

Sujet de thèse

École doctorale EEA de Lyon

Merci de compléter l'ensemble des rubriques et de lire les notes de bas de page.

Etablissement d'inscription : INSA Lyon ¹
École doctorale : ED 160 EEA de Lyon dirigée par Mr Delachartre Philippe
Intitulé du doctorat : Electronique, Nanotechnologie, Optique et Laser ²
Sujet de la thèse : Optimisation des propriétés de mémoires ferroélectriques par ingénierie des interfaces
Unité de recherche : INL ³ , dirigée par Bruno Masenelli
Directeur/trice de thèse : Mme LE BERRE Martine
Co-directeur/trice de thèse (le cas échéant)⁴ : Mr VILQUIN Bertrand
Co-directeur/trice de thèse en entreprise (le cas échéant) :

¹ A impérativement choisir dans la liste suivante : Ecole Centrale de Lyon, INSA de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1

² A impérativement choisir dans la liste suivante : Automatique // Electronique, Nanotechnologie, Optique et Laser // Génie Electrique // Ingénierie pour le vivant Traitement du signal et de l'Image)

³ A impérativement choisir dans la liste suivante : Laboratoire Ampère, CITI, CREATIS, INL, LAGEP, LGEF

⁴ Un/une co-encadrant-e n'est pas nécessairement co-directeur/trice de thèse puisque pour remplir ce rôle, il est nécessaire d'être habilité à diriger des recherches (pour plus de précision, voir le règlement intérieur de l'ED EEA, section 3.

Collaboration(s)/partenariat(s) extérieur(s) éventuels⁵ :

CEA-Leti, STM

Domaine et contexte scientifiques :

L'importance des mémoires non-volatiles (MNV) au sein du marché des semiconducteurs, n'a cessé de s'accroître au cours de ces 20 dernières années. Initialement soutenu par une demande croissante en termes de densité de stockage d'informations (musique, photos, vidéo, etc.), le marché des mémoires non-volatiles doit cependant faire face à des défis sans précédents principalement liés au développement de l'intelligence artificielle embarquée. Le développement remarquable de technologies MNV a été majoritairement alimentée depuis le milieu des années 80 par la miniaturisation constante de la mémoire Flash, basée sur le stockage de charges. Cependant, l'accroissement significatif du coût d'intégration des mémoires FLASH et ses limites intrinsèque de miniaturisation ne permettent pas d'envisager son utilisation au-delà du nœud 28nm. Ces limites d'intégration ont stimulé de nombreux travaux de recherche visant à identifier des technologies mémoires alternatives à la mémoire Flash. Parmi ces mémoires émergentes, les mémoires ferroélectriques (FeRAM) sont très prometteuses.

Mots-clefs : ferroélectricité; mémoires non volatiles; couches minces; oxydes fonctionnels; interfaces

Objectifs de la thèse :

Il s'agit de résoudre les problèmes actuels des matériaux ferroélectriques à base de HfO₂ et de réaliser des dépôts et microstructurations de couches minces à base de HfZrO₂ ferroélectriques selon des procédés transférables industriellement ; de qualifier et quantifier les propriétés structurales et électriques des matériaux dans des structures capacitives MIM ainsi que sous forme de transistors FeFET ; de caractériser operando ces démonstrateurs structurellement et électriquement. Cette thèse répondra donc à la problématique des relations entre les propriétés des matériaux et les performances des dispositifs réalisés.

Verrous scientifiques :

Au cours des 1ers cycles de vie de la mémoire, les valeurs de polarisation rémanente augmentent au fur et à mesure du cyclage jusqu'à atteindre leur valeur maximale, et se stabiliser. Ce phénomène, appelé « wake-up », est attribué à une redistribution des défauts (en particulier des lacunes d'oxygène) dans le matériau ou à des transitions de phase induites par l'application d'un champ électrique. En augmentant le nombre de cycles

⁵ Hors contrats doctoraux fléchés UMI par l'établissement, les sujets de thèse en cotutelle ne sont pas acceptés.

électriques appliqués au matériau ferroélectrique, une diminution des valeurs de polarisation rémanente peut être observée, ce qui correspond à la « fatigue » du matériau ferroélectrique et est attribuée à une augmentation de la quantité de défauts générés dans le matériau. Ces 2 phénomènes réduisent la largeur de la fenêtre mémoire. L'ingénierie d'interface est une des voies proposées dans le cadre de cette thèse pour améliorer les propriétés des structures MFM. L'autre voie est de jouer sur les contraintes appliquées sur le film ferroélectrique lors de son dépôt et de son recuit de cristallisation.

Contributions originales attendues :

Les contributions originales obtenues concernent principalement les corrélations entre propriétés des matériaux ferroélectriques et les performances des dispositifs réalisés. L'analyse fine de l'influence de divers paramètres de dépôt mais également de la nature des électrodes et du budget thermique sur les performances électriques ont pour finalité de lever les verrous qui freinent encore aujourd'hui l'utilisation de ces matériaux dans ce type de mémoire non-volatile innovante (imprint, wake-up, fatigue)

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

La thèse s'articulera autour de 3 tâches principales décrites ci-dessous.

- T1 - Ingénierie des films ferroélectriques : Cette tâche sera consacrée à la réalisation de films ferroélectriques et de leur optimisation par ingénierie des interfaces et des contraintes. Les couches de HZO seront déposées à l'INL par PVD et ALD selon différentes variantes technologiques (dopage, épaisseur, recuit,...). En articulation avec T2, l'objectif est d'aboutir à des films optimisés.
- T2 - 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 performances des démonstrateurs, sera effectuée à l'échelle nanométrique par des mesures sous pointe et XPS (au CEA-Leti).
- T3 - Réalisation de démonstrateurs ferroélectriques : Afin de réaliser des démonstrateurs MIM et FeFET, les empilements réalisés (T1+T2) seront intégrés au sein de structures électroniques. Il pourra être fait appel à certains procédés développés au sein du laboratoire international LN2 à Sherbrooke.

Encadrement scientifique :

- **Description du comité d'encadrement :** [à compléter avec le rôle dans l'encadrement scientifique (en termes de compétences scientifiques, etc.) et le pourcentage d'implication du directeur de thèse ⁶ et des autres membres du comité⁷]

Nom Prénom	Labo / Equipe	Compétences scientifiques	Taux d'encadrement %
Mme LE BERRE Martine	INL Dispositifs Electroniques	Dépôt de couches minces, ALD, caractérisations de couches minces	40
Mr VILQUIN Bertrand	INL Dispositifs Electroniques	Ferroélectricité, PVD, Technologies de salle blanche, caractérisation de couches minces	30
Mr DELERUYELLE Damien	INL Dispositifs Electroniques	Caractérisations électriques, ferroélectricité	30

- Le comité d'évaluation de l'HCERES ayant demandé à l'école doctorale de limiter la taille du comité d'encadrement à deux membres (directeur de thèse compris), il est impératif de ne proposer des comités d'encadrement de taille plus importante que si cela est absolument nécessaire⁸ et **de le justifier soigneusement.**

Le comité d'encadrement comprend 3 membres en raison de leur compétences très diversifiées ainsi que du site sur lequel ils travaillent (plateforme Nanolyon sites Ecully ou Villeurbanne pour l'élaboration du matériau selon des technologies qui sont différentes)

⁶ Le directeur de thèse doit être un HdR rattaché à l'ED EEA ou en passe de le devenir avant juin de l'année en cours ou bénéficier d'une dérogation du Conseil Scientifique lors du dépôt du sujet de thèse.

⁷ Dans le cas d'un comité d'encadrement réparti sur plusieurs établissements, la plus grande partie de l'encadrement est effectuée par des membres de l'établissement. Si l'encadrement de la thèse implique des membres hors de l'ED EEA, la part de l'encadrement des membres ED doit être très supérieure à 50%.

⁸ Un certain nombre de commissions type CNU ne reconnaissent un co-encadrement qu'au-delà d'un certain pourcentage. Souvent l'encadrement est considéré comme effectif si > 30%.

- **Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s)** (Département/Equipe(s) impliquée(s)) (**pourcentage du temps travail au sein de ce ou ces laboratoire(s)**) :

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 (OXYFUN) 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...).

Références bibliographiques sur le sujet de thèse :

[Banerjee, 2020] Banerjee, W. (2020). Challenges and Applications of Emerging Nonvolatile Memory Devices. *Electronics*, 9(6) : 1029. Number : 6 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

[Böscke et al., 2011] Böscke, T. S., Müller, J., Bräuhäus, D., Schröder, U., and Böttger, U. (2011). Ferroelectricity in hafnium oxide thin films. *Applied Physics Letters*, 99(10) : 102903. Number : 10 Publisher : American Institute of Physics.

[Hung et al., 2020] Hung J.M. , Li X., Wu J., Chang M.F. (2020). Challenges and Trends in Developing Nonvolatile Memory-Enabled Computing Chips for Intelligent Edge Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 67(4), 1444–1453 (2020).