## Energy-Efficient Computing with Integrated Ferroelectrics for Embedded and Edge Devices

Ferroelectric materials are gaining traction in integrated circuits, notably thanks to the introduction of Hafnium-Zirconium Oxides, which are compatible with state-of-the-art semiconductor materials and manufacturing technologies. Their ferroelectric properties, combined with regular CMOS technology, enable interesting new circuit architectures. Bringing Non-Volatile Memory technology closer to compute elements unlocks opportunities for higher power efficiency by reducing data transfers, lowering static power consumption, and enabling normally-off computing schemes.

In this thesis, ferroelectric materials are approached from a circuit design perspective, providing a basic understanding of their properties and modeling approaches. Multiple circuit architectures enabled by ferroelectric materials are also presented, both with Back-End of Line and Ferroelectric Field-Effect Transistor (FeFET) technologies, and electrical characterization results where available. Finally, projected performance figures are extracted, to allow comparison with more mature technologies, both at the circuit and system level, through Design-Space Exploration (DSE) techniques and a custom system-level performance evaluation framework.

Obtained results include novel circuit designs, some of which were fabricated with 130 nm and 28 nm technology, DSE simulation results for metrics such as memory window and energy consumption, as well as multiple software tools created over the course of the project.

Keywords: Ferroelectrics, FeFET, BEOL, FEOL, Non-Volatile Memories, In-memory Computing, FeMFET, psFeFET, 1T1C, 2T1C, 2TnC, FTJ, Post Von Neumann, Image filter, Convolution, Multiplier, Design Space Exploration, Modeling, Landau, Preisach, Non-Volatile Logic, Normally-off, SystemC, Verilog-A, Integrated Circuits.

## Calcul éco-énergétique avec matériaux ferroélectriques intégrés pour les systèmes embarqués et à la périphérie de réseau

L’inclusion de matériaux ferroélectriques dans les circuits intégrés suscite de plus en plus d’intérêt, notamment grâce à l’introduction d’oxydes de hafnium dopés au zirconium, compatibles avec les matériaux semi-conducteurs et les procédés de fabrication les plus modernes.

Leurs propriétés ferroélectriques, combinées aux technologies CMOS conventionnelles, permettent de créer de nouvelles architectures de circuits innovantes. Le rapprochement physique de mémoires non volatiles aux éléments de calcul ouvre de nombreuses possibilités d’amélioration de l’efficacité énergétique en réduisant les transferts de données, en diminuant la consommation d’énergie statique et en permettant l'utilisation de paradigmes de calcul normalement éteint (normally-off computing).

Dans cette thèse, les matériaux ferroélectriques sont abordés du point de vue de la conception de circuits, offrant une explication élémentaire de leurs propriétés et des approches utilisées pour leur modélisation. Plusieurs architectures de circuits utilisant des matériaux ferroélectriques sont également présentées, utilisant des technologies de dépôt en bout de ligne (Back-End of Line), ainsi que de transistors à effet de champ ferroélectrique (FeFET), avec les résultats de caractérisation électrique obtenus, le cas échéant. Enfin, des techniques d’exploration de l’espace de conception (DSE) et un outil interne d’évaluation des performances au niveau système sont combinés pour extraire des chiffres de performance projetés, afin de permettre une comparaison avec des technologies plus matures, tant au niveau du circuit que du système.

Les résultats obtenus correspondent à la conception de nouveaux circuits, dont certains ont été fabriqués en 130 nm et 28 nm, aux résultats des simulations DSE pour des paramètres tels que la fenêtre de mémoire et la consommation d’énergie, ainsi qu’à de multiples outils logiciels créés au long du projet.

Mots Clés : Ferroélectriques, FeFET, BEOL, FEOL, FeMFET, psFeFET, 1T1C, 2T1C, 2TnC, FTJ, Mémoires Non-volatiles, Calcul en mémoire, Post Von Neumann, Exploration Espace de Conception, Filtre d’Image, Convolution, Multiplieur, Logique non Volatile, Modélisation, Landau, Preisach, Normalement Éteint, SystemC, Verilog-A, Circuits Intégrés.