

岩瀬英治研究室

(1) 電流密度分布を考慮した液体金属の高精度接触抵抗計測

本研究の目的は、電流密度分布を考慮したTransfer Length Method (TLM) による液体金属 (LM) の接触抵抗 (R_c) の高精度計測の提案である。Ga系LMを用いた伸縮電子デバイス^{(1), (2)}では、LMと電子素子や電極といった金属電極間の R_c が重要である。教科書的な接触抵抗計測方法であるTLMでは、従来、半導体と金属電極間の接触抵抗を主としていたため、金属電極のシート抵抗は対象物 (半導体) と比べて無視できると仮定されていた⁽³⁾。しかしながら、Ga系LMの導電率は金属電極と同程度であるため、この仮定が問題となる懸念がある。そこで本研究では、有限要素法 (FEM) による電流密度分布解析により、高精度なTLM計測の検討を行った。

図1にTLMによるLMの R_c の高精度計測の概念図を示す。また、図2 (a) に有限要素法解析 (COMSOL Multiphysics, COMSOL) を用いたTLM計測のシミュレーションモデルを示す。2つの金属電極が対象物に接触しており、電圧は電極の片端で検出された。従来の外側電極への電流印加と、改良した計測電極毎への個別電流印加について、金属電極と対象物の界面を流れる電流 I_i の比を解析した。モデル寸法は計測用デバイスと同じである。図2 (b) に製作したTLM計測用デバイスを示す。LMにはガリNSTAN (Changsha Rich Nonferrous Metals) を、金属電極には銅基板 (Toray) を用いた。ガリNSTANで満たされた切り抜き

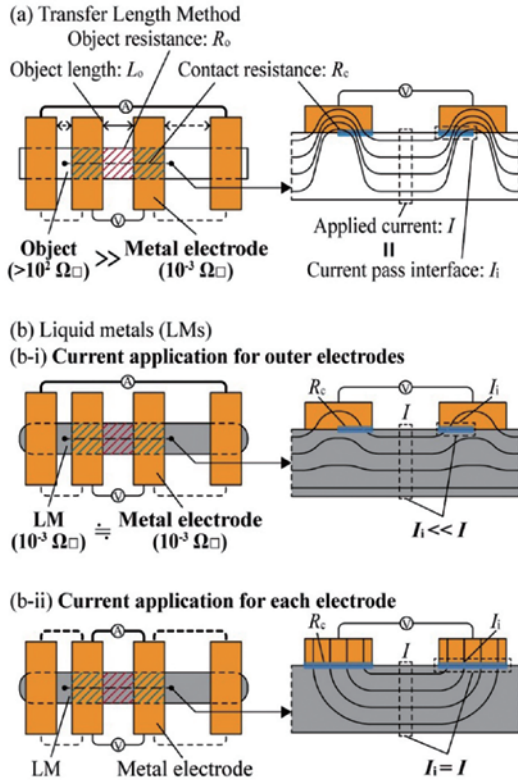


図1. 高精度接触抵抗測定の概略図

を有するPET基板および銅基板をアクリル基板で挟み込んだ。銅基板およびガリNSTANの厚さはそれぞれ0.008 mm, 1 mmである。電極幅および対象物幅は1 mmであり、対象物長さ (L_o) は7.5 mm~17.5 mmである。

図3に異なる電流印加箇所について、シート抵抗比 (R_{sho}/R_{she}) および接触抵抗比 (ρ_c/R_{she}) に対する電流密度分布のシミュレーション結果を示す。

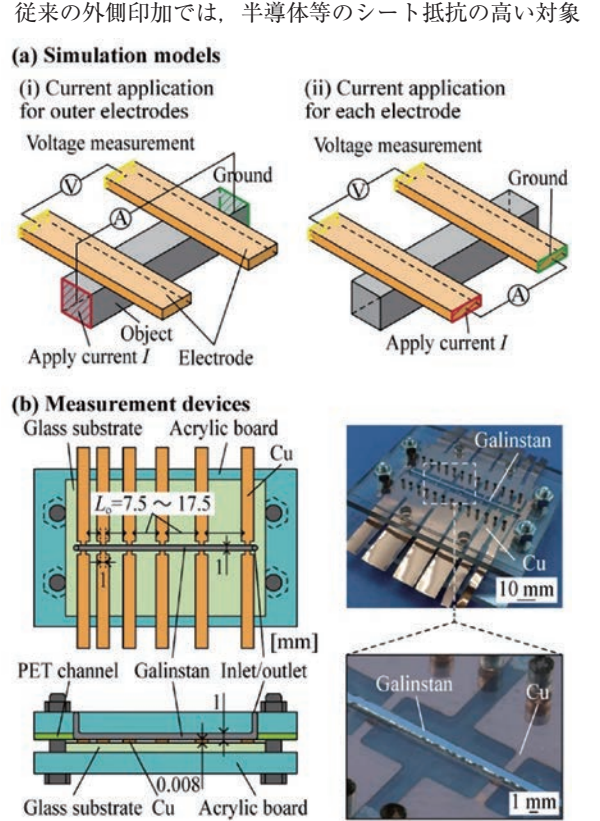


図2. シミュレーションモデルと作製したデバイス

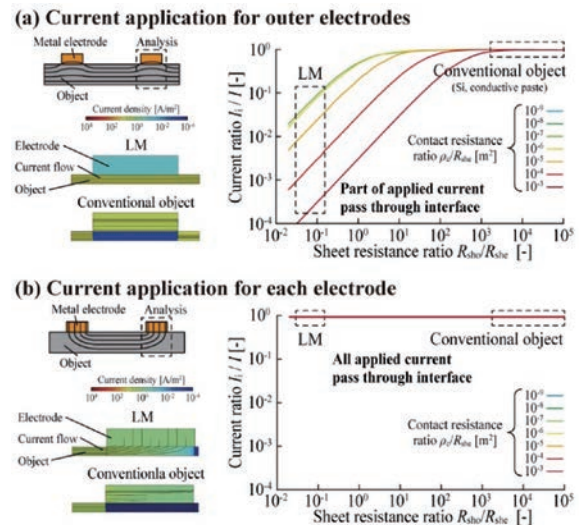


図3. 電流密度分布のシミュレーション結果

物では全印加電流が対象物と金属電極の界面を通過するという仮定が成立するのに対し、LMでは10%以下の電流のみが界面を通過し仮定が成立しないことを明らかにした。一方、改良した個別印加では、シート抵抗比によらず全印加電流が界面を通過した。以上より、高精度計測のためには、計測電極毎に電流印加し、さらにシミュレーションと実測を比較すると良いことを明らかとした。

(2) 液体金属による電子素子実装における応力分布解析

伸縮配線にLEDやチップICなどの硬く高性能な表面実装素子（SMD）を実装した伸縮電子デバイスでは、素子周辺の配線がひずみ差によって破断する。ひずみ差の低減には、素子と配線の柔軟な接続が重要となる。従来のハンダや導電性接着剤を用いた硬い接続では、配線の接続部は伸張できないため、ひずみ差が大きい。連続剛性分布基板を用いた破断抑制もあるが^{(4), (5)}、大きなひずみ差に対する抑制は限定的である。本研究では、液体金属（LM）を用いた素子実装によるひずみ差の解消を提案した。Ga系LMの高伸縮性により⁽⁶⁾、配線と素子の物理的固定をなくして電気的接続のみとし、配線の接続部のひずみを増加させ、ひずみ差を低減可能であると考えた。

図4にLMを用いた電子素子実装の概念図を示す。SMDチップ抵抗器をLMを用いて、切り紙構造を有する伸縮可能なCu配線に実装し、シリコンゴムで封止した。配線端部の接続方法に対する配線の伸縮耐性を調べた。配線部を引張用のCuパッドと接続させた固定端方法と、分離させた自由端方法である。簡単のため、電子素子なしのサンプルを使用した。次に、素子による伸縮耐性への影響を調べた。固定端方法では、はんだで実装したチップ抵抗を介して配線をパッドに固定した。自由端方法では、配線はガリンスタンで実装したチップ抵抗を介してパッドに電気

的にのみ接続された。

図5に素子無しの固定端配線と自由端配線について、配線部のひずみと引張荷重の関係を示す。固定端配線が100%ひずみで破断したのに対し、自由端配線は580%ひずみで破断した。この結果から、提案した自由端方式によって既存の配線の伸縮耐性を大幅に向上できることが明らかとなった。図6にチップ抵抗の有無に対する配線部の破断ひずみを示す。いずれの固定方法も、破断ひずみの差は10%以下であり、硬い素子の有無は配線の破断ひずみにほぼ影響しないことが分かる。最終的にガリンスタンで接続された配線によって、ハンダの6.3倍の伸縮耐性を達成した。さらに、ガリンスタンを用いて切り紙配線上に素子を実装したデバイスの高伸縮性を実証した。チップ抵抗アレイの抵抗値は200%ひずみでも1.1倍しか増加せず、SMDチップLEDアレイは150%ひずみでも安定して点灯した。

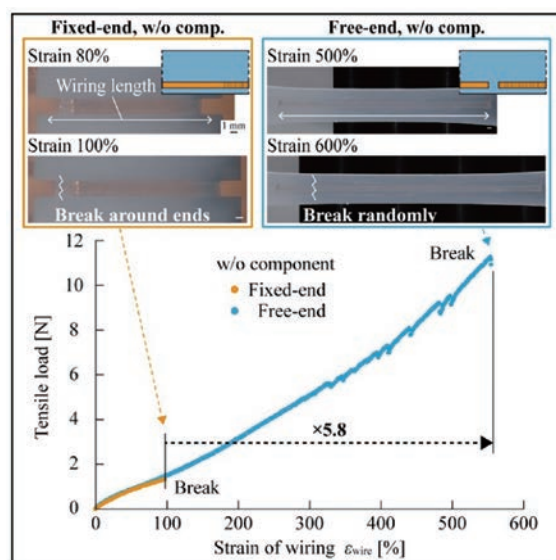


図5. 固定端配線と自由端配線の引張試験結果

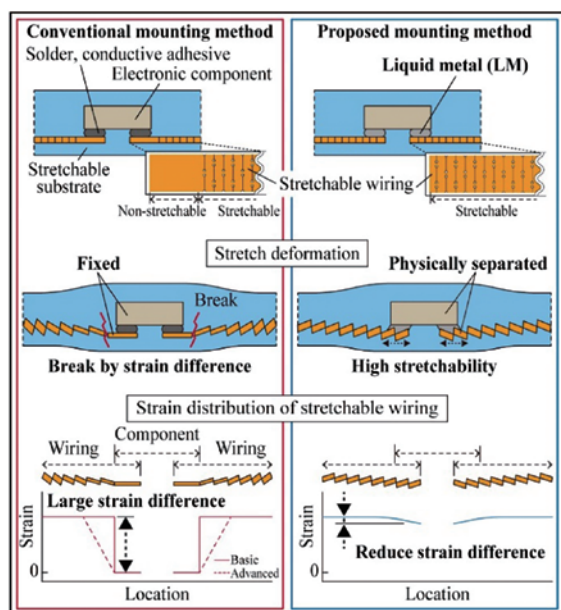


図4. 液体金属を用いた素子実装部におけるひずみ差の解消方法

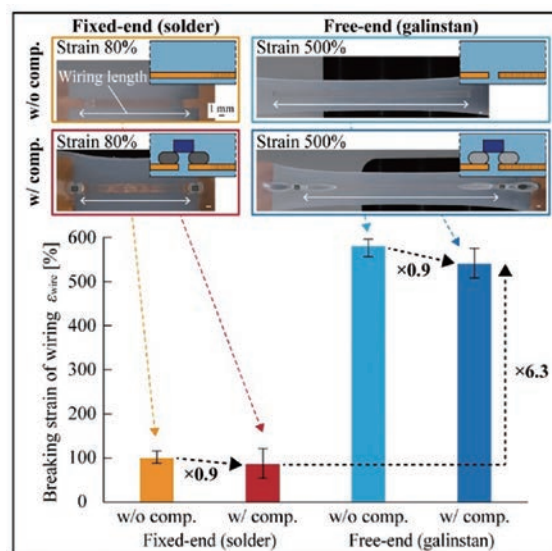


図6. 液体金属の有無による配線の破断応力

参考文献

- (1) K. B. Ozutemiz et al., Adv. Mater. Interfaces, vol. 5, 1701596, 2018.
- (2) T. Daeneke et al., Chem. Soc. Rev., vol. 47, pp. 4073-4111, 2018.
- (3) D. K. Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization, 3rd ed., pp. 138-149, 2006.
- (4) B. Lee et al., J. Soc. Inf. Disp., vol. 23, no. 3, pp. 163-184, 2022.
- (5) R. Lin et al., Adv. Mater. Technol., vol. 4, no. 12, 1900614, 2019.
- (6) T. Sato et al., ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 13, no. 15, pp. 18247-18254, 2021.

著書・論文

Y. Sato, T. Sato, and E. Iwase Bilayer Self-Folding Method with High Folding Force and Angle by Suppressing Delamination of Shrink Layer Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 19 (2024), 908-914
T. Sato and E. Iwase High-Accurate Contact Resistance Measurement Method for Liquid Metal by Considering Current Density Distribution in Transfer Length Method Measurement ACS Applied Materials & Interfaces, 15 (2023), 44404-44412

講演・発表

Electronic Component Mounting with Liquid Metal for Highly Stretchable Electronic Devices The 37th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2024), January 21-25, 2024, 一般
Output Characteristics on Kirigami Thermoelectric Generator by Three-Dimensional Deformation and Geometric Shapes Proceedings of the 22nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers2023), June 25-29, 2023, 一般
拡張伝送線モデル (TLM) 法を用いた熱電半導体の接触抵抗の精密測定 応用物理学会 第71回春季学術講演会, March 22-25, 2024, 一般
2軸伸縮性を有する切り紙型熱電発電デバイスの作製 日本機械学会 第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, November 6-9, 2023, 一般
電流密度分布を考慮した液体金属の高精度接触抵抗計測 日本機械学会 第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 6P5-PN-62, 熊本, 熊本, November 6-9, 2023, 一般
液体金属による電子素子実装における応力分布解析 日本機械学会 第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 7P2-PN-60, 熊本, 熊本, November 6-9, 2023, 一般
高分子超薄膜電子デバイスにおける厚膜電極接続部の形状検討 日本機械学会 第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 8P2-PN-61, 熊本, 熊本, November 6-9, 2023, 一般
カーボンナノチューブシートを用いた3次元熱電発電デバイスの評価 日本機械学会 第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 6P5-PN-13, 熊本, 熊本, November 6-9, 2023, 一般
引張による折れ上がり可能な切り紙型熱電発電デバイスの設計 日本機械学会 第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 7P2-PN-13, 熊本, 熊本, November 6-9, 2023, 一般
液体金属とエラストマによるスルーホール実装の提案 日本機械学会 第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 8P2-PN-56, 熊本, 熊本, November 6-9, 2023, 一般