

日本—台湾研究交流「AI システム構成に資するナノエレクトロニクス技術」 2020 年度 年次報告書	
研究課題名（和文）	HfO ₂ 強誘電体を用いた機能性トランジスタの開発
研究課題名（英文）	Development of functional transistors using ferroelectric HfO ₂ films
日本側研究代表者氏名	浅沼 周太郎
所属・役職	産業技術総合研究所・主任研究員
研究期間	2020 年 4 月 1 日 ～ 2023 年 3 月 31 日

1. 日本側の研究実施体制

氏名	所属機関・部局・役職	役割
浅沼 周太郎	産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 主任研究員	薄膜作成、物理分析、電気特性解析、研究全体の取りまとめ
森田 行則	産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 グループ長	薄膜作成、物理分析
太田 裕之	産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 研究グループつき	薄膜作成、電気特性解析

2. 日本側研究チームの研究目標及び計画概要

HfO₂ 系強誘電体で 10¹² 回以上の Endurance 達成を実現するために、金属組成、膜厚、結晶化プロセス電界強度といった種々のパラメータが Endurance と自発分極特性に及ぼす影響を系統的に調査する。敏感に作用するパラメータを抽出し、そこを中心に評価を進めることで性能を律速している物理現象を探索する。

3. 日本側研究チームの実施概要

我々は本研究の目標を達成するために（1）複数金属元素の共添加によるバンドエンジニアリング及び（2）非平衡成長によるドメインエンジニアリングの二つの観点から HfO₂ 系強誘電体のパラメータを変化させるアプローチを行った。

（1）複数金属元素の共添加によるバンドエンジニアリング

このアプローチではパルスレーザー堆積法(PLD)を用いて薄膜試料の成膜を行った。PLD法は、自前で組成調整して合成したターゲットを用いて迅速に成膜実験が行えることから、ドーパント材料のスクリーニングを効率的に行える成膜法である。本研究では PLD 法を用いて主に薄膜への共添加(Co-doping)に取り組んだ。従来の研究の一度に 1 種類の元素を添加する方法の場合、価数平衡を保つために酸素欠損が生じることが問題となる。これを解決するためには、価数を補償するドーパントを同時に添加(Co-doping)することが望ましい。そこで本研究ではバンドギャップの狭小化に働く元素と全体の価数平衡を保つ元素を Co-doping することで、Endurance 特性の向上と抗電界の低減効果を狙った実験を行った。

PLD 法には上記のメリットがある一方、薄膜中にターゲット材料のドロップレットが付着しやすいと言うデメリットがある。しかし、強誘電体の特性を評価するために強誘電体を金属電極層で挟んだ Metal-Insulator-Metal 構造を作るにはドロップレットの少ない薄膜を成膜する必要がある。そこで、本年度は、エクリプス PLD 法と呼ばれる手法を用いて HfO₂ 薄膜の成膜を行った。この手法は、レーザー照射時にターゲットから生じるプラズマと基板の間にシャドウマスクを置き、質量の大きなドロップレットを遮蔽する一方で、質量の小さなプラズマ化した粒子は拡散されてマスクを回避し基板上に堆積することを利用した成膜法である。エクリプス PLD 法での成膜条件最適化の結果、ドロップレットが極めて少ない HfO₂ 膜及び HfZrO 膜の成膜に成功した。現在、この手法で成膜した HfO₂ 系強誘電体膜に複数元素を共添加した時の強誘電特性の変化に関する研究を進めている。

（2）非平衡成長によるドメインエンジニアリング

このアプローチではスパッタ法を用いてドメインを制御した薄膜の成膜を試みる実験を行った。

通常、スパッタ法で室温堆積した HfO₂ 膜は非晶質状態である。この膜に熱処理を行って結晶膜を生成すると、結晶粒径が 50~100 nm になることをこれまでの研究から確認している。我々は、この結晶粒径を 10 nm レベルまで小さくすることが出来れば分極の揺らぎが大きくなり抗電界が下がる他、Endurance 特性も向上すると予想している。そこで、我々は、薄膜中に原子層レベルよりも希薄なデルタドーピングで成長の核となる元素もしくは構造を分散導入し結晶核を多数発生させたり、結晶粒の成長を阻害する層を挿入して結晶核の成長拡大を阻止したりすることで結晶粒径のサイズを制御できると考え、これらの実証を試みる研究を進めている。

この様な研究の一つとして、超格子周期が異なる複数の HfO₂/ZrO₂ 超格子薄膜を成膜し、それらをアニーリングして強誘電体化した時の超格子周期と強誘電特性の関係を調べた。その結果、超格子周期に応じて強誘電特性に差が現れることが分かった。この結果は HfO₂ と ZrO₂ の界面が結晶核の生成に関与していることを示唆しており、結晶核の生成をドメインエンジニアリングで制御出来る可能性を示している。