

一般セッション(口頭講演) | 6 薄膜・表面：6.1 強誘電体薄膜

■ 2025年9月9日(火) 13:30 ~ 17:15 | 会場N201 (共通講義棟北)

[9p-N201-1~14] 6.1 強誘電体薄膜

山田 智明(名大)、江原 祥隆(防衛大学校)

13:30 ~ 13:45

[9p-N201-1] チタン石型 $\text{Ca}(\text{Ti,Zr})\text{SiO}_5$ 薄膜の作製と評価

○倉橋 哲史¹、梶原 輝¹、楊 威嶸¹、谷口 博基²、桑野 太郎¹、小林 能直¹、安井 伸太郎¹ (1.Science Tokyo、2.名大)

◆ 奨励賞エントリー

13:45 ~ 14:00

[9p-N201-2] SnS/SnSe 人工超格子の創製と分極状態の評価

○(M1C)望月 順平¹、奥村 匡紀¹、小笠原 圭彦²、横田 紘子²、近藤 真矢¹、山田 智明^{1,3} (1.名大工、2.科学大、3.科学大MDX)

◆ 奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[9p-N201-3] 強誘電体薄膜における非反転分極の起源

○宇佐美 潤¹、岡本 有貴¹、井上 悠¹、小林 健¹、山田 浩之¹ (1.産総研)

14:15 ~ 14:30

[9p-N201-4] 単結晶 LiTaO_3 の焦電ヒステリシスカーブの非対称効果

○宇佐美 潤¹、平永 良臣²、山田 浩之¹ (1.産総研、2.東北大)

14:30 ~ 14:45

[9p-N201-5] ナノ電極C-V測定による強誘電特性評価

○平永 良臣¹、長 康雄² (1.東北大通研、2.東北大未来科学)

14:45 ~ 15:00

[9p-N201-6] 自発分極方位と抗電界の関係についての幾何学的考察とEKAIモデル

○酒井 滋樹^{1,2}、高橋 光恵¹ (1.産総研、2.九工大)

◆ 奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[9p-N201-7] (111)エピタキシャル $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ 薄膜の電圧パルス印加による屈折率のメモリスティブな変化の検証

○(M1C)高橋 夏輝¹、村井 俊哉²、高 磊²、近藤 真矢¹、山田 智明¹ (1.名大工、2.産総研)

◆ 奨励賞エントリー

15:15 ~ 15:30

[9p-N201-8] $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ 薄膜の強弾性ドメインを用いた電気光学メモリスタ動作の検証

○Hao He¹、近藤 真矢¹、Yuan Xueyou¹、山田 智明¹ (1.名大工)

◆ 奨励賞エントリー

15:30 ~ 15:45

[9p-N201-9] ストレインエンジニアリングによる c 軸配向 BaTiO_3 薄膜の電気光学効果の向上

○(M1)澤木 陽向¹、近藤 真矢¹、山田 智明^{1,2} (1.名大工、2.科学大MDX)

◆ 奨励賞エントリー

16:00 ~ 16:15

[9p-N201-10] 高品質HSQマスク法 $\text{BiFe}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_3$ ナノドットのドメイン構造評価

○(M2)中山 創¹、吉川 浩太¹、Lee Koomok¹、角嶋 邦之²、星井 拓也²、金子 智³、安井 学³、黒内 正仁³、北條 元⁴、重松 圭^{1,3}、東 正樹^{1,3} (1.東京科学大総合研究院、2.東京科学大工学院、3.神奈川産技総研、4.九大総理工)

◆奨励賞エントリー

16:15 ~ 16:30

[9p-N201-11] リング電極を用いた $\text{BiFe}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_3$ 薄膜のトポロジカルドメイン制御

○前田 慶¹、Lee Koomok¹、松浦 伊吹¹、中山 創¹、重松 圭^{1,2}、東 正樹^{1,2} (1.科学大フロンティア材料研、2.神奈川県立産業技術総合研究所)

16:30 ~ 16:45

[9p-N201-12] 非鉛圧電薄膜を用いた磁界応答型MEMS振動子による無線給電 II

○藤原 輝羅¹、Sengsavang Aphayvong¹、高城 明佳¹、村上 修一²、山根 秀勝²、山本 世翔³、木内 万里夫³、藤村 紀文¹、吉村 武¹ (1.阪公大工、2.大阪技術研、3.住友精密工業株式会社)

16:45 ~ 17:00

[9p-N201-13] $(\text{K},\text{Na})\text{NbO}_3$ スパッタエピタキシャル薄膜の直流バイアスによる k_t^2 値の向上

○(M2)張 創昇^{1,2}、内田 拓希^{1,2}、島野 耀康^{1,2}、柳谷 隆彦^{1,2} (1.早大先進理工、2.材研)

17:00 ~ 17:15

[9p-N201-14] 強誘電体プローブメモリにおける瓦書き

○長 康雄¹、平永 良臣² (1.東北大未来科学、2.東北大通研)

チタン石型 $\text{Ca}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{SiO}_5$ 薄膜の作製と評価Growth and Characterization of Titanite-type $\text{Ca}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_5$ Thin FilmsScience Tokyo¹, 名大²○(M2)倉橋 哲史¹, (M2)梶原 輝¹, (D)Yang Weirong¹, 桑野 太郎¹, 谷口 博基², 小林 能直¹, 安井伸太郎¹Science Tokyo.¹, Nagoya Univ.²○S. Kurahashi¹, H. Kajihara¹, W. Yang¹, T. Kuwano¹, H. Taniguchi², Y. Kobayashi¹, S. Yasui¹E-mail: kurahashi.s.1533@m.isct.ac.jp

【はじめに】反強誘電体は特異なヒステリシス曲線からエネルギー貯蔵セラミックコンデンサ材料として注目されている。しかし、反強誘電性を示す材料は PbZrO_3 等が知られているがあまり選択肢は多くない。近年、チタン石(CaTiSiO_5)型材料は鉛を含まない反強誘電体材料であり、様々な元素を置換した例が報告されている^[1-2]。 CaTiSiO_5 は、 TiO_6 八面体が a 軸方向に連結した鎖状構造を取り、各 Ti サイトの変位が反強誘電性の起源となっている。しかし、これまで CaTiSiO_5 系はバルクでの誘電特性のみ報告されており、薄膜での作製例は非常に少ない。昨年、我々のグループはチタン石の薄膜化に成功した。そこで、本研究では Zr 置換 CaTiSiO_5 薄膜を作製し、その誘電特性の変化について議論する。

【実験方法】PLD 法により (111)Pt/ $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 基板上に $\text{CaTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{SiO}_5$ 薄膜($x = 0, 0.5, 0.1, 0.2$)を作製した。炭酸カルシウム(CaCO_3)、酸化チタン(TiO_2)、酸化ジルコニウム(ZrO_2)、酸化シリコン(SiO_2)の粉末を用いて固相法によりターゲットを作製した。結晶相を X 線回折装置(XRD, Bruker D2 Phaser)により同定した。膜厚および膜組成は走査型電子顕微鏡+エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置(SEM-EDX, JEOL JCM-7000)を用いて測定した。誘電率と誘電損失はインピーダンスアナライザ(Agilent, 4194A)を用いて 0.1 V_{pp} の交流測定電圧発振で 100 Hz から 10 MHz まで測定した。また、強誘電特性測定装置(東陽テクニカ, FCE Fast)を用いて室温にて 50 kHz におけるヒステリシス測定を行った。

【結果と考察】Figure 1(a)に作製した薄膜の XRD を示す。チタン石 $011, 033$ のピークは Zr 置換量の増加に従って低角側にシフトしていることが確認され、これはイオン半径の増大に起因する。また、Figure 1(b)は作製した薄膜の誘電率の周波数依存性を示すが、 $x = 0.05$ において ϵ_r は 100 程度に増加し、誘電損失は $\tan \delta < 0.05$ と低い誘電損失を示した。これらの結果は、既存研究でバルクで作製した CaTiSiO_5 の ϵ_r と比較しても 2 倍以上の値となった^[2]。当日は強誘電性を含めた物性について報告する予定である。

【参考文献】[1] T. Uohashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **124**, 182901, (2024) [2] J. Kimura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **108**, 062902, (2016).

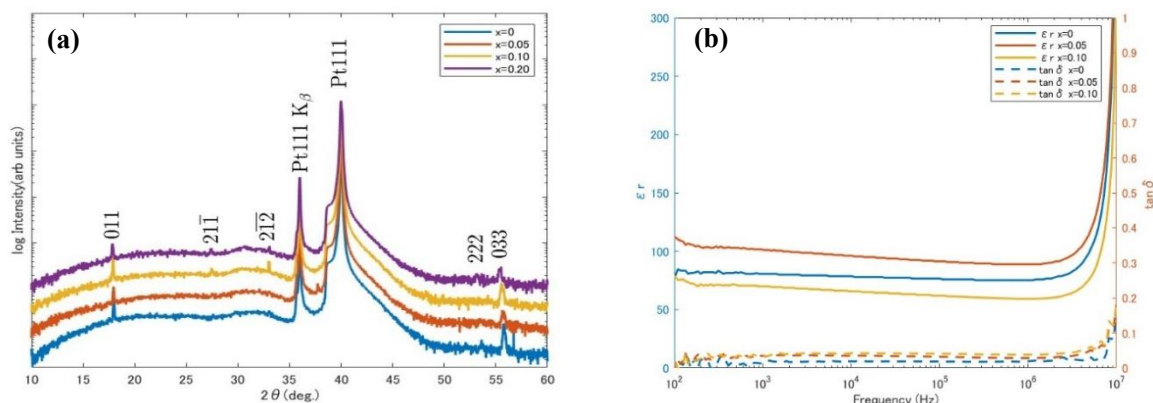


Figure 1 (a)X-ray diffraction θ - 2θ patterns ($2\theta = 10 - 60^\circ$) measured at room temperature for different $\text{Ca}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{SiO}_5$ films. (b)Frequency dependence of relative dielectric constant(ϵ_r) and dielectric loss($\tan \delta$) measured at 10^2 - 10^7 Hz for $\text{Ca}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{SiO}_5$ films.

SnS/SnSe人工超格子の創製と分極状態の評価

Fabrication of SnS/SnSe artificial superlattices and their characterization of polarization state

名大工¹, 科学大², 科学大MDX³ ○(M1)望月 順平¹, 奥村 匡紀¹,

(M2)小笠原 圭彦², 横田 紘子², 近藤 真矢¹, 山田 智明^{1,3}

Nagoya Univ.¹, Science Tokyo², Science Tokyo MDX³, ○Jumpei Mochizuki¹, Masaki Okumura¹,

Yoshihiko Ogasawara², Hiroko Yokota², Shinya Kondo¹, Tomoaki Yamada^{1,3}

E-mail: yamada.tomoaki.h5@f.mail.nagoya-u.ac.jp

1. 緒言

SnSは、層数が少数または奇数のときには強い面内強誘電性が現れる^[1]ことが知られているが、極薄い面内強誘電性材料は電荷量を必要とするデバイスへの応用が困難である。この問題の解決に向け、極薄SnSに発現する強誘電特性を維持したまま膜厚を増加させるために、異なる双極子モーメントの大きさを有するSnSとSnSeを交互に積層した人工超格子を創製するという新たなアプローチを考えた。

SnSとSnSeは同じ構造をもつがその双極子モーメントの大きさは異なるため、数層のSnSとSnSeを交互に積層することで分極の打ち消し合いが起こらなければ、全体として分極が発現する(Fig. 1)。これが実現すれば、将来的な半導体デバイスの高機能化に繋がる可能性がある。したがって、本研究では、SnS/SnSe人工超格子を創製し、その分極状態を評価することを目的とした。

2. 実験方法

成膜はパルスレーザー堆積(PLD)法により行った。PLDのターゲットは放電プラズマ焼結法により作製した。作製した試料の表面形状の観察には原子間力顕微鏡(AFM)を用い、結晶構造の評価には、反射高速電子線回折(RHEED)、ならびにX線回折(XRD)の $2\theta/\omega$ スキャン測定およびロックングカーブ測定を用いた。また、試料の中心対称性の有無の評価には第二高調波発生(SHG)分光法を用いた。さらに、構造最適化計算にはVienna Ab initio Simulation Packageを用いた。

3. 結果および考察

MgO(100), NaCl(100), SrF₂(100)の3つの基板上にSnSを成膜して表面形状を比較し、SnS/SnSe人工超格子の成膜に用いる基板を選定した。その結果、SrF₂(100)上に堆積した試料で最も平滑なエピタキシャル成長が観察されたためこれを選択し、その上に[(SnS)_n/(SnSe)_n]_m ($n = 0.2, 1, 2, 3, 4, 5$)を成膜した。作製した[(SnS)_n/(SnSe)_n]_mは、いずれもエピタキシャル成長し、界面および表面が平滑な超格子が作製されたことが分かった(Fig. 2)。また、SnS/SnSe人工超格子に加えて、SrF₂(100)基板、同基板上のSnSおよびSnSe単層膜をSHG分光法で評価した結果、作製したすべての人工超格子において、SrF₂(100)基板やSnS、SnSe単層膜と比較して大きなSHG強度が得られた(Fig. 3)。これは作製した人工超格子が非中心対称性をもつことを示しており、これらの試料が強誘電性を示す可能性があることが明らかになった。

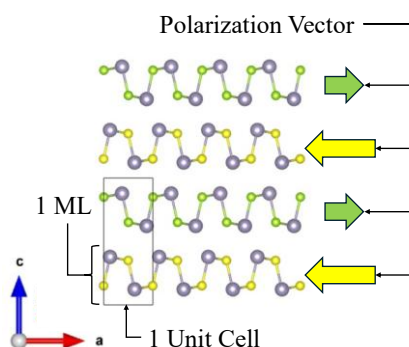


Fig. 1. Schematic diagram of SnS/SnSe artificial superlattice. The gray, yellow, and green atoms represent Sn, S, and Se, respectively. The c-axis is parallel to the out-of-plane direction.

4. 参考文献

[1] A. I. Lebedev, *J. Appl. Phys.* **124**, 164302 (2018).

5. 謝辞

本研究はJST-ASPIRE(JPMJAP2312)の支援を受けて実施されました。

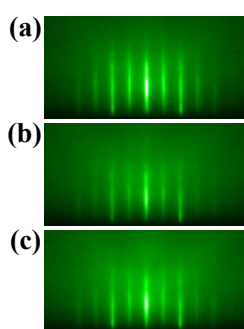


Fig. 2. RHEED patterns of artificial superlattices of [(SnS)_n/(SnSe)_n]_m with (a) $n = 1$, (b) $n = 2$, and (c) $n = 3$.

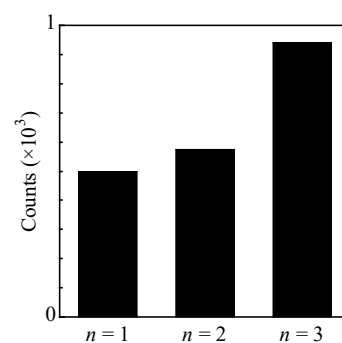


Fig. 3. SHG intensity of artificial superlattices of [(SnS)_n/(SnSe)_n]_m ($n = 1, 2, \text{ and } 3$).

強誘電体薄膜における非反転分極の起源

Origin of Non-switchable Polarization in Ferroelectric Thin Films

産総研 ○宇佐美 潤, 岡本 有貴, 井上 悠, 小林 健, 山田 浩之

AIST, ○Jun Usami, Yuki Okamoto, Hisashi Inoue, Takeshi Kobayashi, Hiroyuki Yamada

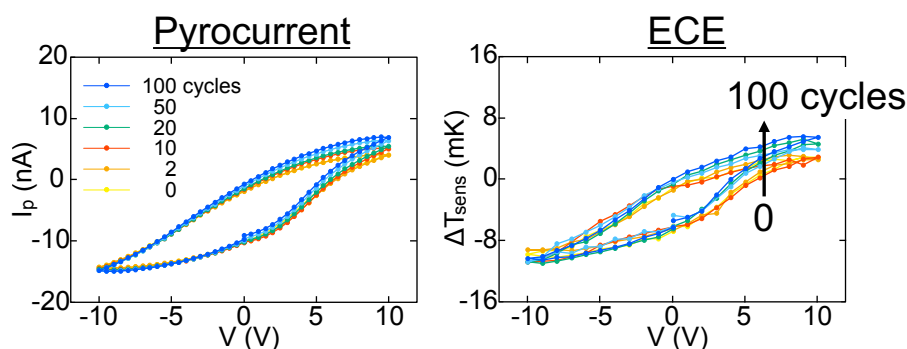
E-mail: j-usami@aist.go.jp

強誘電体薄膜では焦電効果や電気熱量効果（ECE）を利用した赤外線センサ、エネルギーハーベストや冷却といった応用が期待されている。我々は以前、DC ポーリング後の焦電流ヒステリシス測定により、ポーリング電場と分極方向が並行の場合に PEE 特性が大幅に増強されることを報告した[1]。この増強メカニズムとして、強誘電体の分極反転時に反転が生じない、「非反転な分極」の寄与が考えられる。こうした非反転分極はヒステリシスカーブの分極軸に沿ったシフトとして現れ、従来の P-V ループ測定では分極軸方向のシフトを正確に評価できず、起源が未解明であった。

本研究では、局所加熱・温度計測法による焦電流および ECE の直接ヒステリシス測定を $1\mu\text{m}$ 厚 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.48}\text{Ti}_{0.52})\text{O}_3$ 薄膜に適用し、電圧軸・応答軸の非対称シフトを観測した（図）。DC オフセットで電圧軸シフトを補正しても焦電軸のオフセットが残存したことから、この非対称性は内部バイアス起因ではなく非反転分極の寄与によることを確認した。また、バイポーラ三角パルス印加により反転可能成分は増大し、非反転成分は減少したことから、ドメインの欠陥ピン止めがパルスによって解除されることを実証した。さらに、パルス後のエージングでは上下両方向への再ピンニングが進行し、スイッチング成分が減衰する一方で非スイッチング成分がほとんど変化しないことを確認した。電圧軸シフト量が非反転／反転分極の比とよく相関する結果が得られ、比反転分極により間接きに電圧軸シフトが発生することが示された。インプリント現象を論じる際に、内部バイアスと非反転分極を慎重に区別すべきことが示唆される。以上の知見は、非反転分極を制御することで焦電・ECE 特性を最適化する材料設計・デバイス開発への道を開くものと期待される。

参考文献

[1] J. Usami et al., Appl. Phys. Lett. 126, 092902 (2025).



図：PZT 試料で bipolar パルス印加数を変えながら測定した、焦電流 (I_p , 左)、電気熱量効果による温度変化 (ΔT_{sens} , 右) のヒステリシスカーブ。

単結晶 LiTaO_3 の焦電ヒステリシスカーブの非対称効果

Asymmetric Effect on Pyroelectric Hysteresis Curve of LiTaO_3 Single Crystal

産総研¹, 東北大² °宇佐美 潤¹, 平永 良臣², 山田 浩之¹

AIST¹, Tohoku University², °Jun Usami¹, Yoshiomi Hiranaga², Hiroyuki Yamada¹

E-mail: j-usami@aist.go.jp

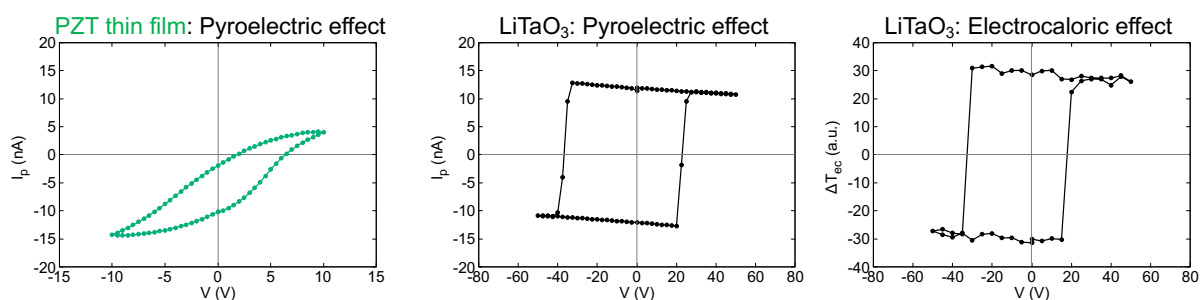
強誘電体が示す焦電効果や電気熱量効果は、センサや冷却技術への応用が期待され、特性向上に向けた研究が活発に取り組まれている。これまで我々は、多結晶の $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ (PZT) 薄膜に面直方向の DC ポーリングを施すことで、ポーリング方向と平行な焦電応答が反平行方向に比べて顕著に増強されることを確認し[1]、その起源が欠陥などによるドメイン壁ピンニングによって、反転が抑制された分極の存在にあることを明らかにした。しかし、その他の材料、特に上下方向で対称な単結晶試料における同様な非対称効果については明らかになっていない。

本研究で我々は、約 $1\ \mu\text{m}$ 厚の LiTaO_3 単結晶試料を用い、焦電および電気熱量効果の電圧依存ヒステリシスカーブを測定し、分極上下方向の対称性を評価した。 LiTaO_3 では、Li 欠損に起因する欠陥双極子が内部バイアスを生成し、分極-電圧 (P - V) ヒステリシスカーブに電圧軸シフトをもたらすと提案されている [2]。変位電流の積分値を算出する P - V 測定では、分極の絶対値が直接得られないのに対し、焦電や電気熱量効果の直接測定では、試料のインプリントにおける電圧軸、分極軸方向の非対称性を明確に切り分けることができる。得られた焦電・電気熱量効果のヒステリシスを図に示す。PZT 薄膜では、電圧、焦電流軸の両軸で非対称性が観測されるが、 LiTaO_3 単結晶試料では、焦電効果および電気熱量効果で明確な電圧軸方向のシフトを示すものの、分極軸方向の強度は上下方向でほぼ対称であった。この結果は、PZT 薄膜におけるドメインピンニング由来の非反転分極寄与とは異なり、 LiTaO_3 では欠陥双極子が内部バイアスを生じさせるのみで、抗電界においてほとんど全ての分極が反転していることを示唆する。

参考文献

[1] J. Usami *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 126, 092902 (2025).

[2] S. Kim *et al.*, *J. Appl. Phys.* 90, 2949 (2001).



図： $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ (PZT) 薄膜の焦電効果（左）、単結晶 LiTaO_3 の焦電効果（中央）および電気熱量効果（右）のヒステリシスカーブ。

ナノ電極 C-V 測定による強誘電特性評価

Ferroelectric Characterization through C-V Measurements with Nanoelectrodes

¹東北大通研, ²東北大未来科学 ○平永 良臣¹, 長 康雄²

¹Tohoku Univ. RIEC, ²Tohoku Univ. NICHe ○Yoshiomi Hiranaga¹, Yasuo Cho²

E-mail: hiranaga@riec.tohoku.ac.jp

【はじめに】

走査型非線形誘電率顕微鏡 (SNDM) による局所 C-V 測定は、ナノスケールにおける強誘電体のドメインダイナミクスを明らかにする上で有効な手法である。^[1,2] これまでに、HfO₂系強誘電体薄膜などにおける分極反転特性の面内ばらつきを高精細に可視化することに成功してきた。一方で、プローブ電極を用いた局所 C-V 測定では、不均一な電界分布下での測定となるため、得られたパラメータがマクロ電極による通常の電気的特性評価の測定値とどのように対応するのかは、必ずしも十分に検証されていない。本研究では、ナノスケールの上部電極を備えた強誘電体キャパシタを用いて、電極ジオメトリの違いが C-V 特性に及ぼす影響を系統的に調査した。さらに、局所 C-V 測定とマクロスケールでの P-E 測定との対応関係について検討を行った。

【実験方法】

化学機械研磨およびイオンビームミリングによって厚さ 68 nm まで薄板化した LiTaO₃ 単結晶に対し、電子線リソグラフィによって直径 100~900 nm の Pt 電極アレイを形成し、ナノキャパシタ構造を作製した。電極アレイの表面形状を Fig. 1 に示す。これらの電極に対して SNDM の導電性プローブを接触させ、C-V カーブを測定した。

【実験結果】

Fig. 2 に、直径 119 nm, 321 nm, 412 nm の電極における代表的な C-V カーブを示す。いずれの場合も、強誘電体に特有のバタフライ型の C-V 特性が観測され、その大きさは電極サイズに依存していた。C-V 曲線に囲まれる面積 S_a を抽出し、電極面積 A に対してプロットしたところ、両者は良好な比例関係を示した。さらに、 S_a/A の値は、既報の強誘電体材料における可逆分極変化のオーダーと一致しており、 S_a が分極反転に伴う電荷変化を反映している可能性が示唆された。一方、正負方向電圧掃引時のピーク位置 V_f , V_r は電極サイズに依存せず、ほぼ一定であった。これらを強誘電体層厚 d で除した値 V_f/d , V_r/d は、マクロ P-E 測定で得られた抗電界の値とおおむね一致した。

以上より、局所 C-V 測定は、マクロスケール測定で得られる特性値と整合性を示しつつ、ナノスケールにおける分極反転挙動の詳細な評価に有効であることが確認された。

【謝辞】本研究の一部は科学研究費補助金 (JP24K01338) の助成のもとに行われた。

[1] Y. Hiranaga et al., J. Appl. Phys. **128**, 244105 (2020).

[2] Y. Hiranaga et al., ACS Appl. Nano Mater. **7**, 8525 (2024).

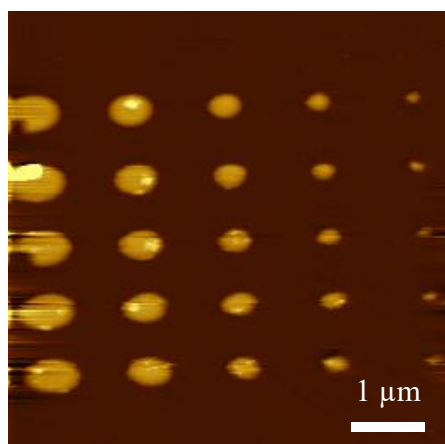


Fig. 1 Topography image of nanoelectrode array formed on LiTaO₃ single crystal.

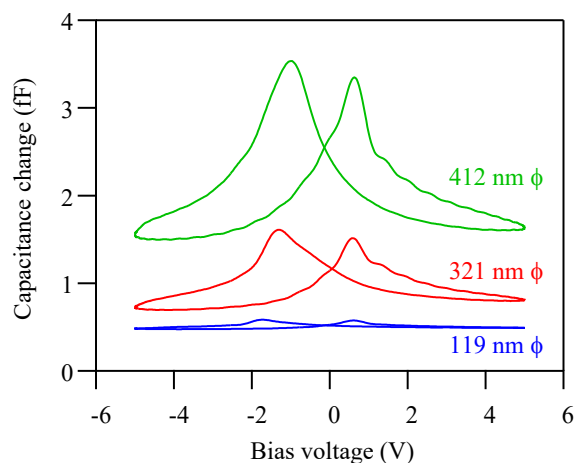


Fig. 2 Representative C-V curves acquired with LiTaO₃ nano-capacitors.

自発分極方位と抗電界の関係についての幾何学的考察と EKAI モデル

Geometric consideration and EKAI model regarding relationship between P_s -direction and E_c

産総研¹, 九工大² °酒井 滋樹^{1,2}, 高橋 光恵¹

AIST¹, Kyutech², °Shigeki Sakai^{1,2}, Mitsue Takahashi¹

E-mail: shigeki.sakai@aist.go.jp

1. はじめに 金属/強誘電体/金属 (MFM) キャパシタは Q - E_z ヒステリシス曲線を描く。ここで、 Q は金属に誘起される電荷、 E_z は印加電界である。 z は xyz 座標の z 方向成分を表す。平行平板 MFM の薄膜法線方向が z 軸に平行とする。 $Q=0$ における E_z 値である E_c が抗電界である。 E_c 近傍の E_z の僅かな増加で Q すなわち電気分極が急激に増加するので、 E_c は分極反転のスイッチ電界 E_{swz} と見なすこともできよう。筆者が提案している EKAI (Extended Kolmogorov-Avrami-Ishibashi, EKAI) モデル[1]は、電界の自由な変動に応じた電気分極の応答を計算するので、計算した Q - E_z 特性から E_c と E_{swz} が得られる。結晶粒の分極の方向と薄膜法線の角度 θ は重要なパラメータである[1,2]。

本稿では、まず、簡単な幾何学的考察から E_c と E_{swz} の角度 θ 依存性を導く。次にその結果を EKAI モデルによるシミュレーションの結果と比較し、幾何学的考察の妥当性を調べる。

2. 幾何学的考察によるスイッチ電界と抗電界

印加電界 E_z は自発分極 P_s に平行な成分 $E_z \cos \theta$ と垂直成分に分解されるが、単純な第 1 次近似としては分極反転には $E_z \cos \theta$ だけが効くとしてよいだろう (図 1)。スイッチに必要な自発分極方向の電界は角度に依らず固有と考えてよく、スイッチを実現させる z 方向の電界 E_{swz} は θ の関数として、

$$E_{swz}(\theta) = E_{swz}(0)/\cos \theta \quad (1)$$

となる。すなわち E_{swz} に関しては常に $1/\cos \theta$ 則が成り立つ。

強誘電体薄膜中では、強誘電体スイッチ成分 P_{fswz} と常誘電応答の成分によって電気変位 D_z は次式で表わせる。

$$D_z = \epsilon_0 \epsilon_{fdi} E_z + P_{fswz} \quad (2)$$

平行平板 MFM キャパシタでは $D_z=Q$ である。 Q - E_z と P_{fswz} - E_z のカーブは図 2 (a)(b) のようになるだろう。図 2 (a) は角度 θ が小さいケース ($\theta=\theta_1$)、図 2 (b) は大きいケース ($\theta=\theta_2$) である。 $E_z=0$ の分極 (残留分極 P_r) は $P_s \cos \theta$ である。

図 2 (a) では、明らかにスイッチ電界と抗電界が一致する。すなわち、

$$E_c(\theta) = E_{swz}(\theta) = E_c(0)/\cos \theta \quad (3)$$

であり、 E_c は $1/\cos \theta$ 則にのる。図 2 (b) では、常誘

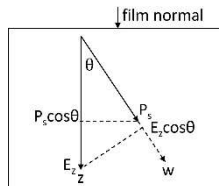
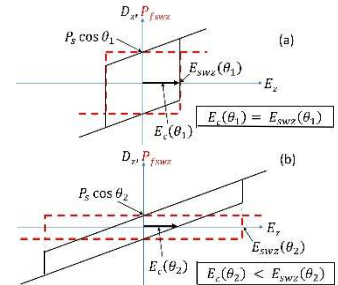


図 1 自発分極の方位と薄膜法線の関係の定義

図 2 幾何学的考察のための D_z - E_z (実線) 及び P_{fswz} - E_z (破線) 曲線。
(a) $\theta_1 < \theta_{cr}$ の場合
(b) $\theta_2 > \theta_{cr}$ の場合



電成分の寄与が大きく、 D_z - E カーブにある E_{swz} は図の第 1 象限に入ってしまう。 E_c は、直線 $D_z = \epsilon_0 \epsilon_{fdi} E_z - P_s \cos \theta$ と $D_z=0$ の交点であり、スイッチ電界より小さく、

$$E_c(\theta) = (P_s / \epsilon_0 \epsilon_{fdi}) \cos \theta \quad (4)$$

となる。図 2 (b) の領域では、抗電界は $\cos \theta$ 則に従う。ただし特性は材料の定数 P_s と常誘電率に関わる。ケース 1 と 2 の境界の角度 θ_{cr} は次式となる。

$$\theta_{cr} = \arccos(\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_{fdi} E_c(0) / P_s}) \quad (5)$$

3. EKAI モデルシミュレーションと比較

7 種類の θ に対して計算した。すでに発表している強誘電体 $\text{Ca}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Bi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (CSBT) のパラメータ[1]を用いた。図 3 (a) が Q - E_z のヒステリシス曲線であり、 E_c 値を図から読み取って図 3 (b) に丸印 (●) としてプロットした。角度の小さい側は式(3)の $1/\cos \theta$ 曲線上にあり、角度の大きい側は、式(4)の $\cos \theta$ 曲線上にある。

4. 結言

幾何学的考察で得たスイッチ電界

と抗電界の表式の妥当性を EKAI モデルによる計算で確認した。

公表されている強誘電体エピタキシャル膜でできた MFM の Q - E_z 実験結果との比較は大変有意義であろう。本研究の一部は、産総研と九工大の共同研究「強誘電体ゲートトランジスタの脳型ハードウェアへの適用研究」の中で行われた。

[1] S. Sakai and M. Takahashi, *Materials* 2024, **17**, 1077.

[2] S. Sakai and M. Takahashi, 72nd JSAP Spring Meeting 15p-K503-2.

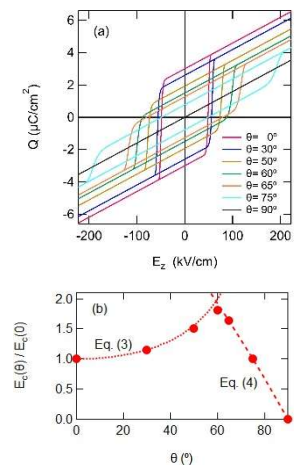


図 3 (a) EKAI モデルによる結果、(b) 幾何学的考察とモデル計算結果の比較

(111)エピタキシャル Pb(Zr_{0.65}Ti_{0.35})O₃ 薄膜の 電圧パルス印加による屈折率のメモリスティブな変化の検証

Memristive change in refractive index of

(111)-oriented epitaxial Pb(Zr_{0.65}Ti_{0.35})O₃ thin film by application of pulse voltage

名大工¹, 産総研², ○^(M1)高橋 夏輝¹, 村井 俊哉², 高 磊², 近藤 真矢¹, 山田 智明¹

Nagoya Univ.¹, AIST², ○^(M1)Natsuki Takahashi¹, Toshiya Murai², Rai Kou², Shinya Kondo¹, Tomoaki Yamada¹

E-mail: yamada.tomoaki.h5@f.mail.nagoya-u.ac.jp

1. 緒言

近年の AI 技術の発展に伴い、情報処理にかかる電力消費量が今後 5 年の間に約 2 倍に増えると言われている^[1]。そのため、高性能な計算能力を持ちながら電力消費を抑えた、記憶素子と演算機が一体となったインメモリコンピューティング(IMC)と呼ばれるハードウェア構成の実現が期待されている。IMC を実現する一つの例として、情報処理の不揮発性を利用したメモリスタと呼ばれるデバイスが提案されている。本研究では、究極の省エネルギーが期待される光信号による情報読み出しを可能とする光メモリスタの開発を目的とする。

菱面体晶の強誘電体 Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ (PZT)は、先行研究で電場印加による段階的な分極値の変化が示され、これは非 180 度強弾性ドメイン間のスイッチングによると議論されている^[2]。屈折率はドメイン (すなわち分極の方向) に依存するため、このような非 180 度ドメイン構造を利用することで、電場による屈折率の段階的な制御が可能であると予想した。そこで本研究では、菱面体晶の PZT 薄膜を(111)配向の基板上に成膜し、電場印加に対する屈折率の不揮発的な制御を試みた。

2. 実験手法

(LaAlO₃)_{0.3}(SrAl_{0.5}Ta_{0.5}O₃)_{0.7} (111)基板上にパルスレーザー堆積法により PZT(x=0.65)薄膜を成膜し、薄膜上に電子ビーム蒸着法により Pt 共面電極を作製した。PZT 薄膜の構造評価には、X 線回折及び、反射高速電子線回折を用いた。作製した試料に電場を印加した際の分極値の変化の評価には強誘電体テスタ、屈折率の変化の評価には光干渉計を用いた。

3. 結果及び考察

Fig1_(a)に試料に印加した電圧プロファイルを示す。大電界による初期化と、小電界の複数回印加による変調の後、ダブルパルス測定により分極値を測定した。Fig.1_(b)に電圧パルスの大きさと印加回数を変化させながら分極値の変化量を測定した結果を示す。電圧パルスを大きくするにつれて分極値の変化量が大きくなること、印加回数を多くするにつれて分極値の変化量が徐々に大きくなるのが分かり、電圧印加でドメインおよび屈折率を制御できる可能性が示唆された。Fig1_(c)に電圧パルスの印加回数を変化させながら屈折率変化を測定した結果を示す。分極値の測定と同様に、電圧パルスの印加回数を多くするにつれて、屈折率が徐々に大きくなるのが分かった。またこの屈折率の変化量から計算される光メモリスタのデバイス長は、既存の光変調器と比較して一桁ほど小さく、PZT 薄膜の光メモリスタへの利用可能性が示唆された。

4. 謝辞

本研究は JST-CREST(JPMJCR24R3)の支援を受けて実施されました。

5. 参考文献

[1] Nicola Jones, *Nature*, **561**, 163-166 (2018).

[2] S. Kondo, K. Okamoto, O. Sakata, T. Teranishi, A. Kishimoto, T. Nagasaki, and T. Yamada, *Appl. Phys. Lett.* **126**, 012901 (2025).

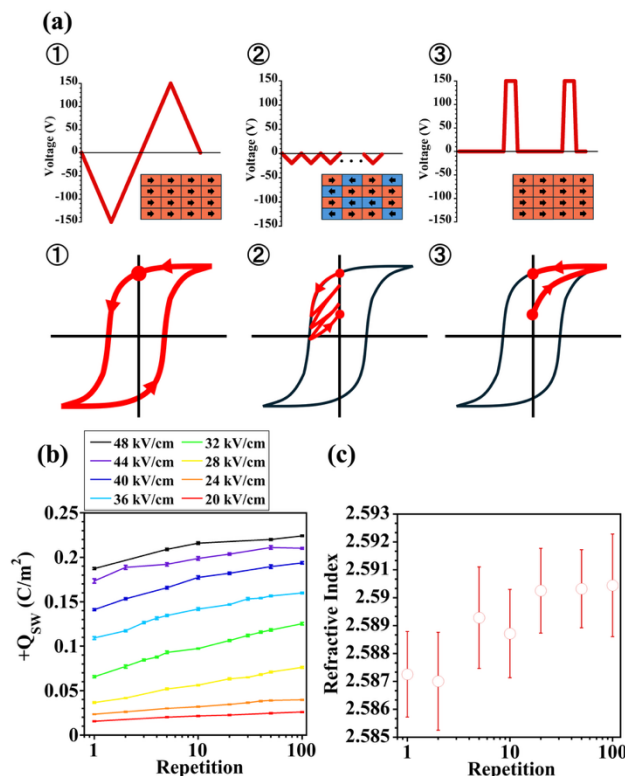


Fig.1 Memristive property change of PZT thin film by varying the number of times and magnitude of an applied electric field. (a) Voltage application profile, (b) Memristive change in polarization value, (c) Memristive change in refractive index

Pb(Zr_{0.65}Ti_{0.35})O₃ 薄膜の強弾性ドメインを用いた電気光学メモrista動作の検証

Electro-optic memristive response mediated by ferroelastic domain in Pb(Zr_{0.65}Ti_{0.35})O₃ thin films

名大工¹, ○(M2)Hao He¹, 近藤 真矢¹, Yuan Xueyou¹ 山田 智明¹

Nagoya Univ.¹, ○(M2) Hao He¹, Shinya Kondo¹, Xueyou Yuan¹, Tomoaki Yamada¹

E-mail: yamada.tomoaki.h5@f.mail.nagoya-u.ac.jp

背景と目的

近年、光メモristaは高速かつ省エネルギーな次世代情報処理デバイスとして大きな注目を集めている。特に、強誘電体薄膜に電場を印加することで屈折率を不揮発的に制御できれば、従来の電子メモリに比べて多値記録や低消費電力動作といった優れた特性が期待でき、脳型コンピューティングなどへの応用が期待されている^[1]。これまでの研究で菱面体晶組成の Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ (PZT) の強弾性ドメインの分率は外部電場によって大きく変化し、電気光学 (EO) 係数に大きな影響を及ぼすことが分かっており、光メモristaへの応用に適している可能性がある^[2]。ここで、光メモrista動作としては屈折率そのものを電場で変調する方法と小振幅の AC 電場を印加しながら EO 係数 (電場印加による屈折率の変化量) を変調する方法が考えられるが、本研究では後者の現象に着目した。応用に向けては、PZT 薄膜内のマルチドメイン構造を精密に制御し、DC 電場印加による EO 係数の多段階変化と、その状態の不揮発保持を実現する必要がある。そこで本研究では、菱面体晶組成の(111)/(11 $\bar{1}$)配向の PZT 薄膜を作製し、DC 電場に対するドメイン構造の変化と EO メモrista特性の関係を明らかにすることを目的とする

実験方法

パルスレーザー堆積法を用いて成膜温度 650 °C、酸素分圧 200 mTorr の条件で SrRuO₃ (SRO)/SrTiO₃ (STO)(111)基板上に PZT($x = 0.65$)薄膜を作製した。下部電極は膜厚 20 nm の SRO、上部電極には膜厚 10 nm の Pt を用いて Pt/PZT/SRO のキャパシター構造を構築した。薄膜の構造は、X 線回折 (XRD) を用いて評価し、反射高速電子線回折を用いて薄膜の表面状態やエピタキシーを評価した。薄膜の電気特性の評価は、LCR メーター及び強誘電体テスタを用いた。EO 係数の評価には、研究室内に構築した顕微電界変調型エリプソメトリーを用いた。

結果及び考察

図 1 に示す XRD 測定の結果から、作製した PZT($x = 0.65$)薄膜は(111)/(11 $\bar{1}$)配向し、菱面体晶を有することが分かった。また、 P - E 測定では明瞭なヒステリシスループが得られた (図 2)。図 3 に示すように、EO 変調強度の DC 電界依存性を評価した結果、DC 電界に対して変調強度は一定ではなく、抗電界付近で最大となる変化を示すことが明らかとなった。この結果は、小振幅電界による(111), (11 $\bar{1}$)ドメイン間のスイッチング量が、印加した DC 電場の大きさによって変化したことを示唆している。これまでの類似の試料の電気特性評価から、印加する DC 電場の大きさによってドメイン分率が変化することがわかっており、本研究で観測された EO 応答の変化と定性的に一致する。発表では、これらの EO 応答の不揮発性とメモrista特性についても説明する。

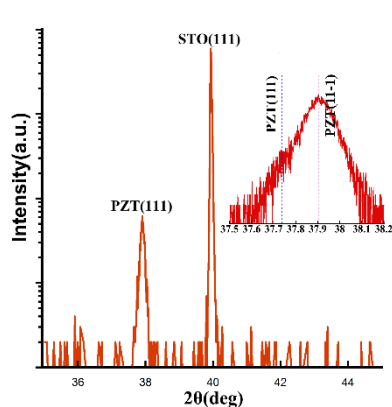


Fig. 1. XRD $2\theta/\omega$ scan of the PZT ($x = 0.65$) thin film around STO(111) peak

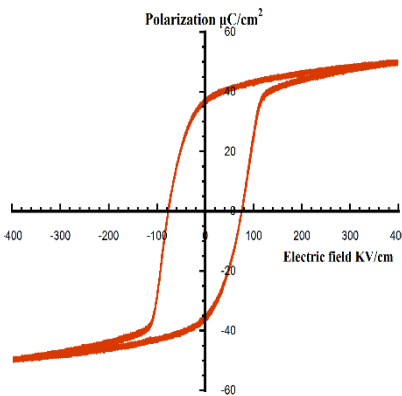


Fig. 2. P - E hysteresis loop of the PZT ($x = 0.65$) thin film deposited on SRO/STO(111)

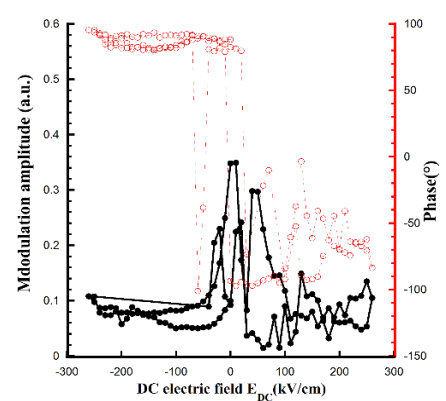


Fig.3. Changes in EO modulation intensity and phase under DC electric field for the PZT ($x = 0.65$) thin film on SRO/STO (111).

参考文献

- [1] J. Geler-Kremer *et al.*, *Nat. Photon.* **16**, 491 (2022).
- [2] S. Kondo *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **126**, 012901 (2025).

ストレインエンジニアリングによる c 軸配向 BaTiO₃ 薄膜の電気光学効果の向上

Enhancement of electro-optic response by strain engineering for c -axis oriented BaTiO₃ films

名大工¹, 科学大 MDX², ○(M1)澤木 陽向¹, 近藤 真矢¹, 山田 智明^{1,2}

Nagoya Univ.¹, Science Inst. MDX², ○(M1) Sawaki Hinata¹, Shinya Kondo¹, Tomoaki Yamada^{1,2}

E-mail: yamada.tomoaki.h5@f.mail.nagoya-u.ac.jp

背景と目的

情報通信分野の電力消費量の急速な増加の対策として従来の電子回路から光回路への転換が期待されている。光変調器は光回路の主要素子であり、電場で屈折率変化を生じる電気光学 (EO) 効果の利用が期待されている。光変調器の更なる省電力化、小型化のためには、より大きな EO 係数を有する材料を薄膜として用いる必要があり、従来の LiNbO₃ よりも 1 桁以上大きな EO 係数 r を有する BaTiO₃ (BTO) の薄膜化が注目されている。しかし、これまでの報告では分極方位が面内に 2 方向にある $a1/a2$ ドメイン構造 (Fig.1(a)) を有する BTO 薄膜が用いられており、電界印加方向に制約があることから、BTO の大きな r_{131} を活かすことが出来ていない。そこで、SrTiO₃ (STO) を用い歪み制御によって分極を面外方向に揃った c ドメイン構造 (Fig.1(b)) にすることで、 r_{131} を効率的に利用出来ると考えた。また、理論計算では歪みの大きさにより EO 係数が変化することが分かっている。そこで BTO の a 軸よりも小さな格子定数を持つ DyScO₃ や LSAT を用い歪みにより、EO 係数の最大化を目指した。

実験方法

パルスレーザ堆積法を用いて SrTiO₃(001), DyScO₃(110), LSAT(001)基板上に BTO 薄膜を作製した (成膜温度 750~800°C、酸素分圧 10 mTorr、膜厚 100 nm)。試料の構造評価には高速反射電子回折 (RHEED)、配向、歪み、結晶性の評価には X 線回折 (XRD) を使用した。試料上部に白金の共面電極 (厚み 40 nm) を成膜するために電子ビーム蒸着法を用いた。EO 係数を顕微電界変調型エリブソメトリーによって評価した。具体的には試料表面の電極間のギャップに集光し、交流電場の印加による光強度の変調を、検光子を回転させながら測定し、その大きさから EO 係数を求めた。

結果及び考察

RHEED 観察から BTO 薄膜はエピタキシャル成長し、XRD $2\theta/\omega$ スキャンから BTO 薄膜は c 軸配向していることが明らかとなった。また、STO 基板上の BTO 薄膜について逆格子空間マップ測定から求めた。BTO の面内格子定数と面外格子定数は、それぞれ 3.997 Å、4.038 Å であり、面内歪みは -0.19% であった。この試料に対して、共面電極間に電界を印加して光変調強度を測定した結果、オープンニコルとクロスニコルの中間となる検光子角度において変調強度 I_{AC} が最大値を示したことから、得られた応答は薄膜の EO 効果によるものであることが分かった。 c ドメイン薄膜の EO テンソル r_{131} の導出方法は報告されていないことから、今回新たに導出方法を検討した。その結果、本研究の c ドメイン試料の r_{131} は 245 pm/V と算出され、既報の $a1/a2$ ドメインの報告値 105 pm/V^[1] よりも高いことが分かった。また、他の基板上に作製した BTO 薄膜の EO 応答については当日報告する。

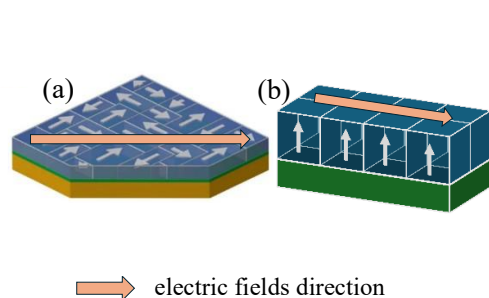


Fig.1 Relationship between domain structures and electric fields. (a) is a -domain and (c) is c -domain.

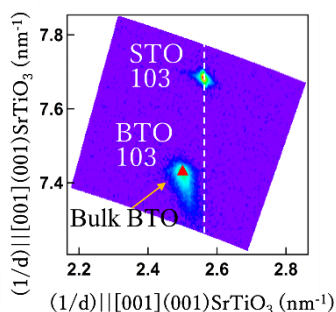


Fig.2 Reciprocal space mapping of the BTO films (103) BTO of (001) BTO/STO

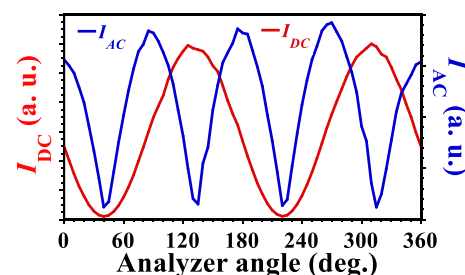


Fig.3 EO response for c -oriented BTO/STO. I_{DC} is laser intensity. I_{AC} is laser intensity's modulation under AC electric fields. Both show dependence on analyzer angle.

参考文献

[1] Abel, S., et al., Nat. Commun. 4, 1671 (2013).

高品質 HSQ マスク法 BiFe_{0.9}Co_{0.1}O₃ ナノドットのドメイン構造評価

Domain Structure Characterization of High-Quality BiFe_{0.9}Co_{0.1}O₃ Nanodot by HSQ Mask

東京科学大総合研究院¹, 東京科学大工学院², KISTEC³, 九大総理工⁴

○(M2)中山 創¹, 吉川 浩太¹, Lee Koomok¹, 角嶋 邦之^{1,2}, 星井 拓也^{1,2}, 金子 智³,

安井 学³, 黒内 正仁³, 北條 元⁴, 重松 圭^{1,3}, 東 正樹^{1,3}

IIR, Science Tokyo¹, School of Eng., Science Tokyo², KISTEC³, Kyushu Univ.⁴

○Hajime Nakayama¹, Kota Yoshikawa¹, Koomok Lee¹, Kuniyuki Kakushima^{1,2}, Takuya Hoshii^{1,2}, Satoru Kaneko³,
Manabu Yasui³, Masahito Kurouchi³, Hajime Hojo⁴, Kei Shigematsu^{1,3}, Masaki Azuma^{1,3}

E-mail: nakayama.h.2166@m.isct.ac.jp

【緒言】我々は次世代の低消費電力不揮発性メモリへの応用を目指し、室温で強誘電性・弱強磁性を併せ持つ BiFe_{0.9}Co_{0.1}O₃ (BFCO) を研究している。これまで、エピタキシャル薄膜[1,2]、あるいは陽極酸化ポーラスアルミナを利用して作製したナノドット[3,4]において、プローブ顕微鏡を用いた電場印加磁化反転を観測した。さらに、水素シルセスキオキサン (HSQ) を用いた電子線描画プロセスを開発し、より形状が均一な 1 辺 100–250 nm の BFCO ナノドットの合成および電場印加による分極・磁気ドメインの変化を報告した[5,6]。本発表では、ナノドットにおける詳細なドメイン構造解析と、ナノドットのさらなる高品質化のためのプロセスの改良について報告する。

【実験方法】前回の報告[6]と同様の手法で、Nb:SrTiO₃(100) 基板上に電子ビーム描画による HSQ マスクの作製を行い、マスク上に BFCO をパルスレーザー堆積法で蒸着した。表面観察には走査型電子顕微鏡 (SEM)・原子間力顕微鏡 (AFM)・圧電応答顕微鏡 (PFM)・磁気力顕微鏡 (MFM) を用いた。HSQ のリフトオフには水酸化ナトリウム水溶液を用いたウェットプロセスを適用した。画像解析ソフトにより面直・面内 PFM を統合した 3 次元 PFM (3D-PFM) 像を作成した。

【結果と考察】図 1 は、1 辺 250 nm の BFCO ナノドットの PFM ならびに MFM 像である。PFM 像の 3 次元化により、As-grown では渦巻き型などの非荷電トポロジカル分極ドメインが見られ、カンチレバーを介した電圧印加後は面直方向の分極反転と同時に、面内方向の Trailing field により、トポロジカルドメインが消失することを観測した。分極反転前後の MFM 像では、明瞭な磁気コントラスト変化が観測できた。

一方、単一ドメイン化を期待して作製した 1 辺 100 nm のナノドットでは、リフトオフプロセスによる試料のダメージの PFM・MFM 測定への影響が、250 nm のドットよりも顕著であった。そこで、HSQ マスクの厚みを小さくすることで、リフトオフをせずともナノドットの表面を捉えることを可能とした。図 2 はこの方法で得た BFCO ナノドットの AFM 像である。1 辺 100–150 nm の、表面平坦性の高いドットが観測され、PFM では強誘電ドメインの存在も観測された。より詳細な結果は当日報告する。この研究は住友化学次世代環境デバイス協働研究拠点で行われた。

【参考文献】[1] K. Shimizu *et al.*, *Nano Lett.* **19**, 1033 (2019). [2] T. Itoh *et al.*, *Adv. Mater.* 2025, 2419580. [3] K. Ozawa *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 20930 (2024). [4] K. Lee *et al.*, submitted. [5] 中山 他、第 71 回応物春季学術講演会、23a-12H-9. [6] 中山 他、第 85 回応物秋季学術講演会、17a-B3-7.

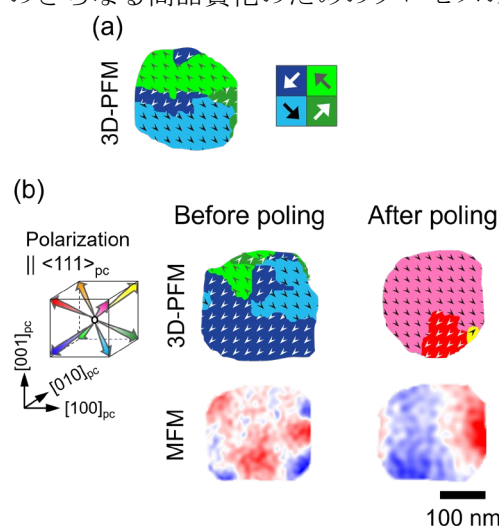


Fig. 1. (a) 3D-PFM image observing vortex-type of ferroelectric domain in as-grown BFCO nanodot. (b) ferroelectric and magnetic domain change via poling observed by 3D-PFM and MFM. The colors of 3D-PFM images are selected as shown in left schematic polarization.

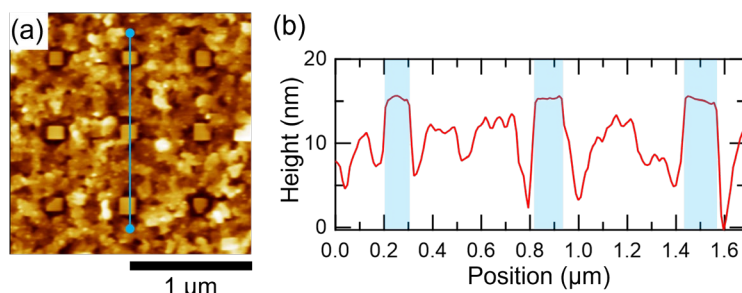


Fig. 2. (a) AFM image of the BFCO nanodots with the thinner HSQ mask. (b) height profile of the line in (a). The light blue zones indicate BFCO nanodots.

リング電極を用いた $\text{BiFe}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_3$ 薄膜のトポロジカルドメイン制御

Topological Domain Control in $\text{BiFe}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_3$ Thin Films Using a Ring Electrode

東京科学大学総合研究院¹, 神奈川県立産業技術総合研究所²

(D2)前田慶¹, Lee Koomok¹, 松浦伊吹¹, 中山創¹, 重松圭^{1,2}, 東正樹^{1,2}

IIR Science Tokyo¹, KISTEC²

(D2) K. Maeda¹, K. Lee¹, I. Matsuura¹, H. Nakayama¹, K. Shigematsu^{1,2}, M. Azuma^{1,2}

E-mail: maeda.k.al@m.titech.ac.jp

[序]: 近年、情報通信の大規模化に伴う消費電力増大への対策が世界的な課題となっている。その解決策として、強誘電性と弱強磁性を併せ持つマルチフェロイック材料 $\text{BiFe}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_3$ (BFCO) に、電場で磁化を制御可能な次世代不揮発性メモリ材料として注目している。本研究では、面内電場を利用するリング型電極構造を導入し、局所領域における分極・磁気ドメインの電場誘起による制御を目標としている。これまでに電場誘起磁化反転の初期的な実証に成功しているが^[1]、実験方法の改善により広範囲なドメイン観察や繰り返し電場印加による耐久性評価を進めており、本報告ではそれらの進展を踏まえた最近の成果を紹介する。

[実験]: GdScO_3 (110)基板上にパルスレーザー堆積法で合成したBFCO薄膜を用い、約10 nmの金属Au膜をスパッタによって堆積したのち、原子間力顕微鏡 (AFM) の探針を用いてリング型に削り取ったデバイス構造を作製した。前報^[1]で報告した手法を改良し、本研究では、測定時のノイズ低減および金電極との密着性向上を目的として、リング電極作成後に探針を用いて電極周囲の段差 (壁) を除去し、さらに周辺の金膜を軽く押し当てる操作を加えることで密着性の向上を図った。

評価方法については前報^[1]と同じく、構造評価にはX線回折測定(XRD)、表面分析には原子間力顕微鏡(AFM)、強誘電ドメイン観察には圧電応答顕微鏡(PFM)を用いた。分極反転は、リングの中心に位置させたカンチレバーを接地(GND)し、周囲のリング状電極との間に電圧を印加することで実施した(Fig.1)。

[結果]: 作製したBFCO薄膜にリング型電極構造を導入し、PFM測定を行った。まず、 $[100]_{\text{pc}}$ 方向のスキャンでは明瞭なストライプ状のドメイン構造が観察され、 $[010]_{\text{pc}}$ 方向のスキャンでは一様なコントラストが確認された (Fig.2)。この結果は、基板由来の斜方晶歪みにより $\langle 111 \rangle$ 方向のうち2方向の分極が選択的に安定化されていることを反映している。電場印加実験では、25-30Vの電圧条件下において明瞭な分極変化が確認され、さらにトポロジカルな特徴を持つ吸い込み型と湧き出し型のドメイン構造が観察された。また、同一領域に対して複数回の電場印加を行った結果、少なくとも16回まで吸い込み型と湧き出し型のドメイン構造が繰り返しスイッチングされた。これらの結果は、BFCO薄膜における分極ドメインの電圧制御と高い繰り返し耐性の両立を示しており、マルチフェロイックデバイスへの応用に向けた有効な設計指針を示すものである。なお、この研究は住友化学次世代環境デバイス協働研究拠点で行われた。

参考文献 [1]: 前田 慶 他, 第72回応用物理学会春季学術講演会, 15p-K503-12 (2025).

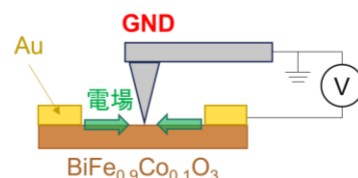


Fig. 1 Schematic of electric field application using a ring electrode. Voltage on the gold electrode generates a converging in-plane field.

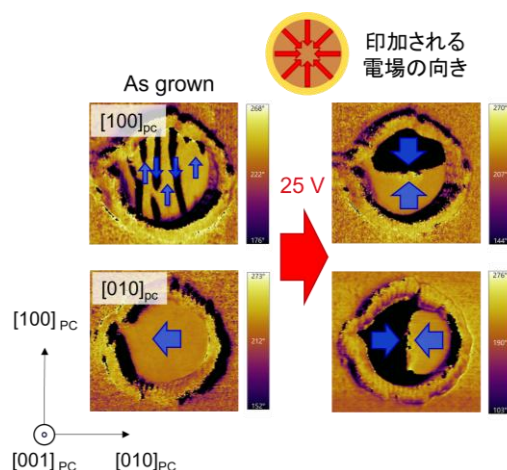


Fig. 2 PFM images of the $\text{BiFe}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_3$ thin film in the as-grown state and after applying an electric field of +25 V. The arrows indicate the polarization direction. These $[100]_{\text{pc}}$ and $[010]_{\text{pc}}$ directions are used to identify polarization orientations.

非鉛圧電薄膜を用いた磁界応答型 MEMS 振動子による無線給電 II

Wireless power transfer by magnetic field responsive

MEMS vibrators using lead-free piezoelectric films II

阪公大工¹, 大阪技術研², 住友精密工業³ ○藤原 輝羅¹, Sengsavang Aphayvong¹,

高城 明佳¹, 村上 修一², 山根 秀勝², 山本 世翔³, 木内 万里夫³, 藤村 紀文¹, 吉村 武¹

Osaka Metro. Univ.¹, ORIST², Sumitomo Precision Products Co., Ltd.³

○K. Fujihara¹, S. Aphayvong¹, M. Takagi¹, S. Murakami², H. Yamane², S. Yamamoto³, M. Kiuchi³,

N. Fujimura¹, T. Yoshimura¹

E-mail: yoshimura@omu.ac.jp

【はじめに】医療機器の高度化により、心臓ペースメーカーや人工内耳に代表される生体埋込型医療デバイスが患者の生活の質(QOL)を支える重要な技術として普及している[1]。これらの機器への無線給電技術について、我々はこれまで交番磁界と磁界応答型の圧電 MEMS 振動子を利用した無線電力伝送に取り組んでいる[2]。振動発電における理論式では非線形性を考慮していないことから、振動子の変位と応力の関係により非線形性が出現すると理論と実験とで差が生じる可能性がある。そこで本研究では異なる共振周波数を有する圧電振動子を作製し、無線給電性能の評価を行うことで、非線形挙動を解析し、振動子構造および送電部の設計の検討を行った。

【実験方法及び結果】Pt 下部電極をエピタキシャル成長させた(100)SOI ウェハ上に RF マグネトロンスパッタリング法を用いて $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ (BFMO) 薄膜を成長させた[3]。この薄膜に対して一般的な MEMS プロセスにより振動子を作製し、先端に $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ のネオジム磁石を接着することで、磁界応答型圧電 MEMS 振動子とした (Fig.1 (a))。加振実験から求めた共振周波数は 53.4 Hz 、 Q 値は約 130、電気機械結合係数(K^2)は 0.10% であると分かった。Fig. 1 (b)は無線給電に用いる送電部であり、磁石アレイを回転させることで交番磁界を発生させた。共振周波数付近で行った無線給電実験で得られた出力電圧波形を Fig. 1(c)に、その波形に対して高速フーリエ変換を行った結果を Fig. 1(d)に示す。この結果から、出力波形は倍波など含まれているものの、概ね基本波で構成されていることが分かる。また最適負荷である $220\text{ k}\Omega$ の抵抗を接続した際、伝送距離 50 mm で $0.41\text{ }\mu\text{W}$ の発電電力が得られた。講演では上記の内容に加えて伝送距離の依存性や共振波形に現れた非線形性について議論する。

【謝辞】本研究は、科研費・基盤 B(25K01290)の支援を受けて行われた。

【参考文献】[1] K. Fujihara et al., 72nd JSAP Spring Meeting, 15p-K503-14 (2025), [2] S. Yamamoto et al., IEEE transducers 2025, in press

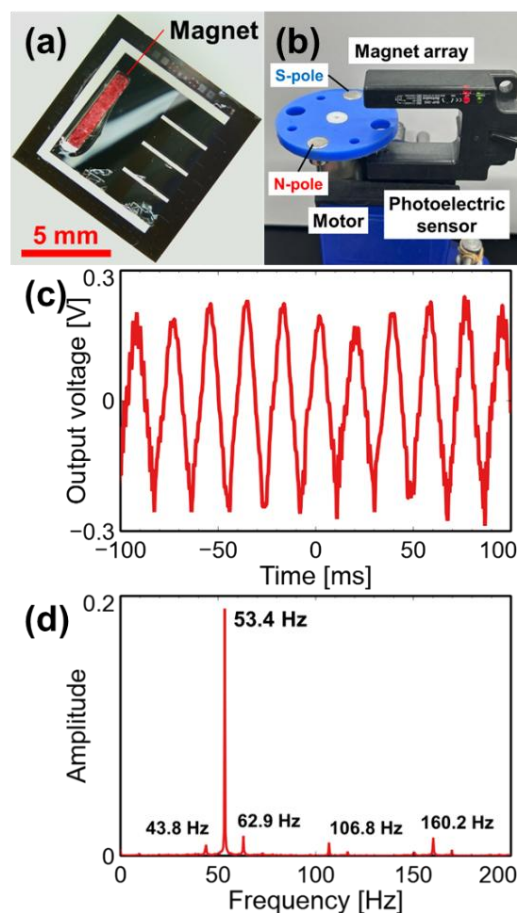


Fig. 1 (a) Piezoelectric MEMS resonator with magnet. (b) Transmitter. (c) Sinusoidal output at resonant frequency. (d) FFT of output waveform.

(K,Na)NbO₃ スパッタエピタキシャル薄膜の直流バイアスによる k_t^2 値の向上

Improvement of k_t^2 of (K,Na)NbO₃ epitaxial thin films by applying DC bias

早大先進理工¹, 材研² ○(M2) 張創昇^{1,2}, 内田拓希^{1,2}, 島野耀康^{1,2}, 柳谷隆彦^{1,2}

Waseda Univ.¹, ZAIKEN², °Chuangsheng Zhang^{1,2}, Hiroki Uchida^{1,2}, Yohkoh Shimano^{1,2}, Takahiko

Yanagitani^{1,2}

E-mail: fatestaymonrning@suou.waseda.jp, yanagitani@waseda.jp

1. まえがき

非鉛材料の(K,Na)NbO₃(KNN)は高い圧電定数($d_{31}^* = -138.2$ pm/V, $e_{31}^* = -14.4$ C/m²)を持つ[1]。しかし、KNN 薄膜にはドメイン壁が多量に存在する[2]ため、高周波領域において音響損失が著しく、BAW フィルタのような高周波デバイスへの応用は難しい。外部直流電圧によりドメイン壁の振動を抑制できれば、音響損失や k_t^2 の改善が期待される。そこで本研究では、基板付き K_{1-x}Na_xNbO₃ 薄膜共振子(KNN HBAR)を作製し、GHz 帯の k_t^2 について DC バイアス印加時の挙動を測定した。

2. 実験方法および結果

RF マグネトロンスパッタにより、(100) La-SrTiO₃ 導電性単結晶基板上に Na 濃度(35%、50%、65%、80%、100%)のターゲットを用いて、K_{1-x}Na_xNbO₃ 薄膜を加熱しながら作製した。(202)面φスキャンが四回対称を示すことから、K_{1-x}Na_xNbO₃ はそれぞれ、エピタキシャル成長したことが確認できた。

次に、上部電極として Au を蒸着し、Bias-T を用いて、DC バイアスを(1) 0 V から +V (最

大印加電圧) への印加、(2) +V から 0V への戻し、(3) 0V から -V (最小印加電圧) への印加、(4) -V から 0V への戻し、(5) 再度 0V から +V への印加。以上合計 5 過程で印加し、ネットワークアナライザを用いて、その時の変換損失を測定した。Mason の等価回路モデルを用いて得られた理論的な変換損失曲線と比較することで厚み縦モード k_t^2 を見積もった[3,4]。

Fig. 1(b)では、K_{0.20}Na_{0.80}NbO₃ 成膜後の状態(As-grown)で圧電性を示し、 k_t^2 の最大値は 12.9%であった。一方、Fig. 1(a)の NaNbO₃ はバイアス印加してはじめて圧電性を示し、 k_t^2 は最大 5.7%であった。Fig. 1(c)で K_{0.35}Na_{0.65}NbO₃ は最も高い k_t^2 (17.2%)を示した。ヒステリシス曲線の中心 (赤い破線) は、カリウム濃度の増加に伴って正の方向へシフトしていき、K = 35% の場合には負の側で最も大きな k_t^2 値が得られた。

参考文献

- [1] K. Shibata, et al., Jpn. J. Appl. Phys., **50**, 041503, (2011).
- [2] O. Condurache, et al., Appl. Phys. Lett., **122**, 202902, (2023).
- [3] N. F. Foster, et al., IEEE Trans. Sonics Ultrason., **15**, 28, (1968).
- [4] T. Yanagitani, et al., J. Appl. Phys., **102**, 024110, (2007).

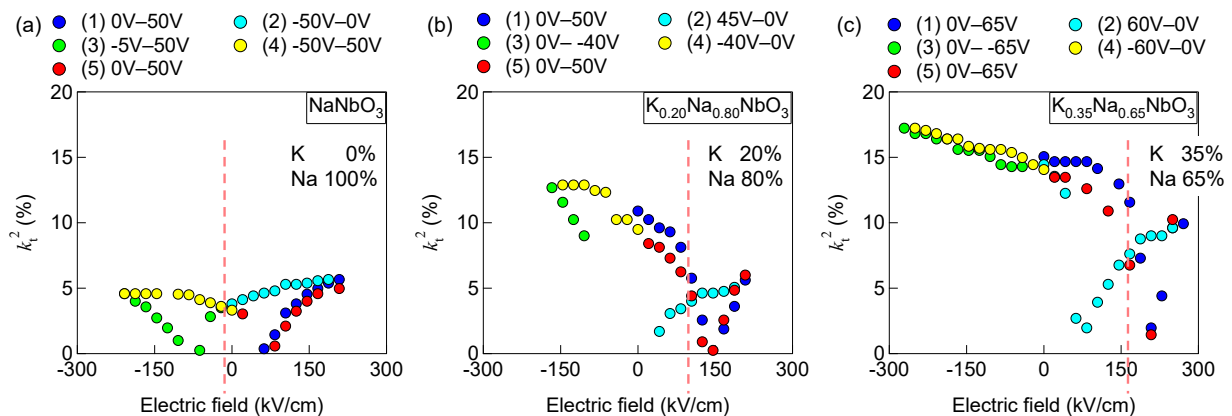


Fig. 1 k_t^2 variation under DC bias in KNN films: (a) NaNbO₃, (b) K_{0.20}Na_{0.80}NbO₃, (c) K_{0.35}Na_{0.65}NbO₃

強誘電体プローブメモリにおける瓦書き

First Trial of Shingled Dielectric Recording

東北大未来科学¹, 東北大通研² °長 康雄¹, 平永 良臣²Tohoku Univ. NICHe¹, Tohoku Univ. RIEC², °Yasuo Cho¹, Yoshiomi Hiranaga²

E-mail: yasuocho@riec.tohoku.ac.jp

我々は次世代の超高密度情報記録方式として走査型非線形誘電率顕微鏡 (SNDM) を用いた強誘電体記録を提案している (SNDM プローブメモリ). これまでに LiTaO_3 単結晶媒体を用いて極めて高い記録密度と高速での書き込み特性を確認してきた[1].更に従来問題であった再生速度向上に関する技術的課題も Heat Assisted Ferroelectric Reading(HAFerR)法を提案し解決しつつある[2].

磁気記録に比して元々誘電体記録は小さなビット形成が比較的容易であるが, 単一の小さな分極反転ドットの形成が比較的困難な磁気 HDD においてその記録密度を向上させる手法として瓦書き(Shingled recording)が用いられており, この手法を誘電体記録に応用するとより簡単により高密度な記録が可能になると考え, 今回その First Trial 的な実験を行った. 用いた記録媒体は一致溶融組成の LiTaO_3 単結晶である.

Fig.1 にシングルトラックで瓦書きを行った結果を, Fig.2 にトリプルトラックで同様に瓦書きを行った結果を一例として示す. 特にトリプルトラックの場合設定したピッチ幅に比して極小さなドット形成が確認され, 誘電体記録においても瓦書き手法は比較的容易に高密度化を達成するのに有効な手法であることが確認された.

参考文献

[1]Y.Cho, ELSEVIER, ISBN: 978-0-12-817246-9 (2020)

[2] 長,平永, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-A404-15 (2023))

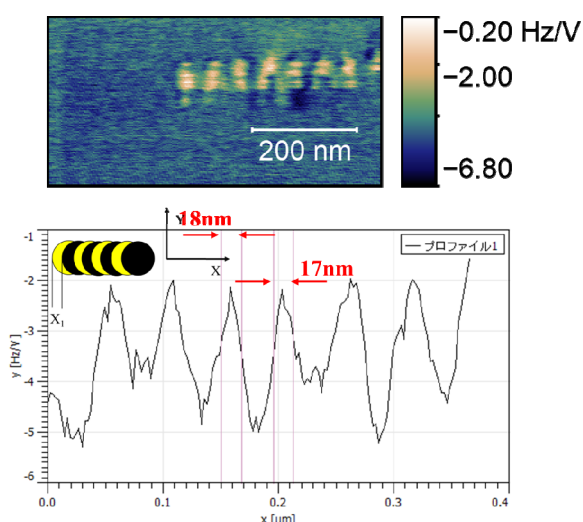


Fig.1 Single track shingled dielectric recording ($X_1=20\text{nm}$ pitch)

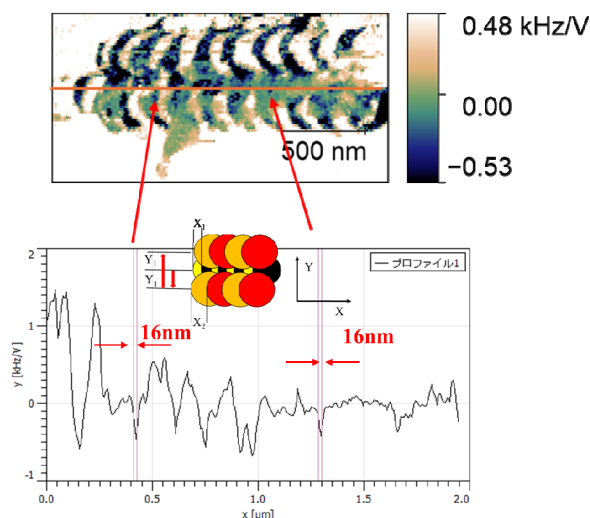


Fig.2 Triple track shingled dielectric recording ($X_1=100\text{nm}$ $X_2=200\text{nm}$ pitches)