

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 高橋 竜太郎
学位 博士 (工学)
学位記番号 新大院博 (工) 第 513 号
学位授与の日付 令和3年3月23日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
博士論文名 導電性ペーストのレオロジー特性がディップコーティングによる端子電極形成に及ぼす影響

論文審査委員 主査 教授・鳴海 敬倫
副査 教授・田邊 裕治
副査 教授・新田 勇
副査 准教授・牛田 晃臣
副査 助教・佐藤 大祐

博士論文の要旨

本論文は、微小な電子部品の端子電極形成に関連し、その際に広く利用されている導電性ペーストのディップコーティングにおいて、ペーストのレオロジー特性と電極形成性との関わりを明らかにしたものである。形成後に得られる端子電極の膜厚や形状は、電子部品のサイズの最適化や実装した部品に加わる応力を緩和する機能に多大に影響を及ぼす。しかし、ディップコーティングによる端子電極形成に関する知見は、メーカーのノウハウとして留められるか特許化されることが多く、学術的な報告例は極めて少ない。従来の粘度計などを用いた簡便な条件設定だけでは、最適な電極形成には至らず、各種工程からなる塗布時の流動を考慮して、系統的にレオロジー特性の影響を検討する必要がある。具体的には、どのレオロジー物性が、ディップコーティングにおけるディップ工程、プロット工程、乾燥・硬化工程といった工程の中の、どの流動に影響を及ぼすかについて、明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、導電性ペーストの特徴的なレオロジー物性と塗布特性との相関を明らかにする基礎的データを示し、最適な電極形成に有用なファクターを系統的に解明することを目的としている。具体的にはレオロジー物性を変化させたペーストを用いて模擬実験を行い、チップ端面の塗布形状（薄膜化）およびエッジ部の膜厚維持という相反する塗布性とペーストの粘度、動的粘弾性、チクソトロピー性（主には静止時の流動性低下）を中心としたレオロジー特性と、各工程における流動との関連を明らかにしている。

本論文は4章から構成され、その概要は以下の通りである。

第1章 「緒論」では、上記の本研究の背景、従来の研究、本研究の意義、本研究の目的を述べている。また本論文の構成についても示している。

第2章 「ディッピング用ペーストのレオロジー」では、ペーストに配合されるレオロジーコントロール剤の分子量や種類を変えた場合と異なるレオロジーコントロール剤の配合比率を変えた場合の、レオロジー特性への影響を調べた結果について述べている。まず、検討するレオロジー物性とそのレオメータで用いた測定について概略を示している。次に、レオロジーコントロール剤の分子量および種類の影響について、まず、定常粘度特性の測

定結果を示している。そして、シアシニング性の低減は確認されるが、今回の実験条件範囲内では、シアシニング性の低減効果は分子量よりもレオロジーコントロール剤の分子構造が影響していることを明らかにしている。また、レオロジーコントロール剤の種類による動的粘弾性特性で見られるゲル化現象の有無などについて明らかにしている。続いて、2種類のレオロジーコントロール剤の配合比率を変えた場合について、まず、定常粘度はあるせん断速度での粘度を揃えれば、ほぼ等しいシアシニング性を示すことを確認している。動的粘弾性特性では、低応力領域で凝集構造形成によりゲル化する傾向が、配合比によって異なることを示している。また、高応力領域では材料による差はほとんどなくなり、定常粘度測定の場合と似た傾向を示すことを解明している。最後に、チクソトロピー性に関連して、静止時間中に凝集構造が成長し（ゲル化が進み）、流動再開には高い応力が必要となることが確認され、その程度はレオロジーコントロール剤の比率により異なることを明らかにしている。

第3章 「ディップコーティングによる電極形成」では、まず、ディップコーティングでの流動を把握するために作製したディップコーティング模擬装置について示し、実験条件等を述べている。続いて、ディップ工程、プロット工程における流動現象について、それぞれ論述している。まず、液柱破断までの現象では、ペーストの伸長特性を考慮する必要はなく、大変形を伴うせん断流動時の流動特性で現象を把握できることを明らかにしている。また、プロット工程における膜厚制御の効果も、粘度特性にほぼ対応し、ペーストの粘度特性が同じ場合は同程度の効果が生じることを解明している。続いて液柱破断後のレベリング特性に対しては、ペーストのゲル化特性と相関があることを明らかにしている。すなわち、導電性ペーストのチクソトロピー性の検討結果は、チップ端面の膜厚と良好な相関があり、膜厚制御のための有用な情報であると述べている。一方で、塗布後の角部ではゲル化しやすい場合は膜厚を保つことができるが、チップ端面の膜厚とトレードオフの関係にあり、両方の膜厚の要件を両立させるにはレオロジーコントロール剤の配合比率を適宜調整し、ゲル化特性を制御する必要があると述べている。

第4章 「結論」では、本研究において明らかにしたペーストのレオロジー特性とディップコーティングによる電極形成の関係をまとめると共に、本研究の結論を述べている。

審査結果の要旨

以上を要するに、本論文は、小型電子部品などへのディップコーティングによる微細電極形成技術に関連し、塗布されるペーストのレオロジー特性と電極形成結果の対応関係などを系統的に明らかにし、レベリング時のゲル化特性などのこれまでにない観点から塗布特性への影響を明らかにし、工学上有用な知見を得ている。また、これらの成果は、工業上のプリントエレクトロニクス技術の発展に多大に寄与するものと考えられる。さらに、本研究結果は、非ニュートン流体力学、レオロジーの分野において新たな知見を与えるものであり、学術的な価値も高いと判断される。また、この研究成果は、学術雑誌に論文として掲載され、専門性の高い学会でも英語で発表されている。

よって、本論文は博士（工学）の博士論文として十分であると認定した。