異種金属微細接合角部の電子流集中による原子集積とマイクロ材料創製

Utilization of Concentration of Electron Flow near a Corner Composed of Dissimilar Metallic Materials for Accumulation of Atoms and Fabricating Micro-materials

○学 木村 康裕 フェロー 坂 真澄

Yasuhiro KIMURA, Tohoku University, Aoba 6-6-01, Aramaki, Aoba-ku, Sendai
Masumi SAKA, Tohoku University

Key Words: Electromigration, Atomic diffusion, Concentration of electron flow, Dissimilar materials, Conductive passivation

1. 緒言

エレクトロマイグレーション(Electromigration: EM)は、高密度電流下における原子の拡散現象である。EM は電流が印加される金属配線において、一部ではボイドと呼ばれる原子損失を、一部ではヒロックと呼ばれる原子蓄積を引き起こすことが知られている。EM によるボイドおよびヒロックはそれぞれ電子デバイス等において断線や短絡を引き起こすことから、EM は電子デバイスにとっての害悪因子として捉えられ、EM の発生を抑制するための研究が行われてきた^{(1),(2)}。例えば、角部近傍では電流密度が集中⁽³⁾することから EM の発生箇所の一つとして予測されており、角部近傍における EM 損傷を対象とした理論的アプローチがなされている⁽⁴⁾。一方で、EM を有効に活用しようと考案された手法の一つに EM による微細材料の創製が挙げられる⁽⁵⁾。

微細材料はその優れた諸特性⁽⁶⁾から注目が集まっており、多様な元素の微細材料が様々な製法により創製されている。しかし Al のような化学的反応性の高い材料では化学的手法での微細材料創製が難しい。EM による微細材料創製はそれらを克服しつつ、任意の決められた箇所へ高純度な高アスペクト比を有する単結晶 Al 微細材料の創製が可能である^{(5),(7),(8)}。しかしながら、一度に大量の材料創製が困難であるという欠点があった。これまで 2 本の Al 微細材料同時創製には成功しているものの⁽⁹⁾、複数の Al 微細材料同時創製には未だ成功していない。

本研究では、EM による複数 Al マイクロ材料の同時創製を実現するために導電性保護膜および櫛状サンプル構造を導入し創製を試みた。また導電性保護膜の導入が Al マイクロ材料創製へ与える影響を、TiN/Al 接合部の角部近傍における電子流集中に着目し調査した結果を報告する。

2. 原理

EM による Al マイクロ材料の創製原理は既に報告されている通りであるが⁽⁵⁾、従来報告されている創製手法は非導電性保護膜を用いたものであった。本研究で用いる導電性保護膜は、非導電性保護膜に比べ数々の利点を有しており⁽⁸⁾、TiN を導電性保護膜として導入することで、電子流集中に起因した Al マイクロ材料の創製促進が予測される。電子流は EM の駆動力の一部であるから、EM による原子拡散は電流密度に大きく依存する。加えて、角部近傍では電子流集中が起こることが知られており⁽³⁾、角部では EM による原子拡散が起こりやすい。導電性保護膜の導入によりこれを積極的に利用することが可能であると予想する。Fig. 1(a)および(b)に創製用サンプル構造の模式図を、(c)および(d)に創製箇所付近の断面図における電子流集中の模式図を示す。Fig. 1(c), (d)はそれぞれ導電性保護膜を用いた本手法、非導電性保護膜を用いた従来手法によるものである。TiN は Al に比べて約 10 倍と高い電気抵抗率を有しており⁽¹⁰⁾、優先的に Al へ電子流は誘導される。スリット近傍では導電性保護膜によって下面の TiN バイパス層への電子流入のみならず上面 TiN 保護膜への電子流入が予測され、角部でより集中することから EM による材料創製を促進することが予測される。

Fig. 1 Schematic illustrations of the sample structure: (a) top view, (b) cross-sectional view, (c) the fabrication of Al micro-materials by the concentration of electron flow near the corner using the conductive passivation, and (d) the fabrication of Al micro-materials by the concentration of electron flow near the corner using the nonconductive passivation.

3. 実験方法

実験に使用した創製用サンプルの FE-SEM 像を Fig. 2(a)に示す。そのサンプルを以下の手順で作製した。熱酸化炉により絶縁膜として Si ウェハ上に 300 nm の SiO₂ 膜を形成した。その上にスパッタリング装置により密着改善層として Ti を 300 nm、バイパス層として TiN を 300 nm、創製対象材料として Al を 600 nm と順に成膜し、フォトリソグラフィにより櫛状 Al パターンを作製した。その後、導電性保護膜として TiN を 3 μm 成膜し、集束イオンビーム(Focused ion beam: FIB)により Al 原子の排出孔となる 1.5 μm 四方の微小孔を設けた。完成したサンプルをセラミックヒータ上で 753 K で加熱しながら、900 mA の電流を通電用プローブから印加し 60 min 通電した。

4. 実験結果および考察

実験後のサンプルの FE-SEM 像を Fig. 2(b)に、実験により創製された複数 Al マイクロ材料を Fig. 2(c)に示す。導電性保護膜および櫛状サンプル構造を導入した本実験により 10 本の Al マイクロ材料の同時創製に成功した。Fig. 3 に EDX (Energy dispersive X-ray)による元素分析結果を示す。これから創製された材料が Al であることがわかる。

従来では成し得なかった複数 Al マイクロ材料の同時創製に成功した鍵は、導電性保護膜の導入にある。2 本の Al マイクロ材料の同時創製に成功した従来研究⁽⁹⁾では、Al 配線の直列または並列アレイ構造を用いていた。しかし非導電性保護膜を用いていたことから、電子流入出力用電極パッドの露出工程が必要でありプローブは直接 Al と接触していた。この実験において、プローブとの接触抵抗や過剰な電流の印加などでジュール熱が誘起され、融点の低い Al が溶融しパッドが溶断する事例が起きていた。

Fig. 2 FE-SEM images: (a) the sample pattern before the experiment, (b) the sample pattern after the experiment, and (c) the formed multiple Al micro-materials.

Fig. 3 The results of the EDX analysis: (a) FE-SEM image of the formed multiple Al micro-materials, (b)-(d) EDX mapping images of Al, Ti, and N elements, correspondingly.

導電性保護膜の導入は、保護膜上から直接電子流を入出力可能なことから、露出工程を不要とするなど多くのサンプル作製工程の短縮に貢献する⁽⁸⁾一方で、プローブとの接触面が高融点材料である TiN 保護膜であるためにパッドの溶断も防止するなど、EM による複数マイクロ材料創製における問題点も解決した。

一方で、前述のように角部近傍において電流集中が起きることが知られている。Huntington-Grone の式⁽¹¹⁾で知られているように EM による原子拡散は電流密度に依存するため、電流密度が大きいほどよく拡散する。導電性保護膜の導入は、Fig. 1(c)のように異種金属同士で構成された創製箇所付近で Al 上面および下面で電子流の導通路である角部を有することとなり、上下面角部での電流集中が予測される。更に Al 上面角部への電子流誘起は、Al の排出方向つまり鉛直上方向への原子拡散を促し、Al 原子を効率的に排出しマイクロ材料の創製を促進させると考えられる。

ここで、実験に用いた Fig. 1(a)-(b)に示すようなサンプル構造をモデルとし、有限要素解析(Finite element analysis: FEA)により創製箇所付近での電流密度分布を求めた。FEA には汎用有限要素解析ソフト MSC.Marc を使用し、各物性値には電気抵抗率 $\rho_{Al}=27 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$, $\rho_{TiN}=250 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ を用いた。作製した解析モデルは、実際の多層構造サンプルを模し、下層の Ti より上の TiN/Al/TiN 構造を対象とした。解析結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 で示される値は電流密度の大きさを表す。Fig. 4(a)に Al パターン内部での電流密度分布を、(b)は A-A 断面での電流密度分布を、(c)は A-A 断面における角部近傍の電流密度分布を示す。Fig. 4(c)から、予想されたように角部近傍での電

Fig. 4 The results of FEA for current density distribution: (a) a cutting plane of the whole structure, (b) A-A cross-sectional view, and (c) magnified image near the corner consisting of dissimilar materials, TiN under layer, Al pattern and TiN passivation.

流密度集中が確認され、更に上面角部近傍での電流密度が多く確認されることから鉛直上方向への原子拡散が促されているといえる。導電性保護膜導入によって、角部近傍での電流密度集中つまり電子流集中を積極的に利用できることとなり、単数のみならず複数 Al マイクロ材料の創製を可能にした。

5. 結言

本研究では、エレクトロマイグレーション(EM)による複数 Al マイクロ材料を同時に創製することを主の目的とし、実現するために導電性保護膜の導入およびそれに伴う角部近傍の電子流集中の利用を試みた。高融点材料である TiN を導電性保護膜として導入することで、これまで問題であった複数創製における諸問題を解決し、創製箇所付近における角部近傍での電子流集中を効果的に利用できることがわかった。その結果、これまで実現が難しかった複数 Al マイクロ材料の創製に成功した。

本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)23360050 によることを記し、感謝の意を表す。また本研究の一部は東北大学大学院工学研究科附属マイクロ・ナノマシニング研究教育センターおよび東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システムを利用して行われた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) H.B. Huntington, in: *Diffusion in solids*, edited by A.S. Nowick and J.J. Burton, Academic Press Inc., New York (1975) 303.
- (2) H. Ceric and S. Selberherr, *Mater. Sci. Eng. R*, **71** (2011) 53.
- (3) C.M. Tan, S. Member, A. Roy, et al., *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, **5** (2005) 198.
- (4) X. Zhao, Y. Kimura and M. Saka, Analyzing Electromigration near a Right-angled Corner Composed of Dissimilar Metals by Investigating the Effect of Material Combination on Atomic Flux Divergence, (2014) submitted.
- (5) M. Saka and R. Nakanishi, *Mater. Lett.*, **60** (2006) 2129.
- (6) J. Sarkar, G.G. Khan and A. Basumallick, *Bull. Mater. Sci.*, **30** (2007) 271.
- (7) Y. Lu, H. Tohmyoh and M. Saka, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44** (2011) 045501.
- (8) Y. Kimura and M. Saka, *Mater. Lett.*, **116** (2014) 278.
- (9) R. Zanma and M. Saka, *Int. J. Mater. Struct. Integrity*, (2014) accepted.
- (10) K. Yokota, K. Nakamura, T. Kasuya, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37** (2004) 1095.
- (11) H.B. Huntington and A.R. Grone, *J. Phys. Chem. Solids*, **20** (1961) 76.