

図 1c、1d に示すように、 1×10^0 サイクルから 1×10^6 サイクルでは、キャパシタが形成された像中央の正方形の領域では顕著な変化がないことがわかります。しかし、 4×10^6 サイクル後では、正方形の左上において、光電子強度が増加した領域が観測されました。この変化は、その場リーク電流測定で観測された SDB の発生と同時に観測されたことから、SDB 時のリーク電流を担う領域 (SDB 領域) を可視化したこと示唆しています。 7.4×10^6 サイクル後には、SDB 領域内において、光電子強度が減少したスポットが観測されました。こちらも、HDB の発生と同時に観測されたことから、電流の伝導パスを可視化したものと考えられます。

それぞれの領域の電子状態を解明するために、PEEM を用いた顕微光電子分光を行いました (図 2)。Area 1 が光電子強度の変化が比較的小さかった領域、Area 2 が SDB 領域、Area 3 は HDB スポットに対応します。Area 1 内の位置 (Pos.1) で解析したエネルギー分布曲線 (EDC) に比べ、Area 2 内の位置 (Pos.2) で解析した EDC は同じ形状で、強度が全体的に大きくなっていることがわかります。

今回の顕微分光では、TiN 電極からの信号と HZO からの信号の足し合わせを観測しています。これらを分離するために、リーク電流の増加に対する電極の電子状態の変化の寄与は無視できると仮定し、Pos.1 の EDC と Pos.2 の EDC の差分を計算しました。その差分 EDC を図 2b の青塗りのスペクトルとして示しています。この差分 EDC から、SDB を担う電子状態は裾構造をしていることがわかります。さらに、同様の解析を Pos.3 に対しても行うと、図 2b の赤塗りのスペクトルに示すように、 -0.1 eV にピーク構造を持つことがわかります。これは、HDB 後の伝導パスを担う電子状態は、裾構造しか持たない SDB 後のリーク電流を担う電子状態とは異なることを示しています。

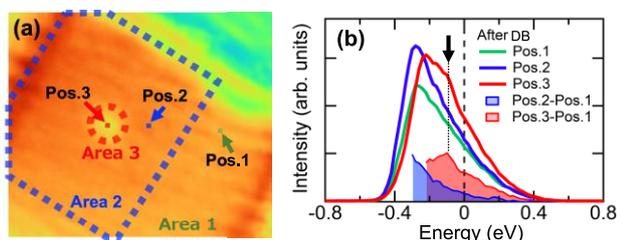


図 2: (a) 顕微光電子分光を行った領域の PEEM 像。(b) 図(a)中の Pos.1、Pos.2、Pos.3 で抽出した光電子エネルギー分布曲線 (EDC)。青塗り、赤塗りの EDC はそれぞれ Pos.2 の EDC から Pos.1 の EDC を、Pos.3 の EDC から Pos.1 の EDC を差し引いた差分 EDC である。

HDB 後には、ジュール熱による誘電体膜のアモルファス化が起こる [9] など、絶縁破壊のトリガーとなった欠陥生成に関する情報が失われる可能性があります。本研究結果でも HDB 後には大きく電子状態が変化していることから、絶縁破壊のトリガーを解明するには、SDB などの HDB の直前の変化を観察することが重要であることが示されました。それと同時に、laser-PEEM による絶縁破壊過程観察は HDB から遡って電子状態の変化を議論できる強力な実験手法であることが示されました。

最後に、HDB 後の PEEM 像を走査型電子顕微鏡 (SEM) 像と比較します。SEM は半導体デバイスの形状検査に広く用いられる非破壊検査ツールです。図 3 に示すように、laser-PEEM では明瞭に可視化された HDB スポットは、SEM では可視化できていないことがわかります。このことから、SEM では可視化できない電極に埋もれた絶縁膜の伝導パスを、laser-PEEM では明瞭に可視化できる強力なツールであることが実証されました。

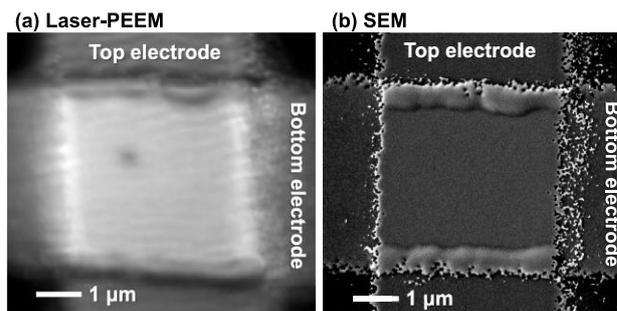


図 3: (a) HDB 後に取得した PEEM 像。(b) 図(a)と同じ試料に対して取得した SEM 像。

[まとめ]

本研究では、laser-PEEM を用いて TiN/HZO/TiN 構造の強誘電体キャパシタの絶縁破壊過程を観察しました。HDB 後の伝導パスを電極越しに可視化できただけでなく、HDB の前駆現象である SDB 領域も可視化することに成功しました。顕微分光から、SDB 領域と HDB スポットの電子状態が異なることを解明しました。SDB 領域と HDB スポットは SEM では可視化できず、laser-PEEM が埋もれた絶縁膜の化学状態の変化を可視化するのに優れた実験手法であることを実証しました。

[謝辞]

本研究成果は、東京大学総長室特別教授室の幸埴特別教授 (元物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センター教授、2022 年 6 月に逝去) との共同研究によるものです。

