

Étude des champs électriques à l'échelle nanométrique dans des nanodispositifs par holographie électronique *operando*

Résumé

Les matériaux diélectriques sont omniprésents dans les dispositifs microélectroniques en raison de leur capacité à se polariser. Les matériaux ferroélectriques, qui présentent une constante diélectrique élevée et une polarisation spontanée, font l'objet de recherches intensives en vue d'améliorer la capacité locale ou de créer des dispositifs à capacité négative. Il est donc essentiel de pouvoir mesurer la polarisation localement pour mieux comprendre la situation. Ces matériaux ferroélectriques sont ainsi très prometteurs pour diminuer la consommation électrique des composants dans lesquels ils seront employés (transistor à effet de champ, mémoire flash,...)

Grâce à une nouvelle méthodologie permettant de mesurer directement la polarisation et les densités de charge dans les nanodispositifs à couches minces en cartographiant les champs électriques à une résolution spatiale inférieure au nanomètre, les objectifs de ce stage sont de déterminer la polarisation locale dans les matériaux diélectriques et ferroélectriques en fonction de la polarisation appliquée à travers les couches et les interfaces. Ces études *operando* utilisant l'holographie électronique et une polarisation *in situ* seront réalisées sur des nanostructures dédiées associant des matériaux diélectriques et ferroélectriques, et comparées à des mesures électriques macroscopiques. La modélisation numérique des systèmes à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM) sera aussi indispensable pour interpréter correctement et quantitativement les mesures expérimentales.

Sujet

Les matériaux diélectriques et ferroélectriques sont largement utilisés dans les dispositifs microélectroniques en raison de leur capacité à se polariser lors de l'application d'un champ électrique. Ces matériaux ont suscité de nombreuses recherches fondamentales et appliquées au fil des ans. Les matériaux à forte constante diélectrique, appelés diélectriques high-K, sont particulièrement intéressants pour remplacer le dioxyde de silicium dans les dispositifs microélectroniques dont les propriétés s'estompent avec la réduction des dimensions [1]. Très récemment, les matériaux ferroélectriques, qui présentent une polarisation spontanée même en l'absence d'un champ appliqué, ont créé un intérêt considérable pour produire des dispositifs exploitant la capacité négative [2-4] et offrir une solution à la dissipation de puissance et à la surchauffe qui surviennent lors de la miniaturisation des transistors [5]. La mesure locale de la polarisation dans les matériaux diélectriques et ferroélectriques est donc essentielle pour mieux comprendre et développer une nouvelle génération de dispositifs.

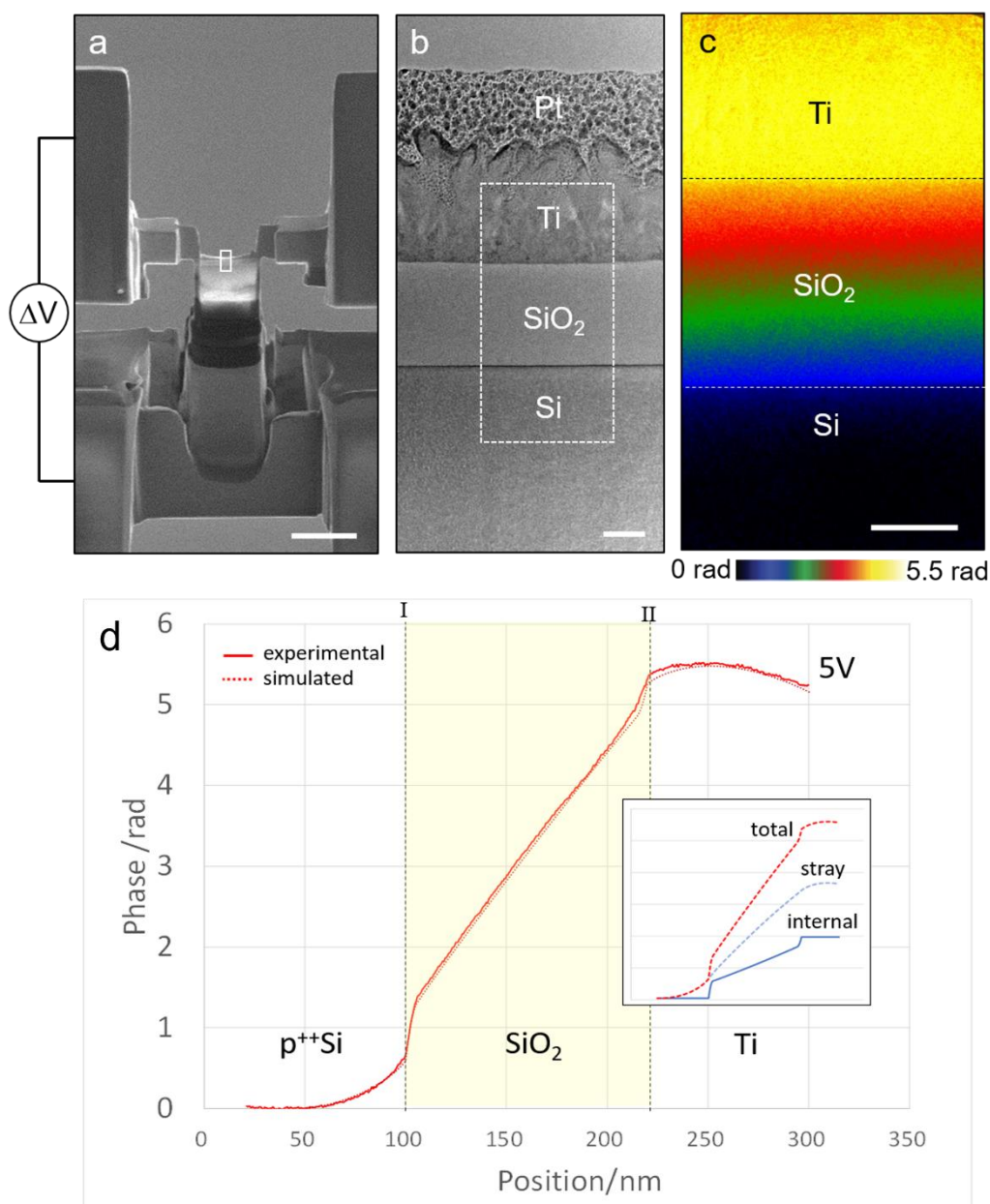
Alors que les propriétés ferroélectriques et diélectriques peuvent être facilement mesurées macroscopiquement à l'aide de méthodes électriques, la tâche est bien plus difficile à l'échelle nanométrique et pour les matériaux en couches minces. Les échantillons vus en section transverse, c'est-à-dire par la tranche, nécessaires pour visualiser les phénomènes à travers un dispositif ou une séquence de couches, sont le domaine de la microscopie électronique à transmission (MET) qui permet des mesures avec une très grande résolution spatiale. Les techniques MET reposent actuellement sur l'analyse structurale pour identifier les changements de polarisation. À l'échelle atomique, par exemple, les déplacements des atomes dans le réseau sont analysés en détail pour en déduire la polarisation locale [6-8]. Les mesures sont généralement effectuées sur des échantillons non polarisés, à partir d'un état de polarisation antérieur dont l'histoire est incertaine. Une mesure locale et directe de la polarisation pendant l'application d'une tension électrique serait une avancée considérable.

L'holographie électronique est une technique MET pour mesurer les champs locaux dans les matériaux, des champs électriques et magnétiques [9] jusqu'à la déformation cristalline [10]. La phase du faisceau électronique mesurée par l'holographie peut être directement liée au potentiel électrostatique rencontré par l'électron le long de sa trajectoire. Bien qu'il ait été démontré très tôt que les champs électriques pouvaient être mesurés de cette manière dans les dispositifs semi-conducteurs [11], le développement d'expériences *operando* a demandé beaucoup de temps. Les études sur les dispositifs polarisés électriquement sont rares [12,13] en raison de nombreuses difficultés à surmonter, telles que la préparation des échantillons, la prise en compte des couches endommagées en surface, des champs

parasites et du faible rapport signal/bruit. Depuis plusieurs années, l'équipe I3EM du CEMES a développé une expertise de pointe sur ces différents problèmes et a démontré qu'un champ électrique peut maintenant être mesuré dans différents nanodispositifs en utilisant l'holographie électronique *in situ* avec une sensibilité sans précédent [14.15]. Nos développements sont maintenant suffisamment mûrs pour proposer une nouvelle méthodologie nécessaire à la mesure de la polarisation électrique à l'échelle nanométrique.

Travail

Le stagiaire participera au développement de la mesure directe de la polarisation et des densités de charge dans les dispositifs à couche mince en cartographiant les champs électriques à l'échelle nanométrique. Les études seront réalisées en utilisant l'holographie électronique *operando* sur des nanostructures dédiées combinant des matériaux diélectriques et ferroélectriques. Les expériences MET seront associées à des modélisations pour comprendre l'influence des paramètres expérimentaux et construire un modèle réaliste du nano-objet observé. En fonction du candidat, le stage peut être axé soit sur les aspects expérimentaux, soit sur les aspects de modélisation.



Holographie électronique Operando d'un nanocondensateur : (a) image de microscopie électronique à balayage (MEB) du dispositif-échantillon dans le FIB montrant les contacts de Pt déposés sur les

électrodes en or de la puce ; (b) image MET de la région active montrant le substrat de silicium fortement dopé, la couche diélectrique de dioxyde de silicium (120 nm), l'électrode supérieure de Ti et la couche de contact de Pt ; (c) cartographie de la phase du potentiel électrique projeté obtenue par holographie électronique (région en pointillés en b) y. (d) Modélisation par la méthode des éléments finis du potentiel électrique dans le dispositif-échantillon : profil de phase expérimental pour une polarisation de 5 V (rouge), meilleure simulation d'ajustement (pointillés rouges). Insertion : contributions de phase simulées du potentiel interne (bleu), du champ parasite (bleu en pointillés) et du total (rouge en pointillés). Marches de potentiel aux interfaces causées par les couches de charge diélectrique. Barres d'échelle : 5 μm pour (a) et 50 nm pour (b) et (c).

Collaboration : Ce travail sera réalisé en collaboration avec le C2N (Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, Saclay), le LNO-SPEC du CEA-Saclay et la Freie Universität Berlin.

Extension du doctorat possible : oui (financement déjà acquis)

Compétences recherchées : Théorie électrostatique, très bonnes connaissances en la matière condensée, aptitude à la modélisation informatique ou aux études expérimentales.

Contacts: Christophe Gatel and Martin Hÿtch
CEMES-CNRS, 29 rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse
mail: christophe.gatel@cemes.fr, martin.hytech@cemes.fr

Pour information : <http://www.cemes.fr/I3EM-Interferometrie-In-situ-et>

- [1] J. Robertson *et al.*, *High-K Materials and Metal Gates for CMOS Applications*, Mater. Sci. Eng. R Rep. **88**, 1 (2015).
- [2] A. I. Khan *et al.*, *Negative Capacitance in a Ferroelectric Capacitor*, Nat. Mater. **14**, 182 (2015).
- [3] J. Íñiguez, P. Zubko, I. Luk'yanchuk, and A. Cano, *Ferroelectric Negative Capacitance*, Nat. Rev. Mater. **4**, 243 (2019).
- [4] M. Hoffmann *et al.*, *Unveiling the Double-Well Energy Landscape in a Ferroelectric Layer*, Nature **565**, 464 (2019).
- [5] T. N. Theis and P. M. Solomon, *It's Time to Reinvent the Transistor!*, Science **327**, 1600 (2010).
- [6] C.-L. Jia *et al.*, *Atomic-Scale Study of Electric Dipoles near Charged and Uncharged Domain Walls in Ferroelectric Films*, Nat. Mater. **7**, 57 (2008).
- [7] A. K. Yadav *et al.*, *Spatially Resolved Steady-State Negative Capacitance*, Nature **565**, 468 (2019).
- [8] A. Lubk *et al.*, *Evidence of Sharp and Diffuse Domain Walls in BiFeO₃ by Means of Unit-Cell-Wise Strain and Polarization Maps Obtained with High Resolution Scanning Transmission Electron Microscopy*, Phys. Rev. Lett. **109**, 047601 (2012).
- [9] R. E. Dunin-Borkowski *et al.*, *Electron Holography*, in Springer Handbook of Microscopy, edited by P. W. Hawkes and J. C. H. Spence (Springer International Publishing, Cham, 2019), pp. 767–818.
- [10] M. Hÿtch *et al.*, *Nanoscale Holographic Interferometry for Strain Measurements in Electronic Devices*, Nature **453**, 1086 (2008).
- [11] W. D. Rau *et al.*, *Two-Dimensional Mapping of the Electrostatic Potential in Transistors by Electron Holography*, Phys. Rev. Lett. **82**, 2614 (1999).
- [12] A. C. Twitchett *et al.*, *Quantitative Electron Holography of Biased Semiconductor Devices*, Phys. Rev. Lett. **88**, 238302 (2002).
- [13] Y. Yao *et al.*, *In Situ Electron Holography Study of Charge Distribution in High- κ Charge-Trapping Memory*, Nat. Commun. **4**, (2013).
- [14] C. Gatel *et al.*, *Extended Charge Layers in Metal-Oxide-Semiconductor Nanocapacitors Revealed by Operando Electron Holography*, Phys. Rev. Lett. **129**, 137701 (2022).
- [15] M. Brodovoi *et al.*, *Mapping Electric Fields in Real Nanodevices by Operando Electron Holography*, Appl. Phys. Lett. **120**, 233501 (2022).