

抵抗変化型メモリ用 Pt/NiO/Pt 素子における フィラメント形成領域の特定とその評価

岩田 達哉[†] 西 佑介[†] 木本 恒暢^{†‡}

[†] 京都大学工学研究科電子工学専攻 〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂

[‡] 京都大学光・電子理工学教育研究センター 〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂

E-mail: iwata@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし Conductive-AFMを用いて、Pt/NiO/Pt抵抗変化素子に形成されたフィラメントを直接観察した。Pt/NiO/Pt素子をフォーミングしたところ、NiO薄膜の一部に変質領域(隆起あるいは陥没)がみられた。変質領域は直径約1 μm であり、フィラメントはこの変質領域の周辺部に主に存在していることがわかった。ひとつの変質領域につき数本から10数本のフィラメントが存在する。その面積は典型的なもので2500 nm^2 であり、およそ200 nm^2 から20000 nm^2 の範囲の面積を有する。さらに、低抵抗状態においては、10 $\text{m}\Omega\text{cm}$ のオーダの抵抗率を有するフィラメントが主に電流を担っており、抵抗値の違いはその面積および形状の変化に起因することが示唆された。

キーワード 抵抗変化型メモリ, 酸化ニッケル, Conductive-AFM

Investigation on filamentary conduction paths formed in Pt/NiO/Pt resistive switching cells

Tatsuya IWATA[†] Yusuke NISHI[†] and Tsunenobu KIMOTO^{†‡}

[†] Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University

[‡] Photonics and Electronics Science and Engineering Center (PESEC), Kyoto University

Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo, Kyoto, 615-8510 Japan

E-mail: iwata@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract Filamentary conductive paths (filaments) formed in Pt/NiO/Pt cells have been directly observed by Conductive-AFM. After forming process, deformations on the surface of NiO thin films are observed. The deformations have been confirmed to be protrusions or depressions with the diameter of about 1 μm . It is revealed that from several to more than ten filaments are preferentially distributed along the edge of a deformation. The area of a filament is typically 2500 nm^2 , ranging approximately from 200 nm^2 to 20000 nm^2 . In low-resistance state, current through the cells is dominated by the filaments with the resistivity of the order of 10 $\text{m}\Omega\text{cm}$. It is also suggested that the variation of the resistance in low-resistance state originate from the changes in the area as well as the shape of the filaments.

Keyword ReRAM, Nickel oxide, Conductive-AFM

1. 序論

来るべきユビキタス社会へ向け、既存のメモリの性能を凌駕する次世代不揮発性メモリの実現が望まれている。酸化物薄膜において見られる、抵抗スイッチング現象を利用した不揮発性メモリである抵抗変化型メモリ(ReRAM)は、その有力候補の一つである。抵抗スイッチング現象とは、電圧印加により材料の抵抗が、高抵抗状態(High-resistance state: HRS)と低抵抗状態(Low-resistance state: LRS)の2状態間を可逆的かつ不揮発に変化する現象であり、この抵抗値の違いをメモリに応用する。ReRAMの単一素子は抵抗変化材料薄膜

を上下電極で挟んだだけのキャパシタ構造からなり、高集積化に極めて適している。また、 ~ 5 ns, < 3 Vでの動作が報告されており[1]、高速・低電圧動作の可能性も示されている。さらに、主な抵抗変化材料は、酸化ニッケル(NiO) [1, 2]や二酸化チタン(TiO_2) [3, 4]などの酸化物であり、これらを材料として用いたReRAM素子はCMOSとの親和性があり、低コスト化も期待できる。このように、ReRAMは次世代不揮発性メモリとしての高いポテンシャルを有していることから、現在、盛んに研究開発が行われており、ここ1, 2年で実用化に向けた動きも出始めている。

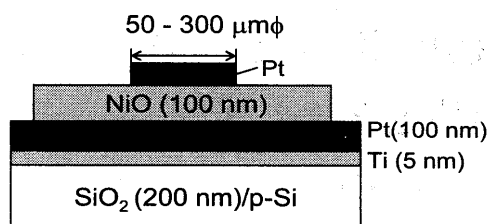


図1. 作製試料の断面図。

ReRAM素子の抵抗スイッチング動作は、そのメカニズムが完全には理解されたとはいえないものの、定性的にはフィラメントモデルで説明される[2, 3]。フィラメントモデルは、フォーミングによって素子の一部に局所的な導電パス(フィラメント)が形成され、このフィラメントが消滅(高抵抗化:リセット)・(再)形成(低抵抗化:セット)を繰り返すことで抵抗変化を生じるというモデルである。すなわち抵抗変化は、素子面内の一部に形成されたフィラメントの状態変化に起因する。したがって、抵抗スイッチング現象のメカニズムの理解のためには、フィラメントの構造(組成・形状)や物性について明らかにすることが重要である。これまでに、TiO₂におけるフィラメントはTi₄O₇の組成を有するマグネリ相からなるという報告がなされている[4]ものの、他の酸化物におけるフィラメントの構造に関する知見は不十分である。

今回、NiO薄膜を用いた抵抗変化素子において、フォーミングに伴いNiO薄膜の一部が変質することを見出した。さらに、Conductive-AFM (C-AFM)によってNiO表面の形状および局所的な導電性を調べ、変質領域近傍に形成されたフィラメントを直接観察した。また、素子の抵抗状態とその素子に形成されたフィラメントの抵抗率や面積との関係について詳細な評価を行った。

2. 実験方法

2.1. 作製試料

SiO₂/Si基板の上に図1に示すようなPt/NiO/Pt積層構造からなる素子を作製した。まず、基板の上にTiを5 nm蒸着した後、下部電極としてPtを100 nm蒸着した。次に下部電極上にNiO薄膜を反応性スパッタリングにより堆積した。ターゲットは金属ニッケル(Ni)、プロセスガスにはアルゴン(Ar)と酸素(O₂)の混合気体を用いた。NiOの膜厚は約100 nmである。NiO上に上部電極としてPtを100 nmあるいは200 nm蒸着した。素子はシャドウマスクを用いて円形に成形し、50 μmから300 μmの径を有する複数種類の素子を作製した。

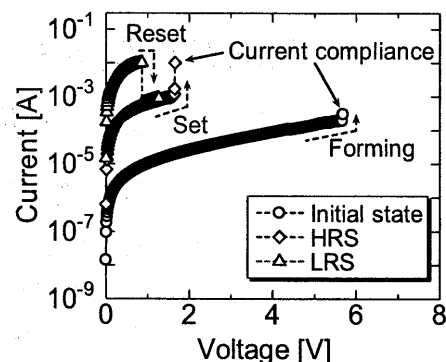


図2. 300 μmφの素子におけるI-V特性。数回の抵抗スイッチング後、低抵抗状態に設定。

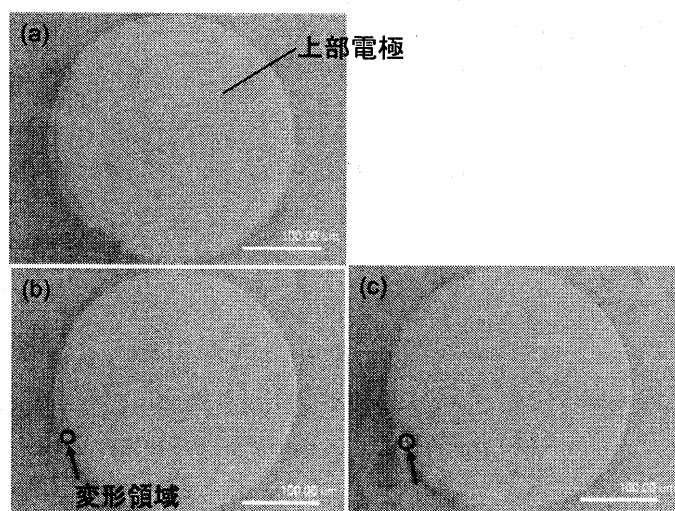


図3. 図2にI-V特性を示した素子の(a)初期状態(フォーミング前)、(b)フォーミング後、(c)抵抗スイッチング後それぞれにおけるノーマルスキ像。

2.2. 評価方法

作製素子の電流-電圧(I-V)特性を2端子法により調べた。また、I-V特性測定は下部電極を接地し、上部電極に正電圧を印加して行なった。その後、上部電極を除去し、素子面内のNiOの表面形状及び、局所的な導電性をC-AFMにより評価した。AFMプローブにはPtIrコートカンチレバーを用い、その先端曲率半径は20 nmである。また、I-V特性測定前後、上部電極除去前後といったそれぞれの状態における素子像を、ノーマルスキ顕微鏡により観察した。

3. 結果および考察

3.1. フォーミングに伴う素子表面の変形

図2は300 μmの径を有する素子のI-V特性である。初期状態は高抵抗であり、初めに約5.7 Vでフォーミングが起こった。この時の電流コンプライアンス(I_{comp})

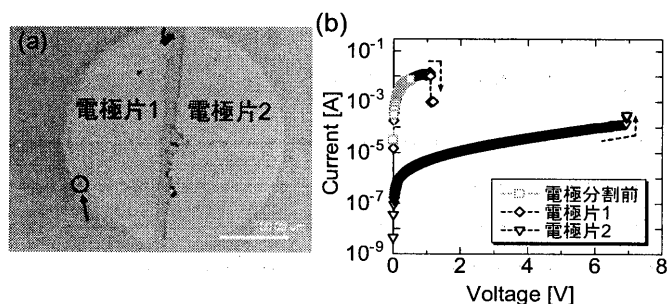


図 4. 図 3 の素子を変形領域を含む電極片(電極片 1)と含まない電極片(電極片 2)とに分割した後の素子の(a)ノマルスキ像および、(b)それぞれの電極片からなる素子における I - V 特性(比較のために電極分割前の I - V 特性も示している).

は $300\ \mu\text{A}$ である. その後, 数回の抵抗スイッチング(リセット・セット)を繰り返した(セット時の I_{comp} は $10\ \text{mA}$ とした). 図 3(a) - (c)に(a)初期状態(フォーミング前), (b)フォーミング後, (c)抵抗スイッチング後の素子のノマルスキ像をそれぞれ示す. フォーミング後の素子表面において, 素子の周辺部に(円で囲んだ領域)に変形領域がみられた. さらに, 抵抗スイッチングを繰り返すことで変形領域は拡大した(図 3(c)). 次に, 素子を低抵抗状態に設定した後, 変形領域を含む電極片(電極片 1)と含まない電極片(電極片 2)とに上部電極を分割し, それぞれ電極片からなる素子の I - V 特性を調べた. 図 4 に(a)電極分割後の素子のノマルスキ像と(b)それぞれの電極片からなる素子に対応する I - V 特性を示す. 電極片 1 からなる素子は低抵抗であり, 分割前の素子とほぼ同様の I - V 特性を示し, $1\ \text{V}$ 付近でリセットが起こった. また, リセット後, 電極分割前の高抵抗状態とほぼ同じ抵抗値を示した. 一方, 電極片 2 からなる素子は高抵抗であり, 約 $7\ \text{V}$ で低抵抗化した. これは, 分割前の素子の初期状態に近い特性である.

変形領域を含む電極片からなる素子の I - V 特性が分割前の素子の I - V 特性と一致したことから, フィラメントはこの変形領域近傍に存在していると考えられる. また, AFMによる観察の結果, この変形は高さ $50\ \text{nm}$, 深さ $100\ \text{nm}$ の凹凸であった(図は載せていない). 中には, フォーミングに伴い素子中央付近が数 $100\ \text{nm}$ 隆起した素子も存在した. これらの変形は, 後述する, フォーミングに伴う内部形状の変化に起因するものである. フォーミングに伴う素子表面の変形は近藤らによっても報告されており[5], SrTiO_3 [6]や TiO_2 [7]においても同様の現象が報告されている.

3.2. C-AFM による NiO 表面の変質領域の観察

図 5 はフォーミング後の素子($50\ \mu\text{m}\phi$, 図3とは異なる)の, 上部電極除去前後におけるノマルスキ像である. フォーミング後の上部電極表面において, 図 5(a)に矢

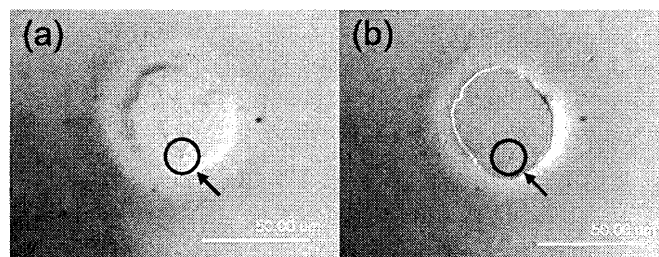


図 5. フォーミング後の素子の(a)上部電極除去前および(b)上部電極除去後のノマルスキ像. NiO 表面においても上部電極の変形領域とほぼ同じ位置に変質領域が見られる.

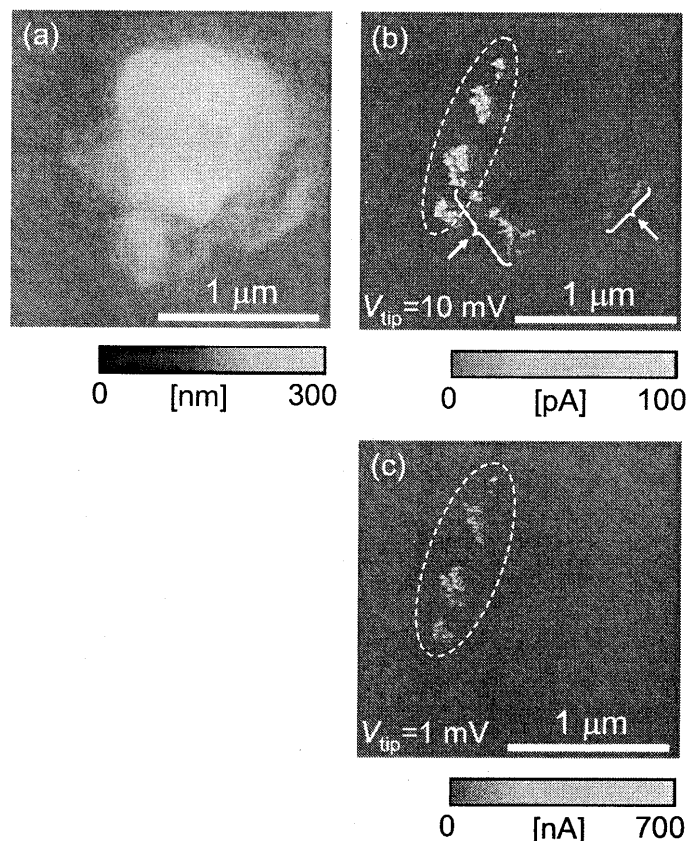


図 6. 図 5 に示した変質領域の(a)表面モフォロジ像および(b)10 mV 印加時, (c)1 mV 印加時の電流像. 高さ約 $150\ \text{nm}$ の隆起の周辺部に低抵抗な領域が分布している.

印で示す位置に変形領域がみられた. この素子のフォーミング後の抵抗は約 $10\ \Omega$ である. 上部電極除去後の NiO 表面において, 上部電極の変形領域とほぼ同じ位置に NiO 表面に変質領域がみられた.

観察された NiO 表面の変質領域の形状および局所的な抵抗率を C-AFM により調べた. 図 6 に図 5 に示した変質領域の(a)表面モフォロジ像, (b)10 mV 印加時および(c)1 mV 印加時の電流像を示す. ただし電圧(V_{tip})は, AFM プローブがステージに対し正となるように印加した. 図 6(a)に示すように, 図 5 で観察された変質領域は, 直径約 $1.5\ \mu\text{m}$, 高さ約 $150\ \text{nm}$ の隆起であった.

また、隆起の周辺部は、周囲の変質していない領域に比べ、数 10 nm 高くなっている。他の素子において観察された変質領域も直径は 1 μm のオーダである。そして、図 5(b) に示すように、主に隆起の周辺部において導電性領域、すなわちフィラメントの存在が観察された。その面積は、典型的なもので 2500 nm^2 であり、およそ 200 nm^2 から 20000 nm^2 の範囲である。また、変質領域の中央が隆起ではなく数 10 nm 陥没しているものも観察されている。このような陥没の場合でもその周辺部は数 10 nm 高くなっており、フィラメントは主に周辺部に存在した。さらに、検出される電流値 (I_{det}) が異なるフィラメントが存在し、その値によって次の 2 種類に大別できる。一方は図 6(b) に矢印で示した領域であり、 $V_{\text{tip}} = 10 \text{ mV}$ において、 $I_{\text{det}} = 10 - 50 \text{ pA}$ の比較的小さな電流が流れる。もう一方は、図 6(b), (c) に円で囲った領域で、図 6(c) に示すように、 $V_{\text{tip}} = 1 \text{ mV}$ において、 $I_{\text{det}} = 300 - 600 \text{ nA}$ なる大きな電流が流れる(図 6(b) の測定レンジでは、この領域を流れる電流は飽和している)。なお、フィラメントを流れる電流は 100 mV までほぼオーミックに増加することを確認している。

これまでの報告で、フィラメントは NiO において酸素脱離、すなわち還元が生じることで形成されることが示されている[8]。一方で、フィラメントは電圧印加によって形成されたパーコレーションパスであることが示唆されている[9]。一般に、フォーミング過程はある印加電圧において、素子を流れる電流が急増し、その後、電流が外部回路の制限値に達することで終了する。したがって、フォーミングにおいて、過程初期にパーコレーションによって形成されたフィラメントに、大きな電流が流れ込み、発生したジュール熱によってフィラメントは還元が促進され、低抵抗化が進行すると考える。C-AFM 測定において、検出された電流、すなわち抵抗の異なるフィラメントが存在したのは、フォーミング時の電流分布によって還元の度合いに違いが現れた結果であると考えられる。

3.3. 低抵抗状態における素子の抵抗とフィラメントの抵抗率および面積・形状との関係

3.3.1. フィラメントの抵抗率の算出

C-AFM における電流測定においては、試料面積に比べ、カンチレバースローブの接触面積が極めて小さいため、検出される電流はプローブ接触界面近傍の抵抗成分(接触抵抗・拡がり抵抗)によってほとんど決定されると考えられる。抵抗率 ρ を有する半無限平面試料に対し、半径 a の円形プローブを接触させたときの拡がり抵抗 R_{sp} は次式で表される[10]：

表 1. 観察されたフィラメントと式(1)より求めた抵抗率。

フィラメント	抵抗率 ρ
F1	10 $\text{m}\Omega\text{cm}$ - 80 $\text{m}\Omega\text{cm}$
F2	200 Ωcm - 20 $\text{k}\Omega\text{cm}$

$$R_{\text{sp}} = \frac{\rho}{4a}. \quad (1)$$

本節では、最も簡単なモデルとして、C-AFM によって検出される抵抗成分として拡がり抵抗のみを考える。さらに、AFM プローブと試料との接触面として AFM プローブの曲率半径 $r = 20 \text{ nm}$ に等しい半径を有する円形を仮定し、式(1)より観察されたフィラメントの抵抗率を求めた。そして、抵抗 (R_{Cell}) と、その素子に存在するフィラメントの抵抗率およびその面積 (A_{Fil}) との関係について調べた。さらに、素子の抵抗とその素子に存在するフィラメントの形状について検討した。

30 Ω から 30 $\text{k}\Omega$ の様々な抵抗を有する、低抵抗状態の素子について同様に C-AFM による評価を行った。ここで低抵抗状態とは、フォーミングあるいはセット直後の素子の状態を指す。観察されたフィラメントは、いずれの素子においても、 $V_{\text{tip}} = 1 \text{ mV}$ における I_{det} が 100 nA オーダもの (F1 と呼ぶ) と、40 pA 以下 (概ね 0.4 pA - 40 pA の範囲) のものの (F2 と呼ぶ) の 2 種類であり、これらの中間の電流値を示すフィラメントは観察されなかった。ただし、F1 が観察されない素子も存在したが、この点については後述する。検出された抵抗値： $V_{\text{tip}}/I_{\text{det}}$ が、 R_{sp} に等しいと仮定し、この値から F1, F2 それぞれにおける抵抗率 ρ を求めた。その結果、表 1 に示すように F1 の抵抗率 ρ_{F1} は $\rho_{\text{F1}} = 10 \text{ m}\Omega\text{cm} - 80 \text{ m}\Omega\text{cm}$ の範囲であり、10 $\text{m}\Omega\text{cm}$ オーダの大きさとなった。一方で、F2 の抵抗率 ρ_{F2} は $\rho_{\text{F2}} = 200 \Omega\text{cm} - 20 \text{ k}\Omega\text{cm}$ の範囲である。

3.3.2. 素子の抵抗とフィラメントの面積・形状との関係

まず、フィラメントが、膜厚方向に均質かつ一定な断面積を有する抵抗体として扱えたとし、その抵抗を、

$$R_{\text{Fil}} = \rho \frac{t}{A_{\text{Fil}}} \quad (2)$$

より求めた。ここで、 t の値には NiO の膜厚 $t = 100 \text{ nm}$ を用いた。図 7 は低抵抗状態における素子抵抗 R_{Cell} に対して、求めた R_{Fil} をプロットしたものである。ただし R_{Cell} からは、フィラメントに対して並列に入る NiO パルクの抵抗成分を除いてある。また、F2 の抵抗は F1 の抵抗に比べて十分大きく無視できるので、F1 と F2 (これらは並列に入る) がともに観察された素子にお

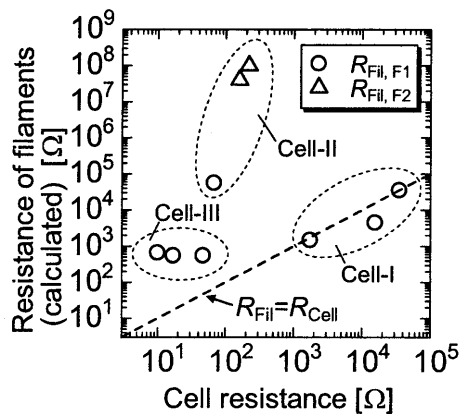


図 7. 式(1)より求めたフィラメントの抵抗率から計算したフィラメントの抵抗と、実際の素子抵抗との関係。

いては、F1 の抵抗値 $R_{Fil,F1}$ のみを記す。F1 が観察されなかった素子については F2 の抵抗値 $R_{Fil,F2}$ を示す。その結果、以下の 3 つの R_{Cell} の範囲で、 R_{Fil} と R_{Cell} との大小関係が大きく異なった。

- Cell-I: $R_{Cell} = 1.8 \text{ k} - 35 \text{ k}\Omega$,
 R_{Fil} は R_{Cell} と近い値となっている。
- Cell-II: $R_{Cell} = 67 - 220 \Omega$
 R_{Fil} は R_{Cell} に比べ極めて大きな値となっている。さらに、3 つの範囲の中で R_{Fil} が最も大きな値となった。
- Cell-III: $R_{Cell} = 10 - 50 \Omega$
 R_{Fil} は R_{Cell} よりも大きな値となっている。一方で、3 つの範囲の中で R_{Fil} の値は最も小さな値となった。

ほとんどの素子、特に最も R_{Cell} が大きな Cell-I の素子においても F1 が観察されている。そして、上述したように、F1 と F2 の抵抗率が 3 桁以上も異なるにもかかわらず、これらの中間的な抵抗率を有するフィラメントが観察されていない。以上のことから、低抵抗状態において、電流は $10 \text{ m}\Omega\text{cm}$ オーダの抵抗率を有する

フィラメント(F1)が担っており、各素子における R_{Cell} の違いは、フィラメントの抵抗率ではなくフィラメントの面積の違いによる影響が大きいと考える。以下では R_{Cell} と R_{Fil} との関係から、Cell-I, II, III それぞれの素子における、F1 の形状について検討する。

Cell-I の素子においては、 R_{Fil} の値は R_{Cell} の値と近い値となっている。したがって、図 8(a) に示すように、Cell-I の素子におけるフィラメントは、膜厚方向に断面積がほぼ一定である形状をしていると考える。

一方で、Cell-II および III の素子において R_{Fil} は R_{Cell} よりも大きな値となっている。これは、フィラメントの断面積が、膜厚方向に対して変化しているためであると考えられる。Cell-II, III の素子においては、 $R_{Cell} < R_{Fil} = \rho_{Fil} t / A_{Fil}$ 、すなわち一定断面積を仮定した場合のフィラメントの抵抗は、実際の素子抵抗よりも大きくなっている。したがって、Cell-II, III の素子においては、図 8(b), (c) に示すような、膜厚方向、すなわち上部電極(陽極)側から下部電極(陰極)側に向かうに従い、フィラメントが広がった形状になっていると考える。このような陰極側に近づくに従い断面積が広がったフィラメントの形状は、 TiO_2 において断面 TEM により観察されており [4]、 NiO においても同様の形状のフィラメントは形成されうると考える。

Cell-II の素子では観察された F1 の面積、すなわち陽極端における面積は極めて小さかった。また、 $R_{Cell} \sim 200 \Omega$ なる素子(図 7 に三角形で示したもの)においては、F2 のみが観察され、F1 は観察されなかった。そのため、 R_{Fil} は R_{Cell} に比べて極めて大きな値となった。すなわち、Cell-II の素子の陽極端におけるフィラメントの面積は小さく、図 8(b) に示すような、陰極側に向かうに従い極端に広がった形状をしていると考える。F1 が観察されなかった $R_{Cell} \sim 200 \Omega$ なる素子では、陽極端におけるフィラメントの面積がさらに小さく、検出できなかった可能性がある。ゆえに、Cell-II の素子においては、 R_{Cell} の減少に伴うフィラメントの断面積の増加は陽極側で顕著であると考えられる。なお、F1 が観察されなかった素子 ($R_{Cell} \sim 200 \Omega$) においても、主に F2 が電流を担っているとは考えにくい。なぜなら F2 の抵抗率は小さくても $200 \Omega\text{cm}$ であり、このフィラメント

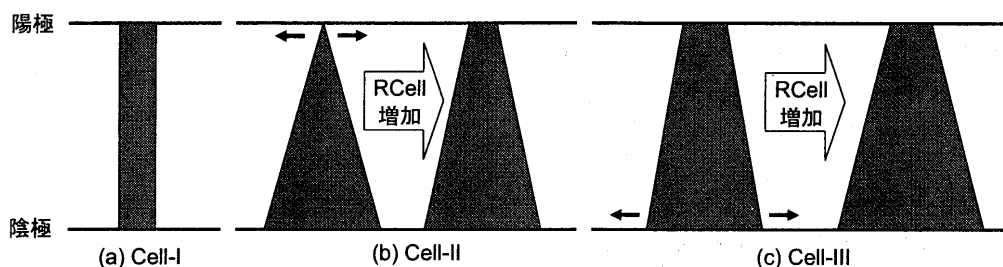


図 8. 素子抵抗の変化に伴うフィラメント形状変化の概念図。

が $200\ \Omega$ の抵抗を示すには、一様な断面形状を仮定しても $1000\ \mu\text{m}^2$ の面積が必要となるからである。

Cell-IIIの素子においては、 R_{Fil} の値は R_{Cell} よりも大きくなったものの、その値は、Cell-I, II, IIIの中で最も小さい。これは、陽極端におけるフィラメントの面積が最も大きいためである。一方で、 R_{Cell} の減少に対し、求めた R_{Fil} はほぼ同程度の値となっているのは、陽極端におけるフィラメントの面積がほとんど変化していないためである。したがって、図 8(c)に示すように、 R_{Cell} が小さくなるにつれ、フィラメントの面積は、陽極側ではほとんど変化せず、陰極側で大きくなっていると考える。

以上より、低抵抗状態の素子において電流を担っているのは、 $10\ \text{m}\Omega\text{cm}$ オーダの抵抗率を有するフィラメントであり、低抵抗状態における素子間での抵抗値の違いは、フィラメントの抵抗率の違いではなく、主にフィラメント面積及び形状の違いに起因するといえる。今後は、上部電極を陰極としてフォーミングを行い、 R_{Cell} と陰極端におけるフィラメントの面積について調べることで、本結果について更なる検討を行う。また、断面TEM等によって、フィラメントの断面形状について詳細に評価する必要がある。

4. まとめ

Pt/NiO/Pt 素子において、フォーミングに伴い素子の一部が変形することを見出し、この変形領域の近傍にフィラメントが存在することを確かめた。そして、上部電極除去後、この変形領域を C-AFM によって観察したところ、この変形は直径 $1\ \mu\text{m}$ オーダの隆起あるいは陥没であり、フィラメントは主にその周辺部に分布していることがわかった。さらに、低抵抗状態の素子においては、抵抗値によらず、ほとんどの素子で $10\ \text{m}\Omega\text{cm}$ オーダの抵抗率を有するフィラメントが存在しており、電流は主にこのフィラメントによって担われていることがわかった。そして、低抵抗状態の素子抵抗と式(2)より求めたフィラメントの抵抗との関係から、低抵抗状態の素子間における抵抗値の違いは、フィラメントの面積および形状の変化に起因することが示唆された。

文 献

- [1] K. Tsunoda, K. Kinoshita, Y. Yamazaki, T. Izuka, Y. Ito, A. Takahashi, A. Okano, Y. Sato, T. Fukano, M. Aoki, and Y. Sugiyama, "Low power and high speed switching of Ti-doped NiO ReRAM under the unipolar voltage source of less than 3 V," Tech. Dig. Int. Electron. Devices Meet., pp.767-770, Washington, DC, Dec., 2007.
- [2] J. F. Gibbons and W. E. Beadle, Switching properties of thin NiO films, Solid-State Electron., vol.7, no.11, pp.785-797, Nov., 1964.
- [3] B. J. Choi, D. S. Jeong, S. K. Kim, C. Rohde, S. Choi, J. H. Oh, H. J. Kim, C. S. Hwang, K. Szot, R. Waser, B. Reichenberg, and S. Tiedke, Resistive Switching Mechanism of TiO_2 Thin Films Grown by Atomic-Layer Deposition, J. Appl. Phys., vol.98, no.3, pp.033715-1-033715-10, Aug., 2005.
- [4] D. -H. Kwon, K. M. Kim, J. H. Jang, J. M. Jeon, M. H. Lee, G. H. Kim, X. -S. Li, G. -S. Park, B. Lee, S. Han, M. Kim, and C. S. Hwang, Atomic structure of conducting nano-filaments in TiO_2 resistive switching memory, Nature Nanotechnol., vol.5, no.2, pp.148-153, Feb., 2010.
- [5] H. Kondo, M. Arita, T. Fujii, H. Kaji, M. Moniwa, T. Yamaguchi, I. Fujiwara, M. Yoshimaru, and Y. Takahashi, The observation of "conduction spot" on NiO resistance random access memory, Jpn. J. Appl. Phys., vol.50, no.8, pp.081101-1-081101-6, Aug., 2011.
- [6] R. Muenstermann, T. Menke, R. Dittmann, and R. Waser, Coexistence of filamentary and homogeneous resistive switching in Fe-doped SrTiO_3 thin-film memristive devices, Adv. Mater., Vol.22, no.43, pp.4819-4822., Nov., 2010.
- [7] J. J. Yang, F. Miao, M. D. Pickett, D. A A Ohlberg, D. R Stewart, C. N. Lau, and R. S. Williams, The mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches, Nanotechnology, vol.20, no.21, pp.215201-1-215201-9, May, 2009.
- [8] T. Iwata, Y. Nishi, and T. Kimoto, Effects of heat treatment on the resistive switching characteristics of Pt/NiO/Pt stack structures, Jpn. J. Appl. Phys., vol.50, no.8, pp.081102-1-081102-4, Aug., 2011.
- [9] G. -H. Buh, I. Hwang and B. H. Park, Time-dependent electroforming in NiO resistive switching devices, Appl. Phys. Lett., Vol.95, No.14, pp.142101-1-142101-3, Oct., 2009.
- [10] P. De Wolf, T. Clarysse, and W. Vandervorst, Quantification of nanospredding resistance profiling data, J. Vac. Sci. Technol. B, vol.16, no.1, pp.320-326, Jan., 1998.