



2026年7月21日

非鉛圧電薄膜の欠陥メカニズムを解明

～酸素空孔の分布と移動が電氣的劣化と寿命を決定づける～

<概要>

豊橋技術科学大学電気・電子情報工学系の吉村武教授と大阪公立大学の研究チームは、ペンシルベニア州立大学の誘電体・圧電体研究センター(CDP)との国際共同研究により、環境負荷の低い次世代圧電材料として注目される「Mn 添加ビスマスフェライト (BiFeO₃) 薄膜」について、薄膜中の酸素空孔の移動と分布が、電荷の流れ方や長期的な電氣的安定性をどのように支配するかを明らかにしました。本成果は、非鉛圧電体薄膜のデバイス応用に向けた材料設計指針を与えるものです。

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.6c00718>

<詳細>

スマートフォンや医療機器、自動車などに広く用いられる圧電 MEMS (微小電気機械システム) デバイスには、現在、鉛を含むジルコン酸チタン酸鉛 (PZT) の薄膜が広く使われています。しかし、環境・健康への影響から鉛を含まない材料への代替が求められており、高い圧電性と低い誘電率を兼ね備える鉄酸ビスマス (BiFeO₃、BFO) 系の薄膜が有力候補として注目されています。

こうした材料をセンサだけでなく、電圧を印加して駆動するアクチュエータのような能動的なデバイスへ応用するには、長期間にわたる電氣的な安定性 (信頼性) が欠かせません。BFO 系薄膜は電流が漏れやすい性質があり、その劣化のしくみは十分に分かっていませんでした。また、PZT では確立されている信頼性評価の手法が、非鉛材料に対してそのまま通用するののかも明らかではありませんでした。

ペンシルベニア州立大学の CDP は、長年にわたり PZT 系薄膜の電氣的信頼性を評価する手法 (加速劣化試験や、薄膜内の欠陥とそれに伴う電荷輸送機構を調べる各種測定法) を開発し、故障発生機構を解明するなどの実績を有していました。一方、豊橋技術科学大学 (吉村研究室、研究実施当時は大阪公立大学) は、シリコン基板上に高品質な BFO 系単結晶薄膜を作製する技術に強みを持っていました。今回の研究は、JST ASPIRE プログラムによる国際共同研究の枠組みのもと、両者の専門性を組み合わせることで実現しました。

研究チームは、Mn 添加 BiFeO₃ (BFMO) 単結晶薄膜に CDP の信頼性評価手法を適用し、薄膜の厚さ方向に酸素空孔が偏って分布していることを見出しました。この偏りにより、電圧を加える向き (プラス側・マイナス側のどちらを上にするか) によって電流の流れ方が異なること、また、酸素空孔が電場によって徐々に移動し、片側の電極付近に集まることで電気抵抗が低下していくことが分かりました。さらに、この BFMO 薄膜中での酸素空孔の動きやすさ (拡散係数) は PZT 薄膜と比べて約 1 桁大きく、これが相対的に短い動作寿命につながっていることも明らかになりました (図)。

これらの結果は、Mn 添加 BiFeO₃が圧電 MEMS 材料として高いポテンシャルを持つことを示すと同時に、酸素空孔の移動と分布という欠陥のふるまいが、電荷の流れ方・劣化・長期信頼性を一貫して支配しているという、より普遍性の高い知見を与えるものです。

<開発秘話>

第一著者である、当時大阪公立大学博士研究員の Sengsavang Aphayvong 氏は、JST ASPIRE プログラムの支援を受けてペンシルベニア州立大学に渡航し、CDP の Betul Akkopru-Akgun 研究助教、Susan Trolier-McKinstry 教授らと共同でこの評価を実施しました。

吉村教授は「CDP が培ってきた精緻な信頼性評価の手法を、我々が開発してきた BFM0 薄膜に適用できたことで、酸素空孔の移動とその膜内分布が、電気的な劣化や長期信頼性にどう結びつくのかが明らかになりました。材料の弱点を正確に知ることが、次世代の材料設計への確かな一歩になると考えています。」と語ります。

<今後の展望>

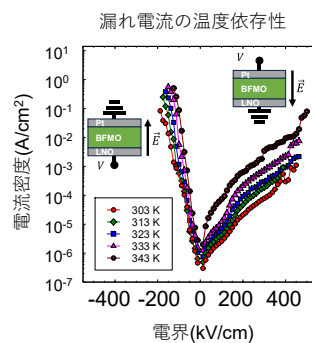
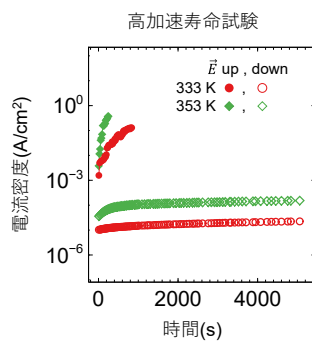
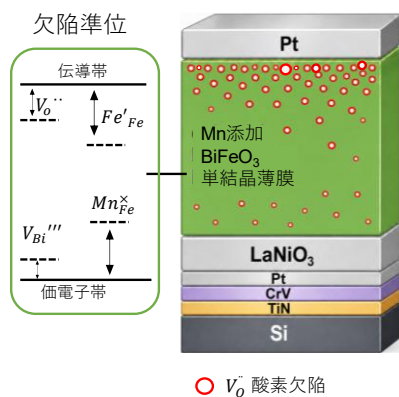
本研究の成果から、BFMO 薄膜は現時点ではセンサやエネルギーハーベスタ（振動発電素子）のような、比較的弱い電場で動作するデバイスに適していることが分かりました。一方で、アクチュエータのような強い電場を繰り返し用いる用途への展開には、酸素空孔の制御が重要な課題であることも明確になりました。研究チームは今後、BFO 系薄膜に対して欠陥の制御などの品質向上に取り組みつつ、ニューロモルフィックセンシングなどの新規な MEMS デバイスへの展開することを目指します。

<論文情報>

Sengsavang Aphayvong, Abhyuday Verma, Kae Nakamura, Ali Habib Akhyari, Takeshi Yoshimura, Susan Trolier-McKinstry, and Betul Akkopru-Akgun, "Polarity-Dependent Charge Transport and Resistance Degradation Enabled by Oxygen-Vacancy Gradients in BiFeO₃ Films," ACS Applied Materials & Interfaces, DOI: 10.1021/acsami.6c00718

<謝辞>

本研究は JST ASPIRE (JPMJAP2312) (豊橋技術科学大学、大阪公立大学)、および米国科学財団 (NSF) (IIP-1841453, IIP-1841466) (Penn State Center for Dielectrics and Piezoelectrics (CDP)) の支援を得て実施されました。



本件に関する連絡先

広報担当：総務課企画・広報係 高柳・野本

TEL：0532-44-6506 FAX：0532-44-6568