



大阪公立大学  
Osaka Metropolitan University



地方独立行政法人  
大阪産業技術研究所  
Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology



配信先:大阪科学・大学記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会

【論文公開予定】 DOI:10.1038/s41378-026-01177-5

2026年3月17日(火)朝(グリニッジ標準時)

※各社で論文が公開されたことをご確認いただいた後に記事掲載をお願いいたします。

2026年3月16日

大阪公立大学、大阪産業技術研究所、科学技術振興機構(JST)

## 半導体基板上で非鉛圧電体の性能向上を実証

～汎用成膜法で多数の条件を同時に評価し実現～

### <発表者>

大阪公立大学大学院工学研究科 吉村 武准教授、Sengsavang Aphayvong(センサワーン・アパイウォン)大学院生(研究当時)、大阪産業技術研究所

### <概要>

圧電材料は力を加えると電気が生じ、電気を加えると形が変わる性質を持つ材料で、圧力センサーやイヤホンなどに広く用いられています。鉛を使用しない圧電材料として注目されるビスマス鉄酸化物( $\text{BiFeO}_3$ 、 $\text{BFO}$ )<sup>\*1</sup>は、圧縮の力により圧電性能が向上することが報告されていましたが、この効果は実用的な半導体基板上では適用が難しいと考えられていました。

本研究グループは、引張ひずみ<sup>\*2</sup>を積極的に利用するという発想により、半導体基板上でも $\text{BFO}$ の構造相転移<sup>\*3</sup>を誘起でき、圧電特性を向上させることに成功しました(図1②)。本研究結果により、非鉛圧電材料の実用化を大きく前進させることが期待されます。

本研究成果は、2026年3月17日に、国際学術誌「Microsystems & Nanoengineering」にオンライン掲載される予定です。

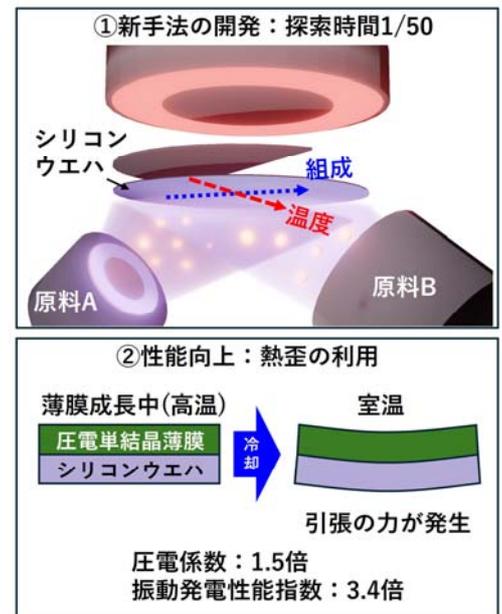


図1 研究の概要:効率的な材料探索と半導体基板上での性能向上

### <ポイント>

- ① 電子デバイス製造で広く用いられるスパッタ法<sup>\*4</sup>を活用し、半導体基板(シリコンウエハ)上に非鉛圧電単結晶薄膜<sup>\*5</sup>を作製。
- ② 多数の成膜条件を1枚の基板上で同時に評価できる手法(図1①)により、材料特性の最適化を効率的に実施。
- ③ 最適化した材料を用いて超小型振動発電デバイスを試作し、5倍の性能向上を実証。

### <研究者のコメント>

本研究では、半導体製造で広く使われているスパッタ法だけを用いて、シリコンウエハ上に高性能な圧電単結晶薄膜を作り、実際のMEMS<sup>\*6</sup>デバイスとして動作することを示しました。材料の結晶構造を丁寧に制御することで性能が大きく向上することが分かり、基礎と応用の両面で手応えを感じています。環境にやさしい非鉛材料の実用化につながることを期待しています。



吉村 武准教授

## <研究の背景>

圧電材料は、力を加えると電気が生じる、または電気を加えると変形する特殊な性質を持つ材料です。この性質を利用して、スマートフォンなどで使われる高周波フィルターやプリンターに加え近年ではイヤホンなど私たちの身の回りのさまざまな電子機器に広く使われています。

本研究グループは、圧電材料の新しい応用として、振動から電力を取り出す振動発電デバイスの開発に取り組んでいます。私たちの身の回りには、機械の振動や人の動き、交通振動など、小さな振動エネルギーがたくさん存在しています。圧電材料を使えば、このような「微小環境エネルギー」を電気に変えることができます。特に、IoT センサーやウェアラブルデバイスのように電池交換が難しい機器では、周囲の振動から電力を作り出せれば、電池の寿命を延ばしたり、電池そのものを不要にできたりする可能性があります。

現在、圧電材料として最も高性能なのは、鉛(Pb)を含むチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)という材料です。しかし、鉛は人体や環境に有害な物質であり、国際的な環境規制も強化されているため、鉛を使わない材料(非鉛材料)で高性能を実現することが強く求められています。鉛を含まないビスマス鉄酸化物( $\text{BiFeO}_3$ 、BFO)は、比較的高い圧電性能と適度な誘電率を持ち、センサーや発電デバイスに適した特性を備えているため、有力な非鉛圧電材料として注目されています。しかし、デバイスを作るために必要な性能がまだ十分でなく、実用化には至っていませんでした。

一方、物質科学の基礎研究では、BFO の性能を向上させる「歪(ひずみ)誘起構造相転移」という現象を利用する方法が見つかっていました(Zeches ら、Science (2009))。BFO 薄膜を特定の酸化物単結晶基板( $\text{SrTiO}_3$  や  $\text{LaAlO}_3$  など)の上に成長させると、基板と BFO の結晶格子の大きさの違いにより、BFO に圧縮の力(圧縮ひずみ)が加わります。この力によって BFO の結晶構造が変化(相転移)し、圧電性能が大幅に向上することが報告されていました(図 2 上)。

しかし、実際のデバイス作製に使われるシリコンウエハ上では、シリコンと BFO の熱膨張係数の違いにより、この効果を利用できないという大きな課題がありました。シリコンは熱膨張係数が非常に小さい(約  $3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )のに対し、BFO は比較的大きい(約  $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ )ため、高温(約  $500^\circ\text{C}$ )で BFO 薄膜を成長させた後、室温まで冷却すると、BFO には圧縮ではなく引張の力(引張ひずみ)が働いてしまいます。このため、酸化物単結晶基板で見られた圧縮ひずみによる性能向上効果を、実用的なシリコンウエハ上では利用できないと考えられてきました。

## <研究の内容>

本研究では、従来は課題とされてきた「引張ひずみ」を逆に積極的に利用するという発想の転換により、BFO の結晶構造を変化させることを考えました。これにより、デバイス作製で実際に使われるシリコンウエハ上でも、歪誘起構造相転移による圧電特性の向上を目指しました(図 2 下)。しかし、この目標を実現するには、複数の技術的ハードルがありました。まず、歪誘起構造相転移を発現させるには、シリコンウエハ上に BFO 薄膜を単結晶として高品質に成長させる必要があります。また、デバイスの実用化を考えると、半導体産業で広く使われているスパッタ法のみでこれを実現したいという制約があ

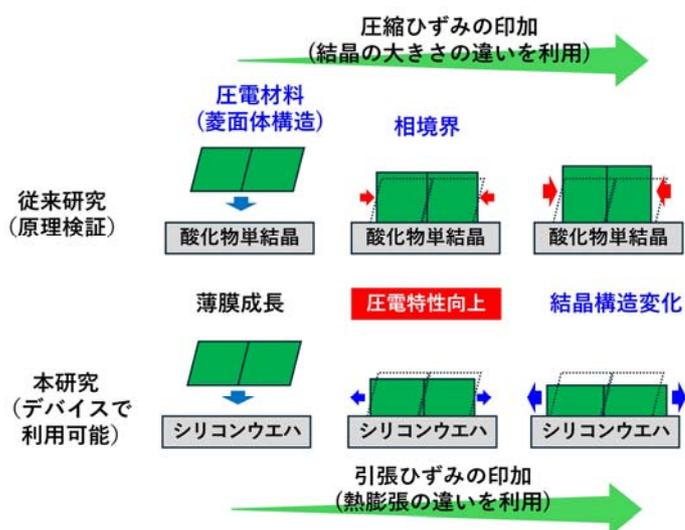


図 2 ひずみを利用した圧電特性の向上における従来研究(上)と本研究(下)の違い

ります。そして、熱膨張係数差を利用して加わる引張ひずみの大きさを最適化するには、成長温度の精密な制御と最適化が不可欠です。しかし BFO に含まれるビスマス (Bi) は融点が低い金属であるため、成長温度を変えると再蒸発により組成も変わってしまうという難しい問題があります。

これらすべての条件を満足する最適点を見つけるには、通常的手法では膨大な実験回数と時間が必要になります。本研究グループはこれらの課題を一挙に解決するため、「二軸コンビナトリアルスパッタ法<sup>※7</sup>」という独自の成膜技術を開発しました。この方法では、1枚の基板上で成長温度と組成を2方向に連続的に変化させることができます。本研究では1回の実験で25通りの異なる条件を同時に探索し、さらに評価に要する時間が約半分に短縮できたことから、最適条件の発見に要する時間を約1/50に短縮することができました。

本研究による技術により、以下の画期的な成果が得られました。

#### 成果 1: 世界最高の圧電性能を達成

- ・ 圧電係数<sup>※8</sup>  $e_{31,f} = -6.0 \text{ C/m}^2$  を達成 (従来の BFO 配向膜の約 1.5 倍、文献報告値と比較して世界最高)
- ・ 引張ひずみ条件下での歪誘起構造相転移による性能向上を世界で初めて実証

#### 成果 2: 高性能 MEMS 振動発電デバイスを実現

最適化した Mn 添加 BFO (BFMO) 薄膜を用いて、実際に超小型振動発電デバイス (MEMS) を作製しました:

- ・ 電気機械結合係数<sup>※9</sup>  $K^2 = 0.5\%$  (従来の (100) 配向 BFO 薄膜の 5 倍)
- ・ 性能指数  $K^2 Q_m = 2.7$  (従来 BFO の約 3.4 倍、PZT 並みの高性能)

#### 成果 3: 実用的な広帯域発電を実証

瞬間的な衝撃入力 (インパルス励振) に対する応答を評価した結果:

- ・ 従来 BFO と同等の出力電圧を、半分の重量で実現
- ・ 出力の減衰時間が約 1/3 (1.2 秒 vs 3.4 秒) に短縮
- ・ 広帯域の環境振動からの発電に適した特性を確認

#### <期待される効果・今後の展開>

本研究の成果により、鉛を含まない圧電材料であっても、実用レベルの MEMS が実現できる可能性が示されました。特に、特別な結晶基板を用いず、一般的なシリコンウエハ上に、スパッタ法のみで単結晶材料を作製できる点は、将来の量産や産業応用にとって大きな利点です。今後は、スマートセンサー、IoT 機器、自立電源デバイスなどへの応用展開も目指します。非鉛圧電材料の実用化は、環境負荷の低減にも貢献すると考えられます。

#### <資金情報>

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 先端国際共同研究推進事業 (ASPIRE) (課題番号: JPMJAP2312)、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST (課題番号: JPMJCR20Q2) の支援を受けて実施しました。特に、JST ASPIRE プログラムの支援は、研究進捗を加速させました。筆頭著者の Sengsavang Aphayvong は、大阪公立大学博士後期課程に在学中にこの実験を実施し、論文執筆時には Pennsylvania State University の Troler-McKinstry (トロイラー・マッキンストリー) 教授の研究室に ASPIRE の支援により渡航し博士研究員として在籍していました。研究室での密接な意見交換により本論文がまとまり、その後の共同研究にも発展しています。

## <用語解説>

- ※1 ビスマス鉄酸化物( $\text{BiFeO}_3$ 、 $\text{BFO}$ ):ビスマス(Bi)、鉄(Fe)、酸素(O)からなる酸化物材料。鉛を含まない圧電材料として注目されている。適度な圧電性能と誘電率を持ち、センサーや発電デバイスに適した特性を備える。
- ※2 ひずみ:材料に外部から力が加わることで生じる変形。圧縮ひずみ(押し縮められる)と引張ひずみ(引き伸ばされる)がある。薄膜では、基板と薄膜の熱膨張係数や結晶格子定数の違いによりひずみが発生し、これが材料の性質を大きく変化させる。
- ※3 構造相転移:結晶中の原子の並び方(結晶構造)が変化する現象。温度や圧力、ひずみなどの外的条件により生じる。相転移により材料の電氣的・機械的の性質が大きく変化することがあり、本研究ではこの現象を利用して圧電性能を向上させた。
- ※4 スパッタ法:固体材料(ターゲット)にイオンを衝突させ、飛び出した原子を基板上に堆積させる薄膜作製法。半導体製造で広く使われる汎用(はんよう)技術。真空装置内で行われ、大面積の均一な薄膜を作製できるため、量産性に優れる。
- ※5 単結晶薄膜:エピタキシャル薄膜。原子が規則正しく配列した高品質な薄膜。基板の結晶構造に沿って成長させることで、原子レベルで整った構造を実現。多結晶膜に比べて電氣的・機械的の特性が大幅に優れることが多い。
- ※6 MEMS:メムス。Micro Electro Mechanical Systems の略。シリコンなどの基板上に微小な機械構造を作り込んだデバイス。スマートフォンの加速度センサーやマイク、プリンターヘッドなど幅広く使われる。本研究では、圧電材料を組み込んだ振動発電デバイス(振動から電力を取り出す素子)として応用した。
- ※7 二軸コンビナトリアルスパッタ法:1 回の実験で複数の条件を同時に評価する手法。本研究では、1 枚の基板上で成長温度と組成を連続的に変化させることで、従来は数年かかる最適化を数ヶ月で完了できる。材料開発の効率を大幅に向上させる手法として注目されている。
- ※8 圧電係数:薄膜の横方向の圧電特性を表す指標( $e_{31,f}$ )。値の絶対値が大きいほど、薄膜に力を加えたときに発生する電圧が大きい。単位は  $\text{C}/\text{m}^2$ (クーロン毎平方メートル)。センサーや発電デバイスの性能を直接決める重要な指標である。
- ※9 電気機械結合係数:機械的(電氣的)エネルギーをどれだけ効率よく電氣的(機械的)エネルギーに変換できるかを示す指標( $K^2$ )。値が大きいほど変換効率が高い。振動発電デバイスでは、 $K^2$ と機械的品質係数  $Q_m$  の積( $K^2Q_m$ )が総合性能を表す。

## <掲載誌情報>

【発表雑誌】 Microsystems & Nanoengineering (IF=9.9)

【論文名】 Enhanced Electromechanical Coupling in Piezoelectric MEMS Vibration Energy Harvesters via Strain-induced Phase Transition in Mn-doped Bismuth Ferrite Epitaxial Films

【著者】 Sengsavang Aphayvong, Meika Takagi, Kira Fujihara, Yohane Fujibayashi, Norifumi Fujimura, Hidemasa Yamane, Shuichi Murakami, Takeshi Yoshimura

【掲載 URL】 <https://doi.org/10.1038/s41378-026-01177-5>

**【研究内容に関する問い合わせ先】**

大阪公立大学大学院工学研究科  
准教授 吉村 武(よしむら たけし)

TEL:072-254-9327

E-mail: [yoshimura@omu.ac.jp](mailto:yoshimura@omu.ac.jp)

**【報道に関する問い合わせ先】**

大阪公立大学 広報課

担当: 谷

TEL:06-6967-1834

E-mail: [koho-list@ml.omu.ac.jp](mailto:koho-list@ml.omu.ac.jp)

大阪産業技術研究所

法人経営本部 企画部

担当: 松永

TEL:0725-51-2511

E-mail: [matsunaga@orist.jp](mailto:matsunaga@orist.jp)

科学技術振興機構 広報課

TEL:03-5214-8404

E-mail: [jstkoho@jst.go.jp](mailto:jstkoho@jst.go.jp)

**【JST 事業に関する問い合わせ先】**

科学技術振興機構

国際部 先端国際共同研究推進室

荒川 敦史(あらかわ あつし)

TEL:03-6261-1994

E-mail: [aspire@jst.go.jp](mailto:aspire@jst.go.jp)