

称号及び氏名 博士（工学） 石川 有紀

学位授与の日付 令和 6 年 3 月 31 日

論文名 「次世代半導体パッケージに対応した封止材料の高機能化」

論文審査委員 主査 齊藤 丈靖 教授

副査 武藤 明德 教授

副査 安田 昌弘 教授

副査 松本 章一 教授

論文要旨

半導体パッケージとは、半導体チップを包み込んで、衝撃や圧力などの機械的外力、湿度、熱、紫外線などの外部環境から保護し、外部と電力や電気信号の入出力を行うための端子や配線を提供する包装部材のことである。半導体チップは、そのままでは機能できず、半導体チップの性能を最大限に引き出す役割を担っているのが半導体パッケージである。半導体パッケージの主要構成材料である封止材やアンダーフィル材は、チップの性能、信頼性、集積化に大きく影響する因子であり、半導体チップの高性能化に対応した半導体パッケージを提供するには、これら材料の物性を継続して改善する必要がある。

これまで、電子機器の小型化、高密度化、低コスト化（大量生産）の要求を満足する高性能化、高機能化のための様々な半導体パッケージ形態、複雑な実装技術が発展してきている。従来の半導体パッケージの成型プロセスでは、封止材として、タブレット型や錠剤型のエポキシモールドコンパウンド（EMC）を使用したトランスファモールド法が主流となっているが、融点が高い固形の EMC では、高粘度のために高温高圧下で流動させて成型するため、複雑な半導体パッケージ構造を対象とした成型過程でのボイド、ワイヤーの変形、チップ破損などの課題が顕在化する。また、半導体チップの集積度は 18 カ月で 2 倍になるという「ムーアの法則」の鈍化のために、3 次元化やチップレットなどの異種チップ集積技術によって、半導体システムとして高機能・多機能化を実現する取組みが、急速に進んでいる。そのため封止材やアンダーフィル材にも、半導体パッケージの複雑化に対応できる新たな技術が求められ、低粘度で低圧パッケージングが可能な

液状樹脂への期待が高まってきている。

Internet of Thing (IoT) や Artificial Intelligence (AI)、5G、Advanced Driver Assistance System (ADAS) など、デジタル社会の到来により、通信用半導体やセンサーのパッケージング技術も微細化、多機能化が進んでいる。通信用半導体の高周波デバイスは、アンテナ、キャパシタ、コンデンサーなどの異種デバイスを高密度実装し、ワンパッケージ化 (System in Package と呼ばれる) される。SiP に用いる半導体デバイスは、パッケージ内に異種デバイスが高密度に配置するために、チップ下面の bumps により直接回路基板と接続するフリップチップ構造で実装されている。フリップチップ構造は、半導体チップの集積回路面を 180 度反転 (フリップ) させて、アレイ状に並んだ bumps (電極端子) により回路基板と電氣的に接続させたもので、ワイヤーボンディングによる接続方法と比較して、省スペースな上に、配線長が短く、電氣的特性が向上するメリットがある。フリップチップ構造では、チップ集積回路面と回路基板との間に、bumps によるギャップが生まれるため、封止材によりギャップ間と bumps ピッチ間をボイド無く埋める必要がある。SiP の製造工程では、半田実装されたフリップチップや異種デバイスが高密度に実装されるため、パッケージ内にも半田が多く内在している。ワンパッケージ化された SiP は、プリント回路基板 (マザーボード基板) へ搭載の際の再リフロー工程で、パッケージ内部の半田も再溶融が起り、半田の膨張によるストレスが発生する。そのため、パッケージ内部に、樹脂クラックや半田ブリッジによる電氣的ショート、基板やチップ、樹脂との界面での剥離などの不具合が発生するという課題がある。また、SiP は、量産性と小型化が求められるため、封止材でフリップチップ周辺への充填も同時に行うことが一般的である。この封止材は、封止 (モールド) とフリップチップ下面へのアンダーフィルを同じ材料で行うため、モールドアンダーフィル (MUF) 材と呼ばれている。汎用的に使用される固形のエポキシモールドコンパウンド (EMC) ベースの MUF 材では、溶融粘度が高いため、チップサイズが大きく、フリップチップと基板間の隙間 (ギャップサイズ) が狭い構造の場合、フリップチップ下に未充填部分が残る問題が報告されている。その場合、毛細管現象を利用して狭い隙間に樹脂を流入させるキャピラリーフローアンダーフィルとモールド成型の 2 段階プロセスを適用して対応されているが、アンダーフィルには、フィレットと呼ばれるチップ周辺エリアが必要であり、半導体パッケージの小型化、高密度化の流れから逆行する問題が発生する。

パワー半導体は、高い電圧と電流を扱うことができる半導体であり、電圧制御や変換など、「電力」を主に取り扱う半導体である。これまで、パワー半導体の材料には、主にシリコン (Si) が使われてきたが、EV 車向けパワー半導体など、高電圧、高スイッチング特性が必要なパワー半導体は、Si の材料特性の限界が近づいてきており、近年、炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) などの化合物系次世代パワー半導体の開発が急速に進められている。Si よりも広いバンドギャップを持っているこれらの材料では、大電流・高電圧・高温動作が可能のため、エネルギー損失が低く、小型化が可能である。発熱による損失エネルギーも削減できるため、変換効率が良くなり、省エネルギー化にとっても欠かせない技術である。しかし、次世代パワー半導体は、出力密度の増加により、200°C 以上まで発熱するため、封止材などの周辺部材の放熱性や耐熱性の問題が指摘されている。次世代パワー半導体の性能を最大限に引き出すには、このような高温領域でも動作保証できる高い熱伝導率を持った材料や高い耐熱性を持った材料開発が急務となっている。

本論文では、以上で述べた課題に対し、低ストレスで成型できる液状モールドコンパウンドの各種半導体パッケージで要求される高機能化のために、パッケージ信頼性の向上、充填性、反り、高熱伝導化、高耐熱化を実現する研究を行った。

本論文は、第 6 章で構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第 1 章では、本研究の背景や目的、また、本論文の構成について記載している。

第 2 章では、通信系半導体パッケージ用液状モールドアンダーフィル材の信頼性評価向上を目

的に、主要成分であるエポキシ樹脂とその硬化剤の骨格を変更することにより、8 MPa 以上の接着強度を有し、ガラス転移温度 (T_g) が、-20°Cから 180°Cまで制御した材料を作製し、その物性が吸湿リフローとヒートサイクル (-55°C~125°C、1000 サイクル) に与える影響を調査した。吸湿リフロー評価では、10 MPa 以上で、リフロー温度 (最大 260°C) 環境下での貯蔵弾性率が、0.25 GPa 以下であるモールドアンダーフィル材の場合、半田フラッシュなどの不具合が生じなかった。また、ヒートサイクル評価では、120°C以上の T_g を持つモールドアンダーフィル材で成型された半導体パッケージの接続端子の抵抗値は、ヒートサイクル試験前後で変化しなかった。まとめると、通信系半導体パッケージに適用する液状モールドアンダーフィル材に必要な貯蔵弾性率、T_g、接着強度の指針を獲得できた。また、ガラスクロスにエポキシ樹脂を含侵させたガラエポ基板とアルミナが主ベースのセラミック基板上に、モールドアンダーフィル材を硬化させた後の反り挙動を評価した。反りは、半導体パッケージの異なる部材の熱膨張係数の差によって起こる現象であり、反りが大きくなると、プリント配線基板の接続不良、成型材料のクラック、接続端子の断線など、重大な問題が発生するため、半導体パッケージにおいて特に重要な課題となっている。モールドアンダーフィル後のガラエポ基板の反りは、Thermomechanical Analysis (TMA) で測定したモールドアンダーフィル材の熱膨張量が大きいほど大きくなったが、Dynamic Mechanical Analysis (DMA) で測定した貯蔵弾性率は、反りに対する影響は小さかった。一方、セラミック基板の反りは、DMA で測定した T_g 以上での貯蔵弾性率が大きいモールドアンダーフィル材ほど大きい結果となり、熱膨張量の影響は小さいことが分かった。

第3章では、真空印刷封止と加圧硬化プロセスにおいて、フリップチップ構造を用いて半導体パッケージモデルを作製し、液状モールドアンダーフィル材の充填性を評価した。液状モールドアンダーフィル材の粘度と配合している球状シリカフィラー径を変更し、チップ下面への充填性とギャップサイズとの関係を調べた。具体的には、フィラー粒径は、最大 25 μm、平均 6 μm の球状シリカを使用し、配合する充填量を、80 wt%と 70 wt%にすることで、粘度は、約 300 Pa・s と 100 Pa・s となった。また、フィラー粒径、最大 10 μm、平均 3 μm の球状シリカを使用し、70 wt% 配合したときの粘度は、約 300 Pa・s であった。フリップチップと基板とのギャップが 75 μm、バンプピッチが 200 μm の半導体パッケージモデルと、ギャップ 30 μm、バンプピッチ 100 μm の半導体パッケージモデルの2種類の構造を準備した。ギャップ 75 μm、バンプピッチ 200 μm のフリップチップ構造の半導体パッケージモデルでは、粘度が 300 Pa・s で、フィラー径が最大 25 μm、平均 6 μm を配合したモールドアンダーフィル材は、真空印刷時間を5分から10分にする、あるいは硬化時の圧力を 0.5 MPa から 0.8 MPa にすることで、ボイド無く充填が可能であった。粘度が 100 Pa・s で、フィラー径が最大 25 μm、平均 6 μm の球状シリカを配合したモールドアンダーフィル材の充填性は、いずれの条件下でもボイドは無く、未充填箇所は見られなかった。また、ギャップ 30 μm、バンプピッチ 100 μm の半導体パッケージでモデルは、粘度によらず、フィラー粒径、最大 10 μm、平均 3 μm の球状シリカを配合したモールドアンダーフィル材のみ、ボイド無く充填することができた。

第4章では、モールドコンパウンドの熱伝導率や T_g が、パワー半導体用パッケージモデルの熱抵抗に与える影響を検討した。モールドコンパウンドは、骨格の異なるエポキシ樹脂と硬化剤に、シリカフィラー (熱伝導率: 1 W/m・K) とアルミナフィラー (熱伝導率: 36 W/m・K) を用いて、T_g が 150°C~270°C、熱伝導率が 0.8 W/m・K~4.0 W/m・K を持つ液状モールドコンパウンドを作製した。作製したモールドコンパウンドを用いて、ヒーターと温度測定用の2種類の抵抗と測定パッドを持つ Test Element Group (TEG) チップを成型することで、パワー半導体パッケージモデルを作製し、熱抵抗を確認した。T_g が同じでも、熱伝導率が 0.8 W/m・K から 4.0 W/m・K にしたモールドコンパウンドの熱抵抗は、14°C/W から 4°C/W まで小さくなった。また、熱伝導率が同じでも、T_g が 150°Cから 270°Cまで上げたモールドコンパウンドの熱抵抗は、7.5 W/°C から 5.5 W/°Cまで小さくなった。熱伝導率が高いほどパッケージモデルの熱抵抗が小さくなり、放

熱性が高くなり、チップ表面の温度上昇が小さくなる。また、 T_g が高いほど、高温での熱抵抗が小さくなり、放熱性が大きくなった。

第5章では、従来のエポキシ樹脂より耐熱性の高い液状モールドコンパウンドを開発することを目的に、ビスマレイミド (BMI) 樹脂と反応可能なアリル基を持つエポキシ樹脂を混合、溶解させることで、液状モールドコンパウンドの耐熱性の向上を試みた。 $70^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ の融点を持つ BMI と、アリル基を持つエポキシ樹脂をあらかじめ反応させることで、マレイミド骨格を持つ液状の変性マレイミド樹脂を作製し、過酸化剤とイミダゾール硬化剤を用いることで、 150°C 以下で反応させることができた。この材料に、市販の球状シリカフィラー (最大 $25\ \mu\text{m}$ 、平均 $8\ \mu\text{m}$) を配合し、モールドコンパウンドを作製した。このモールドコンパウンドの硬化後のガラス転移温度 (T_g) は、 300°C に到達しても T_g による物性変化が見られず、 T_g は、 300°C 以上である可能性が示された。高い温度での動作保証の確認として、 200°C 、 $1000\ \text{h}$ 後の重量減少量を確認し、TMAによる熱膨張量と DMAによる貯蔵弾性率の物性変化を確認した。 200°C 、 $1000\ \text{h}$ 後でも、従来のエポキシモールドコンパウンドや、シリコーンゲルと比較して、重量減少量や物性変化が少なく、本研究によって耐熱性が改善できた樹脂材料を提供できた。

第6章では、本研究の総括を行い、展望を述べた。

審査結果の要旨

本論文は低ストレスで成型できる液状モールドコンパウンドの高機能化のために、パッケージ信頼性、充填性、反り、高熱伝導化、高耐熱化について検討し、特に、樹脂の物性、フィラーの効果と信頼性への影響をまとめて、以下の成果を得ている。

(1) エポキシ樹脂と硬化剤を変更し、ガラス転移温度 (T_g)、接着強度、貯蔵弾性率(E')、熱膨張係数(CTE)を変えたコンパウンドでモールドアンダーフィルしたフリップチップ実装パッケージモデルを用いて吸湿リフローとヒートサイクル試験を行った。その結果、リフロー温度(最大 260°C)での弾性率が $0.25\ \text{GPa}$ 以下のモールドアンダーフィル材では抵抗上昇がなく、 T_g が 120°C 以上のモールドアンダーフィル材がヒートサイクルに有望だと示した。

(2) フリップチップ構造のパッケージモデルを使用し、液状モールドアンダーフィル (LMUF) を使った真空印刷封止と、加圧硬化プロセスでフリップチップ構造のパッケージモデルを用い、(1)で作成したモールドアンダーフィル材の粘度、フィラー径とフリップチップ下面の気泡との関係性を評価した。フリップチップのバンプギャップサイズやピッチと、真空印刷および加圧硬化のプロセス条件および液状モールドアンダーフィル材の粘度、フィラー径と充填性との関係を考察した。

(3) T_g が $150^{\circ}\text{C}\sim 270^{\circ}\text{C}$ 、熱伝導率が $0.8\ \text{W/m}\cdot\text{K}\sim 4.0\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ を持つ液状モールドコンパウンドを作製し、熱伝導率やガラス転移温度 (T_g) がパワー半導体パッケージモデルの熱抵抗に与える影響を検討した。その結果、モールドコンパウンドの T_g が同じでも、熱伝導率が $0.8\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ から $4\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ に上げたモールドコンパウンドの熱抵抗は、 $14\ ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ から $4\ ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ まで低減できた。また、熱伝導率が同じで、 T_g が 150°C から 270°C まで上げたモールドコンパウンドの熱抵抗は、 $7.5\ \text{W}/^{\circ}\text{C}$ から $5.5\ \text{W}/^{\circ}\text{C}$ まで小さくなった。以上、各種物性と熱抵抗の関係を実験的に明らかにした。

(4) ビスマレイミド樹脂と反応可能なアリル基を持つエポキシ樹脂を混合、溶解した液状モールドコンパウンドを作成し、耐熱性を評価した。200°C/1000 Hr 後の物性変化を確認した結果、従来のエポキシモールドコンパウンドや、シリコーンゲルと比較して重量減少量が小さく、物性の劣化も少ない耐熱性の高い樹脂材料を得ることができた。

以上の諸成果は、半導体パッケージ技術の進化のためにコンパウンド技術であり、今後の信頼性改善や耐熱性改善の指針となりえる重要な知見である。特に、競合の材料メーカーおよびデバイスメーカーへフィードバックできる貴重なものである。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

審査委員会は、2024年2月22日、全委員の出席のもとに、申請者に論文内容の説明を行わせ、関連する諸問題についての試問を行った結果、合格と判定した。