures sur des isolants non piézoélectriques soumis à des tensions élevées pour valider complètement la méthode. La réalisation en partie en salle blanche d'échantillons isolant fin parfaitement connus sera ainsi une des premières tâches à réaliser pour réaliser des mesures fiables et contrôlées.

Effectuer de telles mesures sur des isolants en couche mince non piézoélectriques reste un défi car le rapport signal sur bruit attendu est nettement plus faible que pour un matériau piézoélectrique. L'application de la méthode même dans sa forme actuelle la plus aboutie nécessite ainsi l'amélioration du dispositif micro-onde. L'énergie réfléchie par la structure MIM formée par le matériau testé est intrinsèquement très importante. Un dispositif d'adaptation micro-onde réglable en fréquence sera nécessaire afin de maximiser la puissance transmise à l'échantillon pour augmenter le couplage électro-élastique et donc la réponse du matériau.

Il est ensuite nécessaire de bien dissocier les deux phénomènes de pertes, d'une part celui purement diélectrique et, d'autre part, celui par couplage électro-élastique. Cette étape effectuée, il devient alors possible de reconstruire la distribution du champ électrique à partir de la réponse spectrale de l'échantillon.

Lors d'une première thèse, un système de compensation de la capacité à l'aide d'un stub réglable motorisé, piloté électroniquement a été développé sur un dispositif de mesure connecté. Il a permis de démontrer la faisabilité de la mesure à plus hautes fréquences. Néanmoins le nouveau dispositif qui s'appuie sur une excitation et une mesure à l'aide d'une pointe hyperfréquence nécessite une refonte complète suivie d'une optimisation du système d'adaptation d'impédance. La compréhension complète de l'ensemble de la chaîne de mesure, en particulier du couplage échantillon/chaîne de mesure avec l'influence de l'adaptation d'impédance est à approfondir pour pouvoir interpréter correctement les résultats qui seront ainsi obtenus.

L'objet de cette thèse est d'étudier et de mettre en place un banc de mesure complet pour la méthode de mesure spectroscopique

proposée et de faire des mesures sur des matériaux d'intérêt industriel. Cela nécessite de la part des candidats, de bonnes connaissances préalables en micro-ondes, en électronique haute fréquence et en traitement du signal et un goût pour la science des matériaux. Une bonne maîtrise des techniques de mesures hyperfréquences est également souhaitable.

Enjeux

- Mesure des propriétés électriques des isolants avec une résolution spatiale inégalée
- Étude des matériaux en couches minces de manière non destructive (sans équivalent)
- Adaptation pilotable et continue sur une bande de fréquence de 100 MHz à 10 GHz
- Reconstruction spatiale du signal temporel, à partir de la réponse spectrale mesurée en réflexion via l'étude de l'admittance du matériau
- Modélisation de l'influence de l'adaptation d'impédance d'entrée sur la signification des nouvelles mesures obtenues
- Développement d'un banc de mesure complet si possible automatisé permettant l'accès à des informations aujourd'hui inaccessibles.