

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和3（2021）年度 中間評価用〕

令和元年度採択分  
令和3年3月31日現在

強誘電体の素励起コヒーレント状態を用いた物性評価方法  
の確立とデバイスへの展開

Establishment of evaluation methods for the physical properties of ferroelectrics using coherent state of the elementary excitation and the device applications

課題番号：19H05618

藤村 紀文（FUJIMURA Norifumi）大阪府立大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

「強誘電体/半導体界面に生じる負性容量効果を利用した超低消費電力駆動不揮発 FET」と「電気熱量効果を用いたモノリシック熱マネジメントデバイス」をデバイス動作程度の速度で物性を評価する方法として、強誘電体に存在する多彩な素励起を利用する新しい手法を提案する。その評価方法を確立し、デバイスデザインに向けた指導原理を構築する。

研究分野：強誘電体物性、強誘電体デバイス、ニューロモルフィックデバイス

キーワード：強誘電体、素励起、急峻スイッチトランジスタ、固体熱ダイオード

1. 研究開始当初の背景

強誘電体は、大きな誘電率を利用した超小型キャパシタや圧電性を利用したアクチュエータなど私たちの身の回りにおいて様々な形で利用されています。最近では、IoT 社会の中で利用されるセンサーやメモリ素子として、さらにエネルギーハーベスタとしての利用も検討されている。これらのデバイスは、その基礎理論として強誘電体相転移の現象論に支えられて発展してきた。一方で、強誘電体の電気分極が波動関数の幾何学的な位相に起因していることが明らかになって、理論的理解はこの25年で飛躍的に進展した。理論の進展に呼応するように実験的にも新しい物性が見いだされており、デバイス応用が期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、「超低電力で動作する急峻スイッチトランジスタ」と「電子部品を高効率に冷却する熱マネジメント素子」の2つの革新的デバイスの高速動作機構を解明し、そのデバイスデザインの指導原理を構築するために「素励起コヒーレント状態」を利用した評価方法を確立し、強誘電体の量子力学的位相界面科学の学理の構築を目指す。

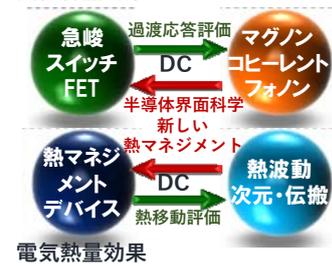
3. 研究の方法

強誘電体の素励起コヒーレント状態を用いた新規デバイスの動作原理とデバイスデザインを可能にする学理の構築を最終目的として、下記に示した図の様な体制で研究を推進する。

超低消費電力 IoT システムに貢献できる革新的デバイスであるにもかかわらず、その動作に関する物理描像が

明らかになっていない、「負性容量効果を用いた急峻スイッチ FET」と「電気熱量効果を用いた熱マネジメントデバイス」の二つの的を絞り、nsec オーダーの時間発展を基軸とするデバイス動作を「素励起コヒーレンス」を用いた評価を可能にするための学理を構築を目指す。5年の研究期間を考えて、フォノンとマグノンそして熱ソリトン（熱波動）にフォーカスして研究を推進する。急峻スイッチ FET においては、強誘電体に電界を印加することによって生じる nsec 以下の速度で進行する分極反転とそれに伴うフォノン変調や半導体表面ポテンシャル変化を「素励起コヒーレント状態」を利用して評価する方法を確立する。熱マネジメントデバイスに関しては、強誘電体内部において電気熱量効果によって生じる熱の運搬・吸熱・発熱に関するデータを素励起を用いた分極エントロピーのリアルタイム測定やシミュレーションを通して収集し、固体ヒートポンプのデバイスデザイン

負性容量効果



電気熱量効果

の指導原理を構築する。

#### 4. これまでの成果

強誘電体ゲート型トランジスタのゲート絶縁膜として期待されている  $\text{HfO}_2$  極薄膜をスパッタリング装置、パルスレーザーデポジション装置(PLD)、そして新規に導入した原子層成長 (ALD) 装置を用いて作成した。10nm 程度の極薄膜で強誘電性を示す試料の作製に成功した。PLD 法では、Si 基板直上に単結晶成長することとその形成機構を明らかにした。

高品質の  $(\text{Hf,Zr})\text{O}_2$  極薄膜(10nm)試料を用いて、負性容量 FET の機構解明に対して重要な情報であるにもかかわらず、これまでに評価できなかった「分極保持中の内部電荷」の正確な評価法に関して、「正圧電応答を用いた解析」という新規な手法を開発し、世界で初めて評価に成功した。 $\text{HfO}_2$  系極薄膜はウェークアップと呼ばれる繰り返しの電界印加による強誘電性自発分極の増加の効果が大きいことが知られているが、その効果の解析結果と合わせて、 $(\text{Hf,Zr})\text{O}_2$  薄膜では分極保持中に、非常に短い時定数で空間電荷が生成し強誘電分極を安定化させる機構が存在することを明らかにした。

コヒーレントフォノン/マグノンの評価は、100nm以上の膜において可能であった。時間遅延を作るためにシェイカーを用いた評価方法を開発し、より薄い膜での評価や弱励起での評価が可能になり、10nm厚の  $\text{HfO}_2$  系極薄膜を用いた評価の可能性が広がった。また、円偏光ラマン散乱分光を実施し、マグノンと光との間に角運動量の授受があることを見出した。国内外を問わず、カイラリティに関連する新しい物理現象が多く発見・予言されているが、この成果は、光のスピント物質のカイラルなフォノンやマグノンとの間で角運動量の授受があることを実験的に初めて明らかにした重要な成果である。

マルチフェロイック物質  $\text{BiFeO}_3$  (111)単結晶において、マグノンモードとフォノン・ポラリトンの励起とその空間伝播を観測した。詳細な時空間マップを3次元フーリエ変換することにより、周波数と波数の分散関係を得た。単結晶におけるマグノンとフォノン・ポラリトンの結合を、時間分解イメージングによって直接観測するものであり、これまでに例がない。

電気熱量効果に関して、強誘電体薄膜を用いても高周波駆動することによってヒートポンプとしての駆動が可能であることを計算機シミュレーションによって明らかにした。

#### 5. 今後の計画

電界を印加せずに評価する  $\text{HfO}_2$  系極薄膜の内部電荷移動の正確な評価方法

を新規に構築することができたので、空間電荷の時間変化などが生じない高品質  $\text{HfO}_2$  系強誘電体極薄膜を見分けることが容易になった。極薄膜試料を用いた素励起の評価を効果的に行うことができる高品質  $\text{HfO}_2$  系特に希土類添加物質の作製を精力的に進める。

強誘電性自発分極の分極反転ダイナミクスおよび双安定性のパルス電場に対する過渡応答を電氣的、誘電的に測定し、シミュレーションパラメーターとして利用する。

本研究で新規に見いだされた、円偏光ラマン散乱分光を用いた薄膜試料の評価を試みる。電界印加に対する動的な応答など新しい知見を得ることが期待できる。また、マルチフェロイック物質におけるマグノンとフォノン・ポラリトンの強結合状態のダイナミクスを直接観測する。薄膜試料において同様の測定を用い、フォノンとマグノンのダイナミクスを詳細に研究する。フォノン・ポラリトンシフト電流として試料外部に取り出せる方法も検討する。

強誘電体直下の半導体のポテンシャル変化の動的挙動とデバイス特性との相関を得ることが最終目的となる。

強誘電体内部において電気熱量効果によって得られた熱の運搬、吸熱、発熱に関する実験データを得ることによって熱ダイオードを固体素子で実現できる可能性を追求する。薄膜デバイス試料に対して、デバイス作動状態におけるその場ラマン分光を実施する。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- Fast acquisition of spin-wave dispersion by compressed sensing, T. Satoh et al.

Appl. Phys. Express, 14, 033004-1-5, 2021

- Efficient spin excitation via ultrafast damping-like torques in antiferromagnets

T. Satoh et al.

Nature Commun., 11, 6142-1-7, 2020

- Observation of terahertz magnon of Kaplan-Kittel exchange resonance in yttrium-iron garnet by Raman spectroscopy

A. Koreeda, and T. Satoh et al.

Phys. Rev. B, 102, 174432-1-7, 2020

- Selective imaging of the terahertz electric field of phonon-polariton in  $\text{LiNbO}_3$

T. Satoh et al.

Phys. Rev. B, 102, 094313-1-6, 2020

- Investigation of the electrocaloric effect in ferroelectric polymer film through direct measurement under alternating electric field

T. Yoshimura and N. Fujimura et al.

Appl. Phys. Express, 13, 41007, 2020

#### 7. ホームページ等

<http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/device7/>