

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 16 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760313

研究課題名（和文）原子間力顕微鏡を用いた酸化物 ReRAM における抵抗変化機構の解明

研究課題名（英文）Mechanism elucidation of resistive switching mechanism using atomic force microscope in oxide-based ReRAM

研究代表者

木下 健太郎（KINOSHITA KENTARO）

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60418118

研究成果の概要（和文）： $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  単結晶を用いて ReRAM を作製しその結晶学的特徴と超伝導特性を利用することで、メモリ効果の発現には Bi-2212 に酸素欠乏層を導入する必要があり、ギブズエネルギーの小さな電極に電極界面近傍の酸素を奪わせることでその実現が可能であることを明らかにした。強電界によって Bi-2212 の酸素イオンを移動させ、酸素欠乏層を修復/生成(酸化/還元)させることでセット/リセットが生じるモデルを提案した。更に、Pt の触媒効果を利用して水素イオン  $\text{H}^+$  を Bi-2212 内に効率的に導入することでも、メモリ効果の発現及び抵抗値の制御が可能であることを初めて明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We made resistive random access memory (ReRAM) structures using  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi-2212) single crystal as the memory layer. It was clarified that the introduction of oxygen vacancies to the Bi-2212 single crystal was required for the development of the memory effect and could be achieved by depositing electrodes with low Gibbs free energies. The model which explains the resistance switching of perovskite-oxide-based-ReRAM was proposed based on the results. In addition, we, for the first time, demonstrated that the resistive switching can be caused by migration of hydrogen ions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：抵抗変化メモリ (ReRAM)

## 1. 研究開始当初の背景

ReRAM の抵抗変化機構の解明を妨げる要因として、その研究の殆どに多結晶薄膜が用いられてきたことが挙げられる。一部、エピタキシャル薄膜による研究も行われているが、報告例は少なく、基板からのストレスによる影響も懸念される。バルク単結晶を用いた研究に至っては数例の報告があるのみで、その内容も抵抗変化現象の確認に留まり、電気特性の電極サイズ依存や膜厚依存等の基本的なデータを系統的に取得した例は皆無

である。これは主にフォーミングが生じる電圧が膜厚に比例する傾向があることに起因する。厚い単結晶ではフォーミング電圧が大きいため、フィラメントへのダメージが無視できない。膜厚低減のための加工による結晶及び表面の劣化も懸念される。

そこで、申請者は銅酸化物超伝導体 (HTSC) として知られる  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi-2212) に着目した。この物質は数ミリ角とサイズの大きな単結晶が得られるだけでなく、劈開性が極めて高い。この性質を利用することで膜

厚の制御と清淨且つ平坦な界面を得ることの両方が可能である。

更に、Bi-2212 の興味深い点は、メモリ効果と超伝導の両方の現象が同一材料で観測される点である。抵抗変化は酸素イオンのドリフトを伴う酸素欠損の生成と修復に起因するとの説が有力とされる。しかし、酸化物における酸素欠陥の解析には困難を伴う事が予想され、より多角的な分析が必要となる。そこで、申請者は TMO として HTSC を用いることで、超伝導特性をプローブとしてメモリ効果を調査する手法を提案する。HTSC の超伝導特性は試料の酸化度を敏感に反映するため、これを酸素欠陥の生成/修復の検出器として利用する。陽イオン置換や格子歪等の影響も超伝導特性の変化から、高温超伝導のデータベースを基に論じることが出来る。HTSC に高抵抗と低抵抗状態とを数百ミクロン角の広範囲に書き込み、この領域内に電極を形成することで、AFM 書き込み領域の超伝導特性の評価が可能となる。同一材料におけるメモリ効果と高温超伝導の観測及び両現象の相関に着目したメモリ効果解明の試みは申請者独自のアイデアである。

以上の背景から、Bi-2212 単結晶に AFM 書き込みを適用することで各種分析手法による抵抗変化領域の物性評価を可能とし、更に、高温超伝導をプローブとしたメモリ効果の研究を提案する。

## 2. 研究の目的

バルク単結晶を用いることで結晶粒界や基板からのストレスの影響を受けない本質的な基本メモリ特性を明らかにする。

AFM を用いた広域抵抗書き込みにより抵抗変化領域に各種分析手法を適用し、更に、メモリ効果と高温超伝導の相関も利用することで抵抗変化領域の物性を明らかにする。バルク単結晶における抵抗変化領域の XPS, オージェ電子分光(AES)等の分析データが初めて得られるだけでなく、メモリ効果と高温超伝導を同一試料の同一領域で観測した全く新しいデータが提供される。

一連の結果を基に、メモリ効果のモデル及び基本メモリ特性の制御方法を提案する。

## 3. 研究の方法

(1) 垂直ブリッジマン法により Bi-2212 単結晶を育成した。育成した単結晶の表面を大気中で、劈開を行った。単結晶中の酸素含有量を一定にするため、酸素中で 500 °C、20 分のアニール処理を施した。スパッタ法により、Bi-2212 単結晶の表裏(ab面)に Al 電極と Pt 電極を形成し、M-TE/Bi-2212/Pt-BE 構造 (M = Pt, Al) を作製した。ここで、TE と BE はそれぞれ上部と下部電極を意味し、BE は常に Pt を用いた。上下電極のサイズは共に

1.0×1.0 mm<sup>2</sup>、厚さ 100 nm である。半導体パラメータアナライザ(Agilent 4155C)を用いて電流-電圧(I-V)特性を室温で測定した。

Pt-BE を接地し、M-TE に ±2.0 V の電圧を 10 mV ステップで印加した。素子がセット[高抵抗状態(HRS: high resistance state)から低抵抗状態(LRS: low resistance state)へのスイッチング]した際、大電流の流入によって試料が破壊するのを防止するため、電流制限値  $I_{comp}$  を 60 mA に設定した。Ar 雰囲気中で 300 又は 400 °C で 1 時間のアニール処理を施すことで  $T_c$  を制御し、メモリ効果と  $T_c$  の相関を調査した。

(2) 垂直ブリッジマン法により作製した Bi-2212 単結晶を大気中で劈開し、スパッタ法によりその表裏(ab面)に Pt 及び Au 電極を形成することで Pt/Bi-2212/Au 構造を得た。試料に H<sub>2</sub>(5%) 雰囲気中で 400 °C のアニール処理し、DC 及びパルス応答特性を評価した。

## 4. 研究成果

(1) Bi-2212 単結晶の結晶学的特徴及び超伝導特性を利用した抵抗変化現象の調査と抵抗スイッチングモデルの提案

図 1(a) に Pt-TE / Bi-2212 / Pt-BE の I-V 特性を示す。丸、三角、四角はそれぞれ as-prepared, 300 °C アニール後、400 °C アニール後の I-V 特性に対応している。I-V 特性は何れもオーミックで、400 °C までのアニール処理で顕著な差は見られず、どの条件においても抵抗変化は確認されなかった。

図 1(b) に Al-TE / Bi-2212 / Pt-BE の I-V 特性を示す。丸、三角、四角はそれぞれ as-prepared, 300 °C アニール後、400 °C アニール後の I-V 特性に対応している。比較のため、前述した Pt-BE / Bi-2212 / Pt-BE 構造 (as-prepared) の I-V 特性(菱形)を同図に示す。何れも Al-TE に正電圧を印加することでセットし、負電圧を印加することでリセット (LRS から HRS へスイッチング) した。HRS の抵抗値 ( $R_{HRS}$ ) と LRS の抵抗値 ( $R_{LRS}$ ) の比 ( $R_{HRS}/R_{LRS}$ ) はアニール温度の増加とともに大きくなる。また、Pt-TE/Bi-2212/Pt-BE,

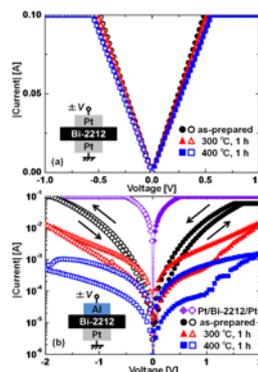


図 1 (a) Pt-TE/Bi-2212/Pt-BE と (b) Al-TE/Bi-2212/Pt-BE 構造の  $I-V$  特性。

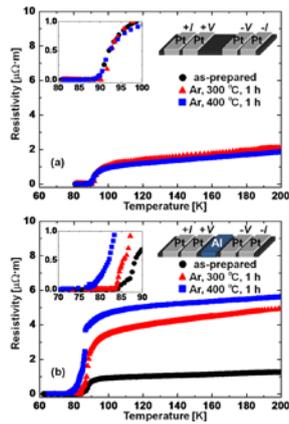


図 2 電圧端子間に Al を堆積する(a)前(b)後の Bi-2212 単結晶の  $\rho$ - $T$  特性.

Al-TE/Bi-2212/Pt-BE の初期抵抗は as-prepared でそれぞれ 5.1  $\Omega$ , 1.3 k $\Omega$  であり, 400  $^{\circ}\text{C}$  アニール後の Al-TE/Bi-2212/Pt-BE の初期抵抗は 12.7 k $\Omega$  であった. 従って, Al を Bi-2212 単結晶上に堆積することで Al が Bi-2212 単結晶から酸素を奪い, Bi-2212 単結晶の表面付近に高抵抗な酸素欠乏領域が形成されたため, 試料の初期抵抗が高抵抗化したと考えられる. 図 2(a) に Bi-2212 単結晶 (挿入図参照) の抵抗-温度 ( $\rho$ - $T$ ) 特性を示す. 丸, 三角, 四角はそれぞれ as-prepared, 300  $^{\circ}\text{C}$  アニール後, 400  $^{\circ}\text{C}$  アニール後の  $\rho$ - $T$  特性に対応している. どの条件においても常伝導状態の抵抗値及び  $T_c$  に顕著な変化は見られない. 電圧端子間に Al を堆積した試料 (挿入図) に対して同様の測定を行った. その結果を図 2(b) に示す. as-prepared の  $T_c$  は 84 K であり, Al 堆積無し  $T_c = 88$  K に比べ, 低下した. 更に, アニール処理すると  $T_c$  は低下した.  $T_c$  の低下と共に常伝導状態の抵抗率は増加した. 抵抗率と  $T_c$  は共に結晶の酸化度に強く依存することが知られており, Al を堆積させた試料でのみ抵抗率の増加と  $T_c$  の減少が観測されたことから, Al が Bi-2212 単結晶から酸素を奪い, Bi-2212 単結晶に酸素欠乏層を形成することが示された.

Al-TE/Bi-2212/Pt-BE 構造の抵抗スイッチングメカニズム解明のため抵抗変化部位を特定する必要がある. しかし, 抵抗異方性の小さい TMO を用いた ReRAM では, 図 3(a) に示すように, TE-ME 間に電圧印加した時, 電流は BE を流れ, ME/TMO/BE と BE/TMO/TE のキャパシタ構造を直列に接続した素子を測定しているのと等価であり, TE/TMO 界面

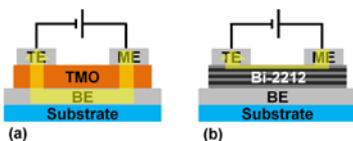


図 3 TMO 層に(a)薄膜と(b)Bi-2212 バルク単結晶を用いた時の電流経路

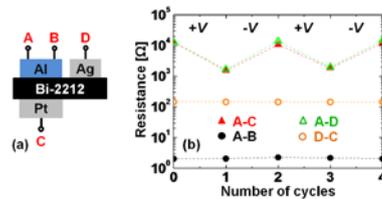


図 4 (a) 素子構造と (b) A-C 間を抵抗スイッチングさせたときの各端子間の抵抗推移の抵抗を測定できない. これは, TE-ME 間の距離に比べて TMO の膜厚が十分薄いため, TMO 中を流れる電流の経路が最短となるように決定されることに起因する. そこで, 基板と垂直な方向の抵抗が基板と平行な方向の抵抗に比べて十分大きな TMO を用いる必要がある. Bi-2212 バルク単結晶は大きな抵抗異方性 ( $\rho_c/\rho_{ab} > 10^3$ ) を有するため, 図 3(b) に示すように電流を TMO の ab 平面に流すことができ, TE / TMO 間の抵抗測定が可能である. 図 4(a) に ME (端子 D) 付きの素子構造を示す. BE の面積が図 3(a) に比べて小さく, ME の対面には電極が存在しないが, TE-ME 間に電圧を印加した際に流れる電流の経路は図 3(a) におけるそれと同一であり, TE / TMO 間の抵抗測定が可能である. A-C 間にセット電圧 (+V) / リセット電圧 (-V) を繰り返し印加し, 同時に A-D, C-D 間の抵抗をモニターした. 更に, Al-TE 上の端子 A とは異なる箇所にとり, A-B 間の抵抗も測定した. その結果を図 4(b) に示す. A-C 間の抵抗は +V, -V の印加に対応して, それぞれ低抵抗化, 高抵抗化した. これに伴い, A-D 間の抵抗にも同様の変化が確認され, A-C 間と A-D 間の抵抗は一致した. 一方, A-B, C-D 間の抵抗は, A-C 間の抵抗に依存せず, 不変であった. 本研究で観測された抵抗変化は, 以下のように説明される.

最初に, ギブズエネルギーの小さい金属 (Al) を Bi-2212 単結晶上に堆積することで, Al が Bi-2212 から酸素を奪って酸素欠乏層が形成され, HRS になる [図 5(a)]. 更に, ここでアニール処理を施すことで Al による還元が促進され, 抵抗が増加する. 続いて, TE に正電圧を印加すると Bi-2212 単結晶内の酸素イオンがクーロン力で TE 側に引き寄せられて酸素欠乏層の酸化が進み, 欠乏状態から最適状態に近づくため LRS になる [図 5(b)]. 再び負電圧を印加すると, 酸素イオンが BE 側に移動し, 再度酸素欠乏層が形成され, HRS に

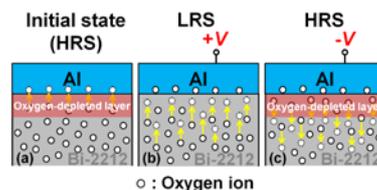


図 5 (a) 初期状態, (b) 低抵抗状態と (c) 高抵抗状態に変化するまでの概略図

なる[図 5(c)]. 素子全体の抵抗はアニール処理によって導入されたBi-2212 酸素欠乏層とAlの酸化物層の抵抗の直列接続で与えられる. 低抵抗状態では酸素欠乏層が修復され, Al酸化物層の抵抗が支配的となる. 一方, 高抵抗状態では酸素欠乏層の抵抗が支配的となる. 故に,  $R_{HRS} / R_{LRS}$ はBi-2212 の酸素欠乏層とAlの酸化物層の抵抗値の比で与えられることになる. アニール温度の増加と共にAlの酸化が進み, 酸素欠乏層の酸化度はより低下する. その結果,  $R_{LRS}$ の最小値と $R_{HRS}$ の最大値は共に増加する. Al酸化物層中の酸素はBi-2212 中の酸素に比べて結合が強く, 電界によって移動するのはBi-2212 中の酸素のみであると考えられる. アニール処理により $R_{HRS}/R_{LRS}$ が増加したのはAl酸化物層の抵抗の増加に比べてBi-2212 酸素欠乏層の抵抗の増加が大きかったことによる. 従って, Bi-2212 単結晶を用いたReRAMの抵抗変化は酸素イオンの移動によるBi-2212 表面の酸化/還元によって生じると考えられる.

## (2) 抵抗スイッチングモデルの検証と水素イオン移動型抵抗変化メモリの提案・作製

(I)にてReRAMの抵抗スイッチングが酸素イオンの移動による, メモリ層の酸化/還元で生じることを示した. 抵抗スイッチングの根底に酸化/還元反応があると考えれば, 抵抗スイッチングを引き起こす手法は酸素イオンの移動のみに制限されるものではなく, 酸化/還元反応の制御を可能とする他の手法によっても人為的に類似の効果が得られると期待される. 例えば, 強い還元剤である水素イオンが酸素イオンの代わりに TMO 層内を移動することによって抵抗スイッチングを生じるならば, 水素イオンの拡散し易さ故に動作速度の改善が期待できる.

図 6(a)にas-prepared及びH<sub>2</sub>(5%)の雰囲気下で200及び400°Cにて, 10分間のアニール処理を施したPt/Bi-2212/Au構造のI-V特性を示す. as-prepared試料のI-V特性にはヒステリシスが観測されない. 一方, 水素雰囲気下でアニール処理した試料のI-V特性には明確なヒステリシスが観測され, セットとリセットはそれぞれ負と正の電圧を印加することで生じた. 以降, 抵抗スイッチングが時計回りで生じるI-V特性を水素イオンモードと定義する. ここで, (I)に示したAl/Bi-2212/Pt構造のセットとリセットはAl電極にそれぞれ正と負の電圧を印加することで生じた. この酸素イオンの移動による抵抗スイッチングは印加電圧の極性と生じる抵抗スイッチングの関係が水素イオンモードと逆である. 以降, 反時計回りで抵抗スイッチングが生じるI-V特性を酸素イオンモードと定義する. 水素雰囲気下でアニール処理を施したPt/Bi-2212/Au構造の $R_{HRS}/R_{LRS}$ は

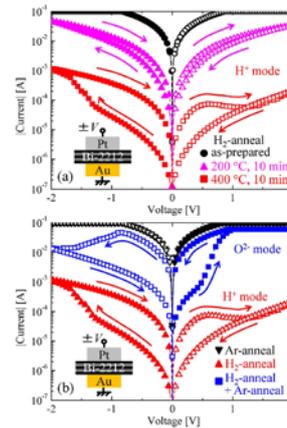


図 6 Pt/Bi-2212/Au 構造の I-V 特性のアニール(a)温度と(b)雰囲気依存性

$T_{\text{anneal}}$  の増加とともに増加した. 故に, Bi-2212 に導入される水素イオン数の増加によってメモリ効果は促進される.

図 6(b)にArまたはH<sub>2</sub>(5%)雰囲気下で400°C, 10分間のアニール処理を施したPt/Bi-2212/Au構造のI-V特性と, 水素アニールしたPt/Bi-2212/Au構造にAr雰囲気下で400°C, 60分間のアニール処理を施した試料のI-V特性を示す. Arアニールのみを施した試料のI-V特性ではヒステリシスが観測されない. 一方, H<sub>2</sub>(5%)雰囲気下でアニール処理した試料のI-V特性では水素イオンモードによるメモリ効果が観測された. 更に, 同一試料にAr雰囲気下で400°C, 60分間のアニール処理を追加することで, 抵抗スイッチング特性が水素イオンモードから酸素イオンモードへと切り替わった. 図 3, 4 にて示した手法により, 図 6(b)の水素と酸素イオンモードで生じる抵抗スイッチングが共にPt/Bi-2212界面で生じることも確認された.

水素アニールPt/Bi-2212/Au構造のメモリ効果は上記提案モデルによって説明が可能である. その説明図を図 7 に示す. Pt/Bi-2212/Au 構造に水素アニールを施すことで, 水素の還元作用とPtの触媒作用によってPt-TE付近のBi-2212表面に高抵抗層(Bi-2212の還元層)が形成され, 高抵抗状態になる[図 7(a)]. Ptに負電圧を印加するとBi-2212単結晶内の水素イオンがクーロン力による引力とジュール熱によるアシストでPt側に引き寄せられ, 酸素欠乏層の酸化が進み, 高抵抗層が修復されるため低抵抗状態になる[図 7(b)]. 再び正電圧をPtに印加すると, 水素イオンがBi-2212側に移動し, 再度高抵抗層が形成され, 高抵抗状態になる[図 7(b)]. 従って, メモリ効果は水素イオンの移動によるBi-2212の酸化/還元によって生じる. 一方, 水素アニールされたPt/Bi-2212/Au構造[図 7(a)]がAr雰囲気下でアニール処理されることで, Pt/Bi-2212酸素

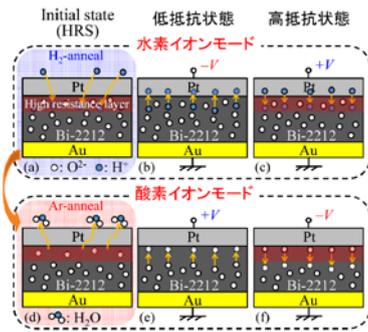


図7 水素イオンモード: (a), (b), (c) と酸素イオンモード: (d), (e), (f) における抵抗変化の概略図

欠乏層が形成される[図 7(d)]. 従って, 図 7(e)と 9(f)に示すように, Ar アニール後の抵抗スイッチングは酸素イオンの移動による酸素欠乏層の生成/修復によって生じ, (f)で示された Al/Bi-2212/Pt 構造の抵抗スイッチング機構(図 5)と等価である.

### (3) 水素イオンモードと酸素イオンモードの共存による新機能発現の可能性

図 8 に H<sub>2</sub>(5%) 雰囲気下で 400 °C, 10 分間のアニール処理を施した Pt/Bi-2212/Au 構造の I-V 特性を示す. 試料の Pt 電極に ±3 V (ステップ 10 mV) の電圧掃引を行った. Pt 電極に正電圧を印加した時, 水素イオンの移動によるリセット (0 < V < +1.5 V) の後に酸素イオンの移動によるセット (+1.5 < V < +3.0 V) が生じた. 同様に, Pt 電極に負電圧を印加した時, 水素イオンの移動によるリセット (0 < V < -1.5 V) の後に酸素イオンの移動によるリセット (-1.5 < V < -3.0 V) が生じ, I-V 特性の交差が観測された. この結果は, 同一試料において二つの抵抗スイッチング起源が共存していることを示す. 水素イオンモードでは, より低電圧で抵抗のスイッチングが生じることから, 水素イオンモードは酸素イオンモードに比べて低電圧で動作可能であり, 低消費電力化に有利である. 更に, 印加電圧が高くなると酸素イオンの移動に起因する抵抗値の増加により自発的にセット電流が制限される. リミッターを用いなくてもセット時の電流に制限が掛かる機能を一般的にセルフコンプライアンス機能と表現する. 本素子では酸素と水素イオンモードの共存によ

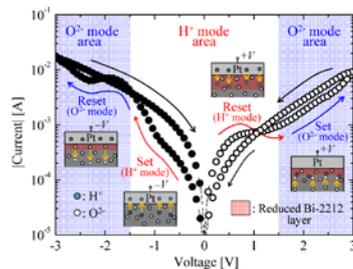


図 8 酸素イオンと水素イオンモードが混在する試料の I-V 特性

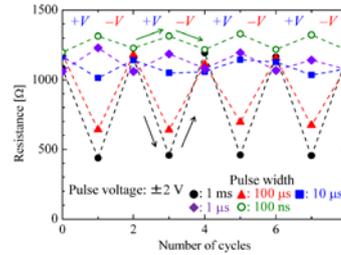


図 9 動作モードのパルス幅依存性

り, これが実現された.

図 9 に H<sub>2</sub> アニール後に Ar アニールを施した Pt/Bi-2212/Au 構造における動作モードのパルス幅  $t_{width}$  依存性を示す. H<sub>2</sub> アニール後に Ar アニールを施した Pt/Bi-2212/Au 構造には, 多量の酸素欠損と少量の水素イオンが含まれると予想される(図 7(d)). Au 電極を接地し, Pt 電極に高さが ±2 V,  $t_{width}$  が 100 ns から 100 ms までのパルスを繰り返し印加した.  $t_{width}$  が 10 μs より短いパルスを印加すると, 抵抗スイッチングは酸素から水素イオンモードへと反転する. この結果は, 抵抗スイッチングが酸素イオンと水素イオンの二種類のイオンの移動で生じており, イオンが移動する向きとそれに伴う抵抗スイッチングが逆であることを示唆し, 提案モデルと整合する. また, 水素イオンモードは水素イオンの小さな有効質量故に, 酸素イオンモードに比べて高速である.

最後に, 主目的の一つであった原子間力顕微鏡(AFM)による Bi-2212 への抵抗値の直接書き込みは困難であると結論付けられた. これは Bi-2212 の抵抗変化現象の発現には強烈な還元処理が必要であり, 低ギブズエネルギー電極の堆積により Bi-2212 から酸素を奪うか, Pt の触媒効果を利用して水素を Bi-2212 中に取り込む操作が必要なためである. AFM 書き込み領域の直接観察は実行されなかったが, 結果として効果的に抵抗変化現象を発現させるためのノウハウが得られ, 特許出願及び論文掲載に繋がった.

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

(1) A. Hanada, K. Kinoshita, and S. Kishida, Resistive switching by migration of hydrogen ions, Appl. Phys. Lett., 査読有, vol. 101, 2012, 043507-1-4.

DOI: 10.1063/1.4737897

(2) A. Hanada, K. Kinoshita, K. Matsubara, and S. Kishida, Developmental Mechanism for the Memory Effect in Perovskite Oxide-Based ReRAM Consisting of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> Bulk Single Crystal, Procedia Engineering, 査読有, vol. 36, 2012, 411-418.

DOI: 10.1016/j.proeng.2012.03.060

(3) A. Hanada, K. Kinoshita, K. Matsubara,

and S. Kishida, High-Speed and Multi-Bit Resistive Switching Brought about by Migration of Hydrogen Ions in Resistive Random Access Memory Consisting of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  Single Crystal, Proceedings of IEEE International Memory Workshop 2012, 査読有, 2012, 198-201.

(4) A. Hanada, K. Kinoshita, K. Matsubara, T. Fukuhara, and S. Kishida, Developmental Mechanism for the Resistance Change Effect in Perovskite Oxide-Based Resistive Random Access Memory Consisting of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  Bulk Single Crystal, J. Appl. Phys., 査読有, vol. 110, 2011, 084506-1-5.

DOI: 10.1063/1.3651465

(5) 花田明紘, 木下健太郎, 松原勝彦, 福原貴博, 岸田悟, 銅酸化物高温超伝導体単結晶を用いた抵抗変化メモリのスイッチングメカニズム, 表面科学, 査読有, 32 巻, 2011, 428-431.

[学会発表] (計 10 件)

① A. Hanada, K. Kinoshita, H. Miura, T. Notsu, S. Kishida, Analysis of memory effect induced by hydrogen annealing, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC), Makuhari Messe, 2013 年 07 月 14 日 ~ 2013 年 07 月 19 日.

② 木下健太郎, 抵抗変化メモリ, 新原理 FET, 原子スイッチ技術の最新動向, 酸化物エレクトロニクス スクール (招待講演), 産業技術総合研究所, 2012 年 10 月 29 日 ~ 2012 年 10 月 29 日.

③ 三浦寛基, 木下健太郎, 花田明紘, 野津武志, 岸田悟, 水素イオン移動型 ReRAM の抵抗変化特性, 2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学・松山大学, 2012 年 09 月 11 日 ~ 2012 年 09 月 14 日.

④ 木下健太郎, ペロブスカイト型抵抗変化メモリのスイッチング機構 - 機構解明に向けた放射光利用の可能性 -, 平成 23 年度 GIGNO 研究領域創成支援プロジェクト研究会高繰り返しシングルバンチ切り出しチョッパが拓く科学 - 放射光による時分割計測の新展開 - (招待講演), 東京, KFC Hall 2nd (国際ファッションセンター), 2012 年 3 月 21 日 ~ 3 月 22 日.

⑤ 木下健太郎, 岸田悟, 抵抗変化メモリ (ReRAM) のスイッチング機構と動作特性の制御, ReRAM ワークショップ (招待講演), 茨城, 物質・材料研究機構, 2012 年 3 月 14 日.

⑥ 松原勝彦, 木下健太郎, 花田明紘, 岸田悟, 銅酸化物超伝導体単結晶をプローブとしたペロブスカイト型 ReRAM 抵抗スイッチングの解明, 2011 年第 52 回真空に関する連合講演, 18Ba-2, 東京, 学習院大学, 2011 年

11 月 15 日 ~ 11 月 18 日.

⑦ A. Hanada, K. Kinoshita, K. Matsubara, and S. Kishida, Developmental Mechanism for the Memory Effect in Perovskite Oxide-Based ReRAM Consisting of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  Bulk Single Crystal, IUMRS-ICA 2011, Taipei, Taiwan, September 19-22, 2011.

⑧ A. Hanada, K. Kinoshita, K. Matsubara, and S. Kishida, Micro-Fabrication Method of Josephson Junctions without Etching Process, IUMRS-ICA 2011, Taipei, Taiwan, September 19-22, 2011.

⑨ 花田明紘, 木下健太郎, 松原勝彦, 岸田悟, ペロブスカイト酸化物系 ReRAM における抵抗変化の発現機構, 第 72 回 2011 年秋季応用物理学会学術講演会, 31p-ZK-14, 山形, 山形大学, 2011 年 8 月 29 日 ~ 9 月 2 日.

⑩ 花田明紘, 木下健太郎, 松原勝彦, 福原貴博, 岸田悟, ペロブスカイト酸化物系 ReRAM のスイッチングメカニズム, 電子情報通信学会・集積回路研究会 (ICD), 兵庫, 神戸大学, 2011 年 4 月 18 ~ 19 日.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 不揮発性半導体記憶装置および同装置の製造方法

発明者: 木下健太郎, 岸田悟, 花田明紘, 松原勝彦

権利者: 鳥取大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-46162

出願年月日: 2012 年 3 月 2 日

国内外の別: 国内

名称: 不揮発性半導体記憶装置および同装置の製造方法

発明者: 木下健太郎, 岸田悟, 花田明紘, 松原勝彦, 福原貴博

権利者: 鳥取大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-84216

出願年月日: 2011 年 4 月 6 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木下健太郎 (KINOSHITA KENTARO)

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60418118