

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289001

研究課題名(和文) 金属薄膜・微細ボール表面の最適被覆に着目したマイグレーションの抑制と活用

研究課題名(英文) Suppression and Utilization of Migration Phenomena Based on Control of Passivation for Metallic Thin Film and Micro Ball

研究代表者

坂 真澄 (SAKA, Masumi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20158918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では材料表面の被覆に注目して電子流による原子移動であるエレクトロマイグレーション(EM)の抑制と活用，そして静水圧勾配によるストレスマイグレーション(SM)の活用を扱った。抑制では，保護膜被覆金属薄膜配線やアンダーフィルで拘束/被覆されたはんだボールにおけるEM損傷を扱い，被覆により形成される材料内の原子濃度分布に注目して，損傷が生じる電流密度の限界値であるしきい電流密度の特徴づけを推進した。活用では，保護膜の制御を踏まえたEM，SMによる金属マイクロ材料創製の展開を推進した。

研究成果の概要(英文)：Suppression and utilization of electromigration (EM), which is a phenomenon of atomic diffusion due to electron flow in high density, and utilization of stress migration (SM) caused by a gradient of hydrostatic stress were studied by considering the effect of passivation on these migration phenomena. Regarding the suppression, EM damages of void and hillock in passivated metallic thin-film lines and solder balls covered with underfill material were treated. Here, the threshold current density, which is the critical value of current density for the initiation of damages, was characterized based on the distribution of atomic density in a material covered with passivation. Regarding the utilization, on the other hand, fabrication of metallic micro materials based on EM or SM with the controlled use of passivation was demonstrated.

研究分野：材料力学

キーワード：金属薄膜配線 はんだボール エレクトロマイグレーション ストレスマイグレーション 金属マイクロ材料

1. 研究開始当初の背景

エレクトロマイグレーション(EM)による原子流束の駆動力は電子流であるが、材料表面が保護膜により被覆されていれば原子移動により原子の濃度勾配が生じ、それにより原子流と逆方向にバックフローと呼ばれる原子移動が起こる。ここで電子流による原子移動とバックフローによる原子移動がバランスすると原子移動は起きなくなる。電流密度が増加すると、より大きな濃度勾配でこのバランスが生じることになる。

ところで材料表面上に原子が蓄積した塊状のもの(ヒロック)の生成が起きる原子濃度の限界値 N_{max} が存在する。 N_{max} は無負荷状態での原子濃度 N_0 より大きく、保護膜のヒロック生成阻止強度が大きければ大きいほど大きくなり、ヒロックは生成しにくくなる。質量保存よりヒロック生成と対になって別の箇所です空孔(ポイド)形成が生じる。

配線長に応じて生じる原子濃度の最大値が N_{max} に達した時点でヒロックの生成、そしてそれを反映してポイド形成が起こる。そのときの電流密度がしきい電流密度 j_{th} である。なおポイド形成はそれに対する原子濃度の限界値 N_{min} が存在し、原子濃度の最小値が N_{min} より小さくなった時点で生じている。

以上の得られている基本的知見の整理を踏まえ、次のステップとして重要になるのが、複数の主要因子を的確に統合して損傷抑制策の決定に簡潔に答えられるようにすることである。

一方、種々の環境から微細配線を守るのが保護膜の役割であり、保護膜は非導電性というのは当然の考えと思われ、 S_iO_2 膜が従来使われてきたが、申請者らは最近あえて常識をくつがえし上記創製にあたり導電性保護膜を導入することで、通電対象部の一部が断線した場合にも従来に比べ顕著に継続した通電が可能であるようにし、サンプル作製に係る時間も大幅に短縮して金属マイクロ材料創製の大量化実現のきっかけを作った。

本研究は以上の研究より見えてきた表面被覆が原子拡散に担う役割の大きさに着目し、抑制と活用を最適に行うことを目指すものである。

2. 研究の目的

本研究は、電子流による原子移動現象であるEMと静水圧勾配によるストレスマイグレーション(SM)を対象とする。以下に記す抑制と活用なる二つの目的に対し、材料表面の最適被覆に着目した研究を推進する。抑制については、金属薄膜配線やはんだボールにおける信頼性上の問題であるEM損傷を扱い、しきい電流密度を特徴づける指標の構築を推進する。これにより、いかにすれば損傷を起きにくくできるかとの問いに、被覆により生じる原子濃度分布に注目して簡潔に答えることを目指す。活用では、導電性保護膜の導入なる斬新な考案によるEM、および極薄

の人工保護膜の制御によるSMを有効利用した金属マイクロ材料創製の展開を目指す。

3. 研究の方法

保護膜被覆金属薄膜配線およびアンダーフィルで拘束/被覆されたはんだボールにおけるEMの抑制策の決定に簡潔に答えることを目指し、材料表面の被覆が原子拡散に担う役割の大きさに着目して、部材に応じて与えられる条件下でそれを最適に行うことについて研究を実施した。一方、有効利用に関し、導電性保護膜を導入したEM活用、極薄の人工保護膜において静水圧勾配を制御したSMの活用、による金属マイクロ材料創製の展開について研究を実施した。3年継続で、(1)金属薄膜配線・はんだボールにおけるEMの抑制、(2)EM活用・(3)SM活用による金属マイクロ材料創製の展開、(4)最適被覆の指針作成、なる4項目の研究を推進し、目的の達成を図った。

4. 研究成果

(1)金属薄膜配線・はんだボールにおけるEMの抑制

ビア接続配線の j_{th} 評価に先立ち、両端がパッドに接続された配線を対象とした原子濃度分布形成の数値シミュレーションを実施した。電流密度の大小によらずパッド接続配線の場合には、ビア接続配線と異なり、原子濃度分布が定常状態に達することはなく、保護膜被覆下あるいはパッド露出下のEM損傷の臨界原子濃度に達し損傷が発生する、すなわち j_{th} が存在しないことが確かめられた(図1)。さらに両端がビア接続された配線を対象として、数値シミュレーションによる保護膜厚さを考慮した j_{th} の評価に成功した。

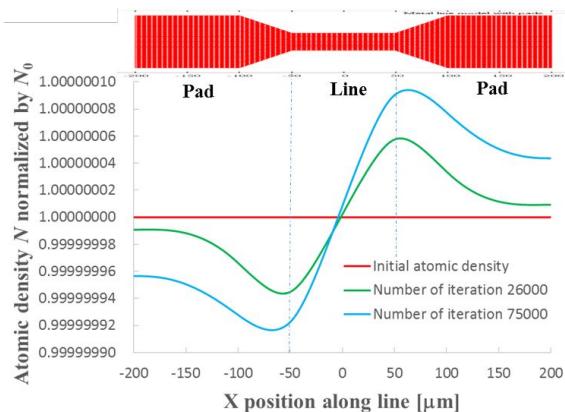


図1 パッド接続配線の原子濃度分布変化

実験では、TEOS膜を保護膜としたAl直線状配線サンプルを作製して、通電実験に供し、 j_{th} と配線長 l の積 ($j_{th} \cdot l$) を評価量として採用し、 $j_{th} \cdot l$ と5つの保護膜厚さ(260、560、780、1700、2800 nm)および5つの基板温度(473、523、573、623、663 K)の関係性を調べて、効果的なEM損傷抑制に資する実績を得た。

保護膜厚さについて、配線側面部を覆う厚さに保護膜が堆積することで、 $j_{th}l$ の大幅増加を促し EM 損傷の顕著な抑制に繋がることを見出した。また基板温度について、温度の低下で $j_{th}l$ が増加することを実験的に確認し、Al の電気抵抗率、体積弾性率および保護膜硬さに着目した影響因子の特定を試みた。

はんだの EM に関しては、バックフローのサンプル長さ依存性に着目した最小長さが 50 μm のはんだ接合を含め、異なる長さを有する直線型はんだ接合試験片を開発した (図 2a, b 参照)。これによりはんだの EM 評価を従来よりも効率的に行うとともに、EM およびバックフローに支配される原子ドリフト速度を測定することにより、EM 損傷発生の臨界条件を高精度に推定することを実現した。当該臨界条件から求めたしきい電流密度を評価指針とし、アンダーフィル材における EM 抑制効果の評価手法を確立した。

次世代低温はんだである Sn58Bi (wt%) はんだを用いた試験片にアンダーフィル材を被覆し (図 2c 参照) 酸化膜の場合 (アンダーフィル材被覆なしの場合) と比較した。被覆ありのはんだではしきい電流密度が 37-55% 向上したことを見出し、アンダーフィル材をはんだの保護膜とすることによる EM 抑制効果を実証した。またアンダーフィル材がヒートシンクとして機能し、はんだの溶断耐性を向上させることも見出した。

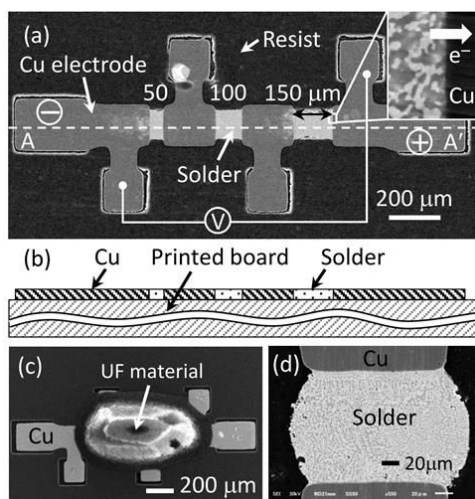


図 2 開発した試験片の例：(a) 平面図、(b) A-A' 断面の模式図、(c) アンダーフィル材被覆、(d) 被覆なしのたる型サンプル (a)-(c) are reprinted with permission from (1, 2). Copyrights (2016, 2017), The Minerals, Metals & Materials Society)

上記の試験片構造に基づいて、はんだボールを模擬したたる型サンプルの作製にも成功した (図 2d 参照)。さらに理論的考察と数値シミュレーションにより、保護膜付き直線型サンプルの場合に比べ、保護膜付きたる型サンプルではしきい電流密度が向上するという推測を得た。これとともに、直線型はん

だの EM 損傷発生の臨界条件に基づいて、直線型およびたる型はんだの電気問題を扱った数値シミュレーションの解析結果より、複雑な形状により解析が従来困難であったたる型はんだの EM 損傷発生の臨界条件を簡潔に予測できる手法を開発した。

また直径 25 μm の Cu マイクロ細線に電流を付与して生じるジュール熱を利用して、当該細線を高速に熱処理することに成功した (図 3)。さらに当該熱処理や EM 損傷においても重要な温度分布に関して、実測した金属細線の導電率の温度依存性と、通電下において細線表面上の 2 点間で測定した電位差より、細線内部の温度分布を予測することにも成功した。

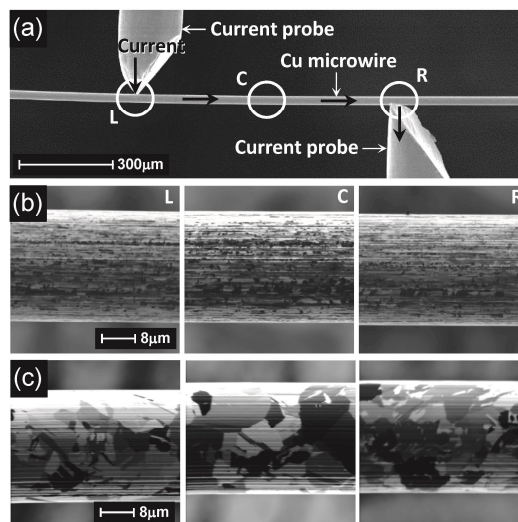


図 3 電流を用いた Cu マイクロ細線の熱処理：(a) 実験配置、(b) 通電前の結晶組織、(c) 1 分間通電後の結晶組織 (Reprinted with permission from (14). Copyright (2015), The Japan Society of Applied Physics)

(2) EM 活用による金属マイクロ材料創製の展開

EM による金属マイクロ材料創製において、これまで課題とされてきた生産性向上ならびにマイクロ材料への高機能性および規則性付与を目指した創製手法およびサンプル構造の開発を試みた。

TiN を導電性保護膜とした Al 配線に対して、申請者ら考案による櫛状パターンを用いたアレイ構造を導入することで、従来実現できていなかった 50 個のマイクロ材料 (直径: 2 μm の球、またはワイヤ、図 4a 参照) の同時創製に初めて成功した。また Al 配線を重ねた積層構造を新規に導入し、その有用性をマイクロ材料創製を通じて確認した。

異なる方面からの取り組みとして、導電性保護膜付き Al 配線を Si ウェハへ埋め込み、アレイ構造に適用した新たなサンプル構造を開発した (図 4b 参照)。前述の通り導電性保護膜には継続した通電とサンプル作製に係る時間短縮の効果があるが、一方で Al 配

線から導電性保護膜内への電流の漏れによって創製に要する電流量の増大を招いていたが、サンプル構造開発によりこれを克服し、マイクロ材料創製に必要な電流量の大幅な削減に成功した。また化学センサに代表されるマイクロ材料のデバイスへの応用を目指した際に、求められる高機能性付与を達成するためには、任意方向へマイクロ材料を自由に創製できる手法提案が重要だと考える。そこで、これまで基板に対して垂直でのみ創製してきたマイクロ材料創製用サンプル構造について、基板に対して水平方向へのマイクロ材料創製を可能にする新たなサンプル構造ならびにその作製手法を考案して、創製実験に供し、水平方向にマイクロ材料を創製することに成功した(図4c参照)。

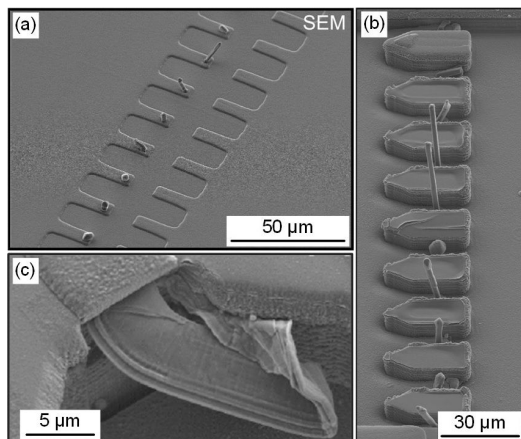


図4 創製したAlマイクロ材料例：(a) 50個創製用アレイ構造による創製例、(b) 埋込構造による創製例、(c) 水平方向への創製例

(3) SM 活用による金属マイクロ材料創製の展開

電子デバイスへ応用を拡張するため、導電性多層薄膜構造を提案して、熱処理することでSMによる銀微細材料の創製に挑戦し、表面保護膜の種類と厚さがもたらす影響を説明した。

まずCu箔を基板として、順次にTi、Ag、PtもしくはTiNを堆積し、保護膜(PtあるいはTiN)/目的金属薄膜(Ag薄膜)/吸着層(Ti膜)/導電性基板(Cu箔)なる導電性多層構造を持つ薄膜サンプル2種類を作製した。次に、これらのサンプルを用い異なる温度で加熱することでSMを誘起させ、構造の表面変化を観察し銀微細材料の創製を確認した。

延性保護膜Ptを用いた構造A(すなわちPt/Ag/Ti/Cu)において、Pt薄膜が薄い(2nm)場合には銀ナノ粒子(直径: ~300nm、図5a, b参照)、厚い(20nm)場合には銀ナノワイヤ(直径: ~150nm、長さ: ~15μm)の創製が実現できた。一方、脆性保護膜TiNを用いた構造B(すなわちTiN/Ag/Ti/Cu)において、TiN薄膜が薄い(2nm)場合には銀マイクロ粒子(直径: ~1.6μm、図5c, d参照)が創製された。またTiN薄膜が厚い(600nm)場合

には銀マイクロワイヤ(直径: 1~2μm、長さ~680μm)を創製することに成功した。

これらの違いは銀原子排出用の通路を提供する保護膜自体の特性が異なるためと考えられる。Ptの場合は、応力勾配により蓄積した銀原子が容易にPt層に拡散し、Pt薄膜にあるWeak Spotから排出し微細材料が形成される。一方、TiNの場合、高温における脆性破壊が誘起するき裂から蓄積した原子が排出し微細材料が形成される。

ここでいずれの保護膜も厚くなると、微細材料を作製するための臨界温度が高くなる。また温度の上昇につれて、作製したAg微細粒子のサイズと数が増えることがわかった。

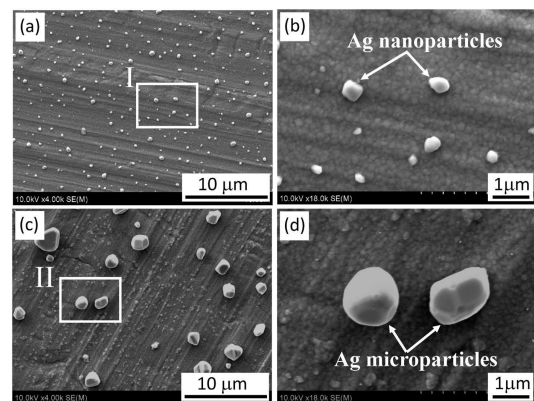


図5 作製したAg微細粒子例：(a, b) 構造A上のAgナノ粒子、(c, d) 構造B上のAgマイクロ粒子(Reprinted with permission from (11). Copyright (2015), Elsevier)

(4) 最適被覆の指針作成

EMによる原子蓄積に起因して保護膜に生じる応力について理論モデルを構築することで、 j_{th} と保護膜厚さの関係を理論的に説明することに成功し、最適な保護膜被覆指針を提案した。保護膜がEM損傷抑制に寄与することは先に述べた通りだが、その膜厚を厚くすると抑制効果が飽和してしまうことが知られていた。その理由を、構築した力学的理論モデルならびに実験結果の検証により説明し、効果的な抑制効果を得る最適保護膜厚さ決定理論を提案した。これはマイクロ材料創製の面でも有用な知見である。上記にて構築した理論モデルは、保護膜が破壊される臨界の保護膜厚さを与えることと同義であり、これを用いれば保護膜を破壊することなくマイクロ材料の創製が可能な被覆厚さを決定することができる。

また一般的な電子デバイスに広く用いられている多層構造は電流密度集中を引き起こす角部を多く有していることから、異種金属接合角部近傍における理論解析を実施した。保護膜なしでは原子流束を、保護膜付きでは原子濃度分布を扱うことで、EM損傷抑制のための材料組合せ決定指針を、解析解の導出を通じて提案した。これを踏まえ、保護膜の有無で角部近傍における原子蓄積挙動

が顕著に変化することを初めて理論的に説明し、保護膜被覆の重要性を説いた。

また j_{th} を簡易評価するためのパラメータを導入した。数値シミュレーションによる j_{th} の評価結果を保護膜厚さ t 、配線長 l 、動作温度 T_s の設計因子により決まる評価パラメータ値 f により整理したところ、一つの線形関係が得られ(図6) その有効性を確認した。

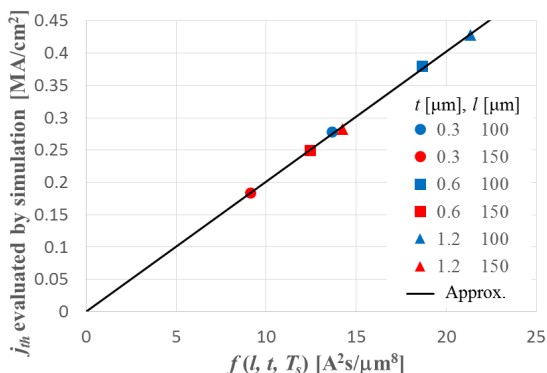


図6 簡易評価パラメータ値 f と j_{th} の関係 ($T_s = 473K$)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

- (1) X. Zhao, S. Takaya, M. Muraoka, Electromigration Critical Product to Measure Effect of Underfill Material in Suppressing Bi Segregation in Sn-58Bi Solder, Journal of Electronic Materials, 査読有, 2017, 8pages, 印刷中
DOI: 10.1007/s11664-017-5507-8
- (2) X. Zhao, M. Muraoka, M. Saka, Length-dependent Electromigration Behavior of Sn58Bi Solder and Critical Length of Electromigration, Journal of Electronic Materials, 査読有, Vol.46, No.2, 2017, pp. 1287-1292
DOI: 10.1007/s11664-016-5093-1
- (3) H. Kikuchi, K. Sasagawa, K. Fujisaki, Evaluation of Threshold Current Density of Electromigration Damage Considering Passivation Thickness, 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEESE 2016), Conference Paper Collection, 査読有, USB, 2016, pp.189-192
DOI, URL なし
- (4) M. Saka, Y. Kimura, X. Zhao, Theoretical Consideration of Electromigration Damage around a Right-angled Corner in a Passivated Line Composed of Dissimilar Metals, Microsystem Technologies, 査読有, 2016, 8pages (Online)
DOI: 10.1007/s00542-016-3178-7
- (5) S. Sato, K. Fujisaki, K. Sasagawa, Damage of Single-wall Carbon Nanotube Network Structure under Electric Current Loading, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol.3, No.6, 2016, pp.16-00292 (1-8)
DOI: 10.1299/mej.16-00292
- (6) Y. Kimura, H. Ikadai, T. Nakakura, M. Saka, Suitable Passivation Thickness on a Metal Line to Prevent Electromigration Damage, Materials Letters, 査読有, Vol.184, 2016, pp.219-222
DOI: 10.1016/j.matlet.2016.08.059
- (7) Y. Li, H.-T. Lee, M. Saka, Influence of Local Thermal Dissipation on Electromigration in an Al Thin-film Line, Microelectronics Reliability, 査読有, Vol.65, 2016, pp.178-183
DOI: 10.1016/j.microrel.2016.08.002
- (8) H. Ikadai, Y. Kimura, M. Saka, Effect of Temperature on Preventing Electromigration Damage Based on Increasing Threshold Current Density in a Thin Metal Passivated Line, Mechanical Engineering Letters, 査読有, Vol.2, 2016, pp.15-00714(1-7)
DOI: 10.1299/mel.15-00714
- (9) Y. Lu, Y. Li, M. Saka, Forming Long Ag Thin Wires by Using Stress Migration, Materials Letters, 査読有, Vol.171, 2016, pp.72-74
DOI: 10.1016/j.matlet.2016.02.064
- (10) K. Fujisaki, H. Narita, K. Sasagawa, Numerical Analysis of Allowable Current Density for Electromigration of Interconnect Tree Structure with Reservoir, Proceedings of ASME 2015 InterPACK/ICNMM, 査読有, Vol.2, 2015, pp.V002T02A015(1-5)
DOI: 10.1115/IPACK2015-48744
- (11) Y. Lu, Y. Li, M. Saka, Growth of Ag Micro/Nanoparticles Using Stress Migration from Multilayered Metallic Structure, Applied Surface Science, 査読有, Vol.351, 2015, pp.1011-1015
DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.06.037
- (12) H. Tohmyoh, T. Sunagawa, A Parameter Governing the Melting Induced at the Micrometer Level in a Dissimilar Metal Wire System by Joule Heating, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.117, No.23, 2015, pp. 234901(1-6)
DOI: 10.1063/1.4922633
- (13) T. Sunagawa, H. Tohmyoh, Welding Dissimilar Metal Microwires by Joule Heating, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.54, No.6S1, 2015, pp. 06FL01 (1-5)
<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.54.06FL01>
- (14) H. Tohmyoh, Y. Matsudo, Fast and Uniform Heating of Cu Microwires Using Electrical Current, Applied Physics Express, 査読有,

〔学会発表〕(計 37 件)

- (1) 燈明泰成, 異種金属のマイクロ細線をジュール熱により接合するのに必要な電流について, 日本機械学会 第 24 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P 2016), 2016 年 11 月 25 日~26 日, 早稲田大学(東京都・新宿区)
- (2) 水科拓己, 菊池大樹, 笹川和彦, 藤崎和弘, 折れ曲がりサブミクロン電子配線におけるエレクトロマイグレーション損傷しきい電流密度の評価, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会, 2016 年 9 月 22 日~24 日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)
- (3) H. Kikuchi, K. Sasagawa, K. Fujisaki, Effect of Taper Shape of IC Line on Threshold Current Density of Electromigration Damage, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016 (APCFS2016) (国際学会), 2016 年 9 月 19 日~22 日, Toyama International Conference Center (富山県・富山市)
- (4) M. Saka, Effect of Passivation on Suppression or Utilization of Atomic Migration Phenomena in Metallic Thin-film Materials, 6th Int.Conf. and Exhibition on Materials Science and Engineering (Materials Science 2016) (招待講演)(国際学会), 2016 年 9 月 12 日~14 日, Hilton Atlanta Airport, Atlanta (USA)
- (5) X. Zhao, S. Takaya, M. Muraoka, Electromigration in Eutectic Sn58Bi Solder Strips, 2016 M&M International Symposium for Young Researchers (国際学会), 2016 年 8 月 10 日~12 日, State University of New York at Stony Brook, New York (USA)
- (6) 趙 旭, 村岡幹夫, 異なる長さを有する極微小はんだ接合における高密度電流下の損傷の同時評価, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015 年 11 月 21~23 日, 慶應義塾大学(神奈川県・横浜市)
- (7) 坂 真澄, 金属薄膜内マイグレーションの抑制と活用における保護膜の役割, 日本機械学会 第 23 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2015)(招待講演), 2015 年 11 月 13 日~15 日, 広島大学(広島県・東広島市)
- (8) 燈明泰成, 松土陽平, 電流付与下における金属極細線の微細結晶粒の成長について, 日本機械学会 第 23 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2015), 2015 年 11 月 13 日~15 日, 広島大学(広島県・東広島市)
- (9) 趙 旭, 村岡幹夫, 高密度電流下 Sn58Bi はんだのエレクトロマイグレーション発生臨界長さ, 日本機械学会 第 23 回機

械材料・材料加工技術講演会 (M&P2015), 2015 年 11 月 13 日~15 日, 広島大学(広島県・東広島市)

- (10) H. Tohmyoh, Y. Matsudo, Structural Modification of Cu Microwires Having Nanosized Grains Using Joule Heat, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM'15) (国際学会), 2015 年 10 月 4 日~8 日, Loisir Hotel Toyohashi (愛知県・豊橋市)
- (11) K. Fujisaki, K. Sasagawa, H. Narita, Evaluation of Allowable Current Density for Electromigration Damage in Via-connected Interconnect, 17th International Conference on Electronics Materials and Packaging (EMAP2015) (国際学会), 2015 年 9 月 1 日~4 日, Portland State University, Portland (USA)
- (12) Y. Kimura, H. Ikadai, M. Saka, K. Sasagawa, H. Tohmyoh, An Effective Way to Increase Threshold Current Density against Electromigration of a Metal Line, 11th Int. Conf. Diffusion in Solids and Liquids (国際学会), 2015 年 6 月 22 日~26 日, NH München Messe, Munich (Germany)

〔その他〕

東北大学工学研究科 坂/燈明研究室 公式 Web ページに学術論文リスト掲載

<http://king.mech.tohoku.ac.jp/saka/index.htm>

東北大学研究者紹介 Web ページに同大学所属の研究代表者, 分担者の論文リスト等を掲載

<http://db.tohoku.ac.jp/whois/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂 真澄 (SAKA, Masumi)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 20158918

(2) 研究分担者

燈明 泰成 (TOHMYOH, Hironori)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50374955

(3) 研究分担者

笹川 和彦 (SASAGAWA, Kazuhiko)

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 50250676

(4) 研究分担者

趙 旭 (ZHAO, Xu)

秋田大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 20650790