

電気を使わないテラヘルツメモリ材料

大学院環境生命自然科学研究科 環境生命自然科学専攻・池田研究室

朴 規相, 矢野 優太, 松田里佳子, 于洪武

岡山大学では電子型強誘電体の研究を進めている。これは電子の濃淡配列だけで電気分極が形成される物質で、今实用(MLCC, 焦電センサー, 圧電素子)のコンデンサー材料のようなイオン変位がない新原理強誘電体である。特徴は、

- 電気分極が電子の濃度配列だけで形成されており、その状態を保持する。
- 今の強誘電体より1/1000のエネルギーで動作する。
- THz領域で動作し、またその機能は 400K (130°C) まで可能。

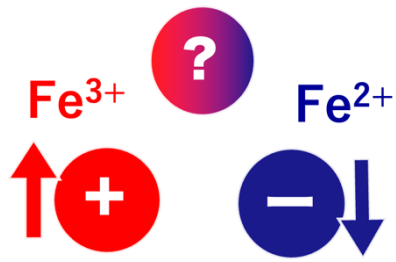
1000兆倍の
省エネメモリー

この物質を 2005 年に報告し(*Nature*, 436 (2005) 1136-1138)岡山大学が世界の研究の中心になっている。

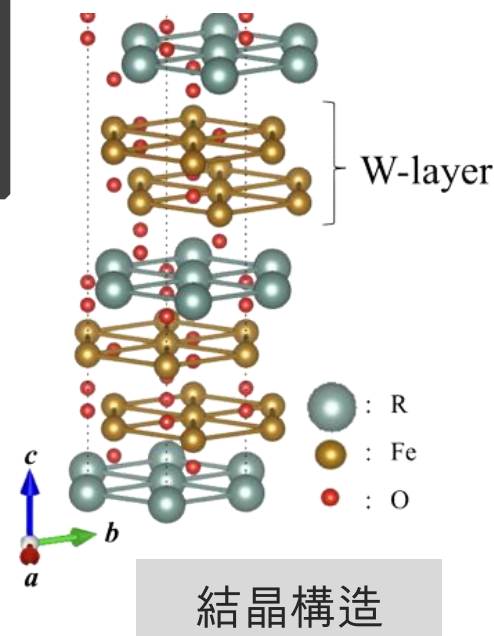
背景

電子型強誘電体の電子の配列は、電子間の相互作用の競合で発生する。高温超伝導体と同じく強相関電子材料として分類される。

この物質は1974年に日本で合成された。三角形の結晶構造を持つため、相互作用の競合“フラストレーション”が起こる。



三角格子のフラストレーション



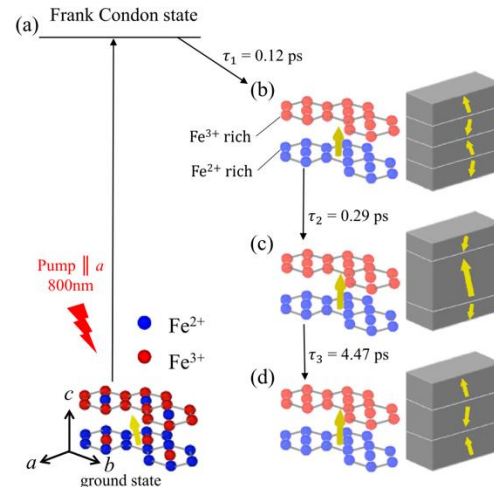
結晶構造

2017年ごろに精密な結晶合成に成功し、それ以来「THzでも電気分極が応答・動作すること」「可視光を当てると電気を発生すること」といった、電子強誘電体に固有な現象を次々と確認している。

超高速時間分解観測から、0.1 psecの時間領域でも、電気分極が安定に存在することがわかった。

THz電磁波発生も確認され、世界初の極高速動作強誘電体であることがわかった。(東北大学)

H. Yu, et al., *Phys. Rev. Materials* 8, (2024)064402



酸化鉄材料でもあり、Fe2+とFe3+の存在比や、イオン欠損の精密制御をした合成が必要だった。岡山大学グリーンフェライトの登録商標がある。

SHG measurement

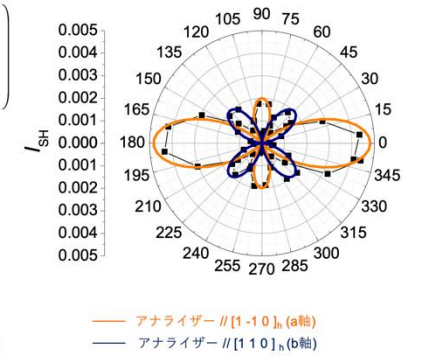
Non-centrosymmetric space group C2 or Cm

$$\begin{pmatrix} p_{21}^{(2)} \\ p_{31}^{(2)} \\ p_{32}^{(2)} \end{pmatrix} = d_0 \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & d_{25} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1^{(\omega)} \\ E_2^{(\omega)} \\ E_3^{(\omega)} \\ 2E_1^{(\omega)}E_2^{(\omega)} \\ 2E_1^{(\omega)}E_3^{(\omega)} \\ 2E_2^{(\omega)}E_3^{(\omega)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$$

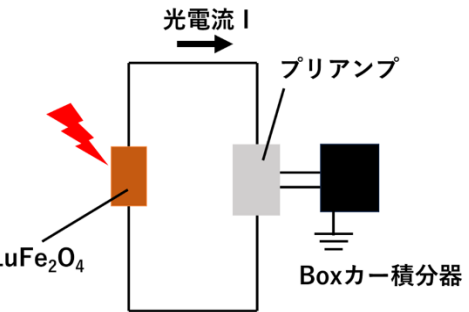
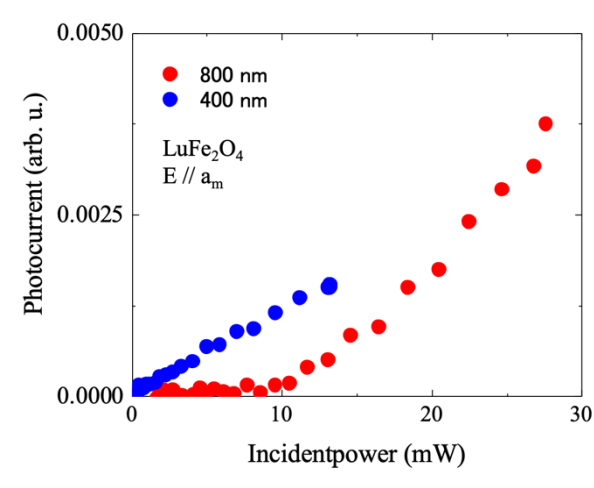
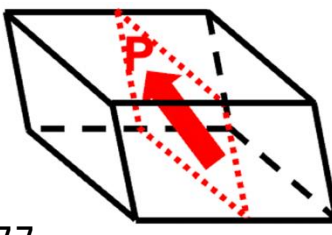
$$\begin{pmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$$

Point group is m -> Space group is Cm
d₁₁ : d₁₂ : d₂₆ = 1 : 0.63 : 0.65



レーザーを用いた第二次高調波観測から、400Kまで電気分極が安定に実在することが証明された。

K. Fujiwara, et al., *Sci. Rep.* 11 (2021) 4277. (東京工業大学)



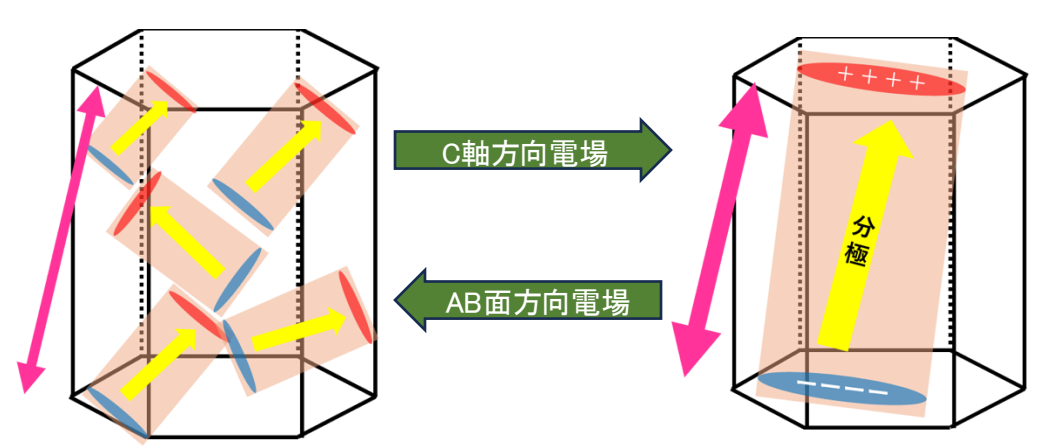
電子強誘電体に可視光を当てると、今までの強誘電体では考えられない極めて大きな電流が発生することがわかった。

日本物理学会2024 (東京工業大学)

研究目的

電子が整列した領域は、電気抵抗が高くその状態を保持している。だが電流が流れば、電気伝導領域が発生する。

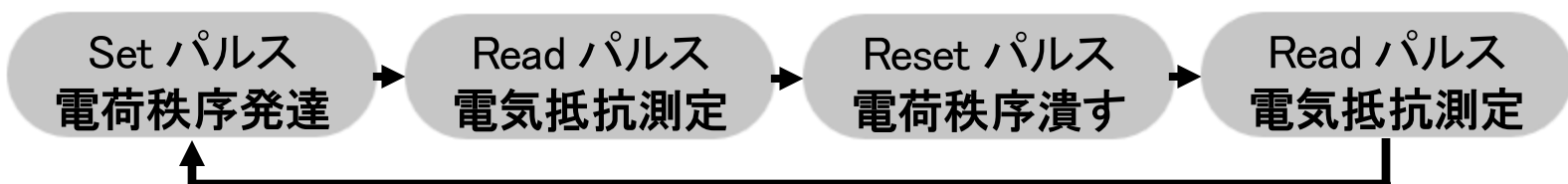
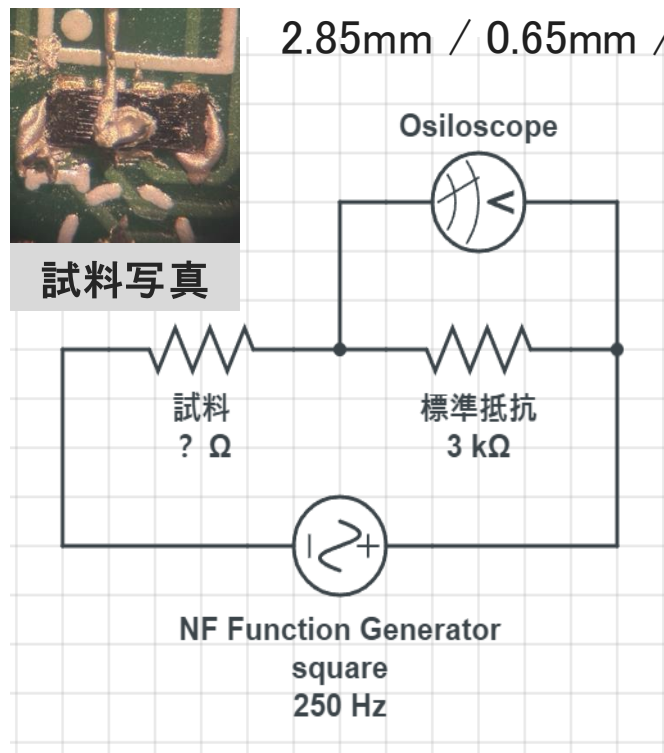
電流を流すことで電気分極を壊し低抵抗状態を実現したり、電場によって電気分極を成長させて高抵抗状態を実現・保持できれば、抵抗素子メモリーになるのではと考え試した。



電子配列だけで分極ができる
電場で配列が変わる

電子配列をほんのちょっとのエネルギーで制御するため、今より1000兆倍エネルギーを使わないメモリになることが確認された

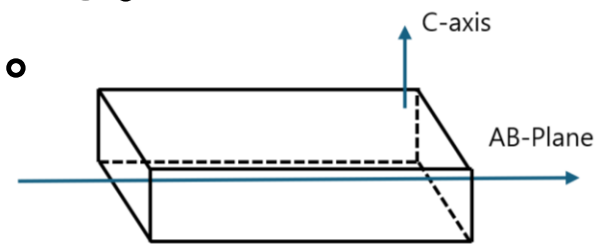
実験方法



Set動作 : 769 V/cm パルス電場で電荷整列させる。
Read動作 : 461 V/cm 低い電場で抵抗値を読む。
Reset動作 : 350 V/cm 電荷整列を壊す。

メモリーのモデル

電荷秩序を発達させる方向 (c-axis)、破壊する方向 (ab-Plane)
 パルス電場で分極が発達したり壊れ、電気抵抗が変化する。
 1msのパルス電場で電気抵抗変化を調べた。

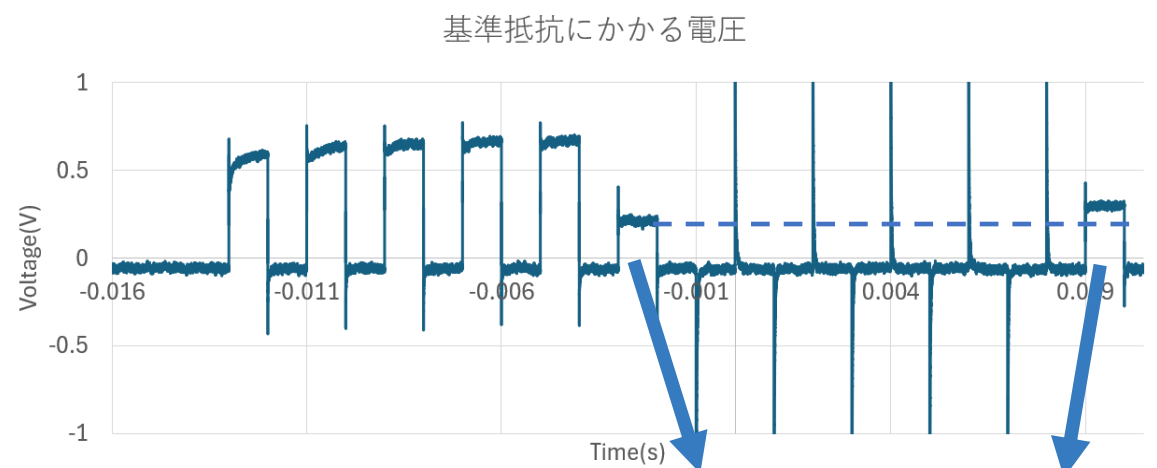


実験結果

Set パルス条件	Read パルス条件	Reset パルス条件
769 V/cm ・ 1 ms 5発	461 V/cm ・ 1 ms 1発	350 V/cm ・ 1 ms 5発

基準抵抗の電圧から、試料に掛かった電圧、電流密度を計算した。

パルスの電流密度, 試料を流れた電流 0.106mA
 → $1.066 \times 10^{-4} \text{ A} / (0.65 \text{ mm} \times 0.27 \text{ mm}) = 6.074 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$
 この動作をするためのエネルギー密度
 → $6.074 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2 \times 173.34 \text{ V/cm} = 10.53 \text{ W/cm}^3$
 1msec動作のエネルギー
 → 10.53 mJ/cm^3



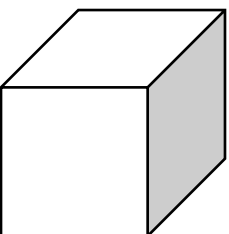
Set後試料抵抗・電圧	Reset後試料抵抗・電圧
39,607 Ω ・ 2.788 V	26,995 Ω ・ 2.699 V

100 nm x 100 nm x 100 nm (10^{-15} cm^3)の結晶を用いた場合、 1 cm^3 の結晶より15桁エネルギーが下がる。また1nsecで動作するなら、今msecなので、6桁エネルギーが下がる。**抵抗率x長さ/面積トータルで21桁下がる。**

→ $10.53 \text{ W/cm}^3 \times (100 \text{ nm})^3 \times 1 \text{ nsec}$

→ $1.05 \times 10^{-23} \text{ J} = 10.5 \text{ yJ}$ (ヨクト) で動作する。

つまり、極めて少ないエネルギーで高抵抗状態と底抵抗状態をスイッチすることができる。



結論

- c軸方向電場で電子が整列し**高抵抗状態**とさせ、またab面方向電場で電子配列をして、**低抵抗状態**とすることができた。
- 従来のメモリと比べ、動作エネルギーが1000動作エネルギーが1000兆倍少ないことを確認できた。

1GHz動作する場合、メモリースイッチのエネルギーは、**yJ** [y: 10^{-24}]オーダーになる。従来のメモリは**nJ** [n: 10^{-9}]。しかもTHzで動作する。**PN接合がない (トランジスタがない、順方向電圧降下がない)** ため素子が小さければそのまま小さい電圧で動作する。1umの結晶はmVで動作する。**電子でrRAM動作**を実現している。100nmの単結晶薄膜合成も成功しており、リソグラフィ加工を実施中。
電子強誘電体を用いて電子型 r-RAM を実現した。

表1. 32 Mバイト LLCのメモリパラメータ (32 nm, 75 °C)
 Comparison of memory parameters of 32 Mbyte LLCs (32 nm, 75°C)

	SRAM (6T) ⁽²⁾	eDRAM (3T) ^{(2),(1)}	STT-MRAM (1T1MTJ) ^{(2),(2)}	ap-STT-MRAM (2T2MTJ) ^{(1),(2)}
読出し遅延時間 (ns)	4.45	4.29	3.06	4.09
書込み遅延時間 (ns)	4.45	4.29	25.45	2.09
読出しエネルギー (nJ)	2.10	1.74	0.94	1.12
書込みエネルギー (nJ)	2.21	1.79	20.25	2.22
リフレッシュ電力 (mW)	-	600.41	-	-
面積 (mm ²)	80.41	37.38	16.39	40.19

東芝レビュー vol.70, No10(2015)より

順方向電圧降下が無い1000兆倍の省エネメモリ材料を初めて確認した



OKAYAMA UNIVERSITY