

局所 C-V マッピングにおける主成分分析によるノイズ除去 Noise Reduction by Principal Component Analysis for Local C-V Mapping

東北大¹, 東工大² ○平永 良臣¹, 三村 和仙², 清水 荘雄², 舟窪 浩², 長 康雄¹

Tohoku Univ.¹, Tokyo Tech.², ○Yoshiomi Hiranaga¹, Takanori Mimura², Takao Shimizu²,

Hiroshi Funakubo², Yasuo Cho¹

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

【はじめに】近年我々は、強誘電体材料におけるナノスケール分極反転ダイナミクスを評価する新たなツールとして、局所 C-V マッピング法を提案している。^[1] 本手法はサンプルに分極反転を引き起こすような比較的大きな正弦波バイアスを印加し、その時に生ずる静電容量の変化を走査型非線形誘電率顕微鏡 (SNDM) のプローブにより検出するものである。サンプルが強誘電分極反転を伴う場合、観察される局所 C-V 曲線はマクロ測定に類似したバタフライ型の履歴曲線となり、これを解析することによって、ナノスケール分極反転に関する様々な情報を得ることが出来る。

SNDM プローブの高い容量検出感度は、自発分極量がある程度大きい ($\geq 10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) 測定対象に対しては、平均化処理無しでの C-V 曲線の観察までも可能とするが、自発分極値が小さい測定対象などにおいては、C-V 曲線の測定精度をさらに高めることは有益である。このような目的において、主成分分析 (PCA) を用いたノイズ除去が有効であることが知られている。^[2] そこで、本研究では局所 C-V マッピング法において得られた測定データに対し、PCA ノイズ除去を適用し、その測定精度をさらに高めることを試みた。

【実験方法】本測定における装置構成はおおむね通常の SNDM とほぼ同一だが、非常に高い次数までの高調波像の取得を可能とするためにロックインアンプの代わりにデジタイザを導入した。デジタイザで収録された応答信号の時間波形を後処理においてフーリエ級数展開 ($N=30$ 次の係数まで取得) することで、ロックイン検波と等価な処理を行った。測定サンプルとしては、ランダム配向 HfO_2 基強誘電体薄膜を選び、その $4\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ の範囲を 256×128 ピクセルの解像度で測定した。得られたデータセットに対し、主成分分析を行い、第 L 主成分 ($L < 2N$) までを用いて応答波形を復元することでノイズ除去を行った。

【実験結果】得られた 30 次までの高調波振幅像のうち一部の抜粋を Fig. 1 に示す。これらの像において、

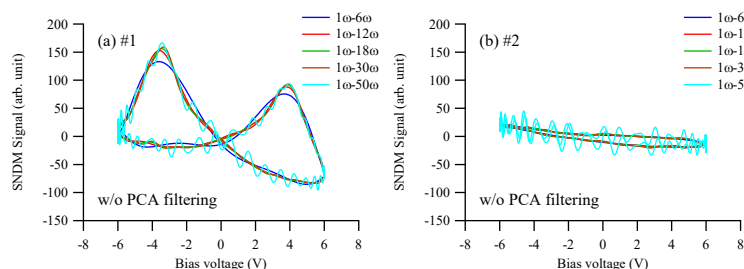


Fig. 2 Typical local C-V curves resynthesized from the obtained dataset shown in Fig. 1.

分極反転特性の面内分布に対応した不均一な分布が観察されている。SNDM の高い検出感度によって 30 次までの極めて高い次数の高調波像においても、S/N 比は高くないものの、有意なパターンが観察された。適切なノイズ除去を行うことが出来れば、このような高調波像も C-V 曲線再合成の高精度化に資することが出来る。

取得されたデータセットより、 256×128 の全ての画素に対して C-V 曲線の再合成が可能であるが、そのうちの一部を Fig. 2 に示す。第 2 高調波像の明暗部において、それぞれスイッチング領域/非スイッチング領域に特徴的な C-V 曲線が観察された。

得られたデータセットに対して、PCA を通じたノイズ除去を行った結果を Fig. 3 に示す。元データにおいて見られていたシステムノイズ由来の振動成分が、PCA フィルタの効果によって低減されたことが分かる。通常の周波数フィルタでは、このようなノイズの低減と、元の信号に含まれている急峻な変化を維持することはトレードオフの関係になるが、PCA フィルタの導入によって、これらを両立させることに對し一定の効果が確認された。

【謝辞】本研究の一部は科学研究費補助金 (16H06360, 18K04932) の補助を受けています。

- [1] Y. Hiranaga, T. Mimura, T. Shimizu, H. Funakubo, and Y. Cho, J. Appl. Phys. **128**, 244105 (2020).
- [2] S. Jesse and S. V Kalinin, Nanotechnology **20**, 85714 (2009).

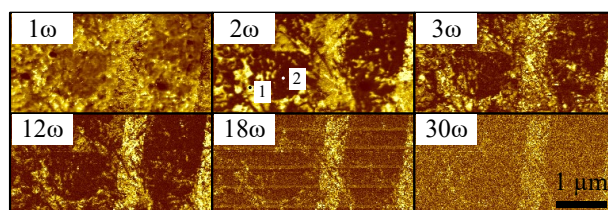


Fig. 1 Harmonic images observed with a randomly oriented HfO_2 -based ferroelectric thin film.

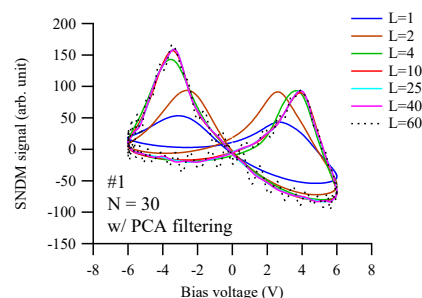


Fig. 3 Local C-V curve after PCA filtering.