**Sujet de thèse**

**École doctorale Matériaux de Lyon**

|  |
| --- |
| **Etablissement d’inscription :** ECL |
| **École doctorale :** ED Matériaux |
| **Intitulé du doctorat :** Micro et Nanoélectronique |
| **Sujet de la thèse :** Corrélations entre les propriétés fonctionnelles des matériaux et les performances des dispositifs électroniques intégrés |
| **Unité de recherche :** INL |
| **Directeur/trice de thèse :** Bertrand VILQUIN |
| **Co-enacdrante de thèse** : Sara GONZALEZ |
| **Co-directeur/trice de thèse en entreprise** (le cas échéant) : [civilité, nom, prénom] |

**Collaborations/partenariats extérieurs :** STMicroelectronics (STM-Crolles) et CEA-LETI

**Domaine et contexte scientifiques** :

Après plus de 40 ans d'évolution continue, nos systèmes informatiques atteignent leurs limites. En effet, l'architecture de Von-Neumann, sur laquelle reposent nos ordinateurs, dissocie physiquement les cœurs de calculs de la mémoire. Le traitement séquentiel de l'information est ainsi confronté à un goulot d'étranglement, plus communément appelé « Mémoire Bottleneck ». Une solution consiste à s'inspirer des paradigmes mathématiques naturels du cerveau humain, dans lesquels les données sont massivement traitées en parallèle avec une efficacité énergétique élevée, réalisant l'implémentation matérielle de réseaux neuromorphiques. Ces derniers permettent de rapprocher les sites de stockage de l'information (synapses) des sites de traitement (neurones). L'enjeu majeur de cette approche bio-inspirée est la réalisation de réseaux denses de synapses artificielles pour mettre en œuvre des mécanismes de plasticité synaptique. Il existe à ce jour peu de synapses artificielles ferroélectriques artificielles dans l'industrie de la microélectronique.

Cela signifie que beaucoup d'efforts doivent encore être faits pour comprendre et contrôler les différents facteurs qui peuvent aider à stabiliser et à améliorer les propriétés des films ferroélectriques. Parmi eux, une bonne intégration des films dans des dispositifs fonctionnels soulève la question de savoir comment nous pouvons utiliser une interface film/électrode appropriée pour mieux comprendre la réponse du film ferroélectrique à une tension appliquée.

**Mots-clefs :** ferroélectricité ; mémoires non volatiles ; films minces ; oxyde fonctionnel ; caractérisations ; interfaces.

**Verrous scientifiques :**

Certains challenges restent à surmonter avant de pouvoir envisager une intégration en industrie.

La commutation de la polarisation dans les films ferroélectriques nécessite un contact métallique, ce qui soulève des questions fondamentales sur le comportement de l'interface entre la couche ferroélectrique et l'électrode. En effet, il existe plusieurs sources d'interactions mutuelles entre électrode, film ferroélectrique et substrat, telles que :

- Effets liés aux charges : les charges libres d'une électrode ou d'un substrat peuvent aider à filtrer les charges de surface induites par la polarisation qui sont préjudiciables au maintien d'une polarisation exploitable dans le film mince ferroélectrique. Avec les électrodes en oxyde métallique, un déplacement ionique à l'interface électrode/ferroélectrique va également faire écran à ce champ dépolarisant.

- Zones de déplétion dues à des reconstructions chimiques et électroniques ou à des défauts aux interfaces (zones isolantes semi-conductrices).

- Effets liés à la déformation qui peuvent résulter d'un décalage de dilatation thermique ou d'un décalage de réseau.

- Propriétés dépendantes de l'épaisseur (effets limitant l'espace pour l'effet tunnel, mobilité ionique).

**Objectifs de la thèse :**

Le projet aura pour contributions originales attendues :

* identifier les meilleures voies pour optimiser les propriétés des couches minces ferroélectriques HfZrO2 afin d'obtenir des jonctions tunnel ferroélectriques répondant aux exigences industrielles ;
* pour caractériser la phase, la structure et la chimie du domaine local, la structure électronique liée au défaut, le rôle de l'interface et des champs internes seront évalués en fonction du cyclage, spécialement pour obtenir un matériau/structure unique, des caractérisations chimiques et physiques mettant en évidence le rôle de manques d'oxygène au réveil, à l'empreinte et à l'endurance ;
* établir des relations directes entre la composition de l'empilement ferroélectrique et les performances électriques et fournir des règles de guidage vers l'optimisation des empilements grâce à un modèle à la fois physique et compact des structures Électrode-Ferroélectrique-Électrode. Sur la base des analyses chimiques et électriques, un modèle physique des empilements Electrode-Ferroélectrique-Electrode, incluant les couches d'interface et les profils de lacunes d'oxygène sera réalisé.

**Programme de recherche et démarche scientifique proposée :** La thèse s’articulera autour de 3 tâches principales décrites ci-dessous.

* **T1 Conception des films ferroélectriques :** Cette tâche sera consacrée à la réalisation de films ferroélectriques et de leur optimisation par ingénierie des interfaces. Les couches de HZO seront déposées à l’INL par PVD selon différentes variantes technologiques (dopage, épaisseur, recuit,…). En articulation avec T2, l’objectif est d’aboutir à des films optimisés ayant une forte polarisation.
* **T2 Développer d’hétérostructures de test pour les mesures operando :** conception d'un ensemble d'électrodes supérieures par lithographie qui peuvent être connectées pour appliquer une polarisation à travers le film ferroélectrique tout en mesurant les modifications induites.
* **T3 Caractérisation physique et électrique :** Les empilements réalisés seront analysés afin d’évaluer leur qualité microstructurale (analyses TEM, EDX, XPS…) afin de guider leur optimisation. Les caractérisations électrique et structurale *in operando* des empilements ferroélectriques, permettant de relier les propriétés structurales aux perfomances des démontrateurs, sera effectuée par TEM, XRD & XPS sur grands instruments.

**Encadrement scientifique** :

* + - **Description du comité d’encadrement :**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Nom Prénom | Labo / Equipe | Compétences scientifiques | Taux d’encadrement % |
| VILQUIN Bertrand | INL/Electronique | Dépôts de films minces d’oxydes ferroélectriques | 25 |
| GONZALEZ Sara | INL/ Electronique | Caractérisations struturales et operando avancées | 35 |
| CANERO INFANTE Ingrid | INL/ Electronique | Caractérisations struturales | 20 |
| DELERUYELLE Damien | INL/DE | Caractérisations électriques avancées | 20 |

* + - **Intégration au sein du laboratoire** : 100%

**Financement de la thèse :** Contrat doctoral de l’établissement d’inscription.

**Profil du candidat recherché (prérequis) :** Le (la) candidat(e) devra impérativement posséder de solides connaissances en physique des matériaux et en caractérisation électrique des matériaux acquises lors d'un master de micro/nanoélectronique ou un master de physique des matériaux.

Un goût prononcé pour un travail très expérimental est absolument nécessaire. Le candidat devra posséder une bonne maîtrise des compétences rédactionnelles nécessaires à la communication scientifique, ainsi que de l'anglais.

**Objectifs de valorisation des travaux de recherche :**  Ce travail de recherche fera l'objet de publications dans les revues scientifiques internationales à comité de lecture, ainsi que dans les congrès de la discipline (International Symposium on the Application of Ferroelectrics, International Meeting on Ferroelectricity etc). Sur un plan régional et national, il permettra de renforcer la visibilité et l’apport original du laboratoire dans le domaine de l’électronique notamment dans le cadre du laboratoire commun avec STM et de la convention INL-LETI. Enfin, les résultats permettront l’acquisition de résultats préliminaires indispensables afin de s’orienter sur des instruments de financement européens (programmes Horizon Europe).

**Compétences qui seront développées au cours du doctorat :** Le/La candidat(e) sera formé(e) à la fabrication de matériaux sous forme de couches minces. Il/Elle recevra également une formation aux étapes de salle blanche pour la réalisation d'électrodes et de dispositifs simples. Son environnement de travail lui permettra d'acquérir des connaissances en caractérisation électrique des matériaux (mesures courant – tension, capacité – tension). Il/Elle sera intégré(e) dans la communauté nationale de la nanoélectronique, dans la communauté nationale des oxydes fonctionnels et dans la communauté scientifique internationale des couches minces ferroélectriques. Elle/il participera aux congrès de son domaine (International Symposium on the Application of Ferroelectrics, Workshop on Oxide Electronics, Electroceramics, European Material Research Society…).

**Perspectives professionnelles après le doctorat :** La formation homogène reçue durant la thèse permettra au doctorant de postuler à un poste académique dans tous les laboratoires impliqués dans ce domaine ou de chercher un emploi privé dans des services de recherche et développement des grandes entreprises qui tirent parti de ce type de matériaux (Thales, STM, IBM…).