

氏名	きくち かずひろ 菊池 和浩
学位の種類	博士（工学）
報告番号	甲第 1908 号
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 17 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当（課程博士）
学位論文題目	パネルレベルパッケージング用仮固定材料と封止材料に関する研究
論文審査委員	(主 査) 福岡大学 教授 末次 正 (副 査) 福岡大学 教授 柳瀬 圭児 鹿児島大学 教授 池田 徹

内 容 の 要 旨

半導体デバイスの微細化による性能向上は限界を迎えつつあるなかで、パッケージに異種デバイスを集積することで多機能化して性能を向上する HI (Heterogeneous integration) が提唱されている。HI を実現するキーテクノロジーの一つとして FOP (Fan-Out Package) がある。FOP は樹脂封止したチップにウエハプロセスで配線層を形成して得られるパッケージ構造である。近年は大面積矩形で FOP を一括製造する FOPLP (Fan-Out Panel Level Packaging) の採用も進んでいる。またワイドバンドギャップ半導体の実用化が進み、これらの技術をパワーモジュールに転用することも検討されている。このような背景を元に、本論文では FOPLP の製造に用いる新たな 3 種の材料を提案した。

第 2 章では、FOPLP の製造で使用する仮固定材料として、粘着剤にアクリル系樹脂、基材に PET (Polyethylene Terephthalate) を用いた剥離の際にトリガーを必要としない耐熱片面粘着テープを設計した。粘着主剤の主モノマーにアクリル酸-2-エチルヘキシル、架橋剤にヘキサメチレンジイソシアネート化合物、添加剤に反応性ポリブタジエン化合物を用いた粘着剤は、加熱 (190° C 1 時間) による粘着力上昇が 5 倍程度に抑制でき、段差のある被着体に対して粘着剤が凝集破壊せず剥離できる優れた特性を示した。設計した粘着剤はシリコン系粘着剤と比べて残渣が少なく、加熱による銅の腐食を抑制する効果も有した。基材に関しては、高温雰囲気下で表面析出するオリゴマー成分を抑制するためにエポキシ系コーティング層を設けて適用した。また PET および Polyimide 基材の粘着テープを使用して作製したパッケージの内部応力を定量化し、PET 基材を用いることで残留応力を低減できることを明らかにした。

第 3 章では、柔軟な分子構造を導入することで FOPLP 製造における反りを抑制する

シート状のエポキシ系封止材料を設計した。硬化主剤である剛直な分子構造のエポキシ樹脂を柔軟なエポキシ樹脂に最大 7 割置換した封止材料を調製して性能評価を行った。パネル反りは最大 5 分の 1 に低減できることを実証した。また柔軟なエポキシ樹脂の配合量が多いほどガラス転移温度と 1%重量減少温度が低下するなど硬化物の耐熱性は低下したが、パッケージレベルの温度サイクル (TC) 試験 (-55/125°C 2000 サイクル) と吸湿リフロー試験 (JEDEC Level 2) およびボードレベルの TC 試験 (-55/125°C 1000 サイクル) による実用性試験に合格し、設計材料の有効性を明らかにした。

第 4 章では、FOPLP パワーモジュールへの適用を想定したシート状耐熱封止材料を新規設計した。硬化主剤にマレイミド樹脂、硬化剤に 2,2'-ジアリルビスフェノール A を用いる硬化システムを採用した。基礎配合の検討では、中心骨格がビフェニル構造のマレイミド樹脂 (M-biphenyl) が良好な接着性と流動性を示し、更にアミノ型の複素環化合物を添加することで 200°C 雰囲気下に 1000 時間保管後も高い銅箔接着性を維持できることを見出した。応用検討としてマレイミド樹脂硬化物の欠点である脆さの改善に取り組んだ。第 3 章の結果から架橋高分子鎖中に柔軟成分を付与することで耐熱信頼性の低下を抑制できると考え、M-biphenyl を柔軟なマレイミド樹脂 (M-alkyl) に最大 7 割置換した封止材料を調製して性能を調査した。その結果、M-alkyl の置換率が 3 割の封止材料は破断応力が 5 割向上し、高い耐熱性と銅箔接着性を維持した。またパッケージレベル TC 試験 (-55/200°C 1000 サイクル) に合格し、設計材料の有効性を明らかにした。続いて置換率が 5 割以上の封止材料が TC 試験で起こした層間剥離・クラック不良について FEM 応力解析と応力特異性理論を用いて考察した。層間剥離は TC 試験における界面応力とシヤア強度試験における破壊時の界面応力を比較し、M-alkyl の置換率と層間剥離の関係を示した。クラック不良は置換率と駆動力の関係を定性的に示した。

審査の結果の要旨

令和 3 年 11 月 17 日に開催された博士論文事前審査委員会での審査の結果、申請資格の条件に適合する者であると判定された。類似度判定の結果、学位論文として問題がないことが確認された。令和 3 年 11 月 24 日に開催された博士課程後期通常委員会で、主査予定者の末次 正から申請者の経歴、研究業績、論文名、論文の内容と副査予定者の説明を行い、審議の結果、申請論文の受理と審査委員が提案どおり承認された。第 1 回論文審査会は令和 3 年 12 月 14 日 (火) 10:00~12:00、4 号館 5 階 大学院ゼミ室で行われ、申請者本人から申請論文の内容説明を受け、審査委員から質疑並びに指示があり適切に対応がなされた。公聴会は令和 4 年 1 月 20 日 10:00-12:00 に福岡大学 4 号館 4520 号室、で WebEx (ハイブリッド) で行われ、申請者による約 90 分の発表の後、出席者から 12 件の質疑があった。申請者は全ての質疑に対する的確な回答をし、申請論文の内容を修正す

る必要がないと判断された。

本論文は半導体パッケージの製造もしくはそれ自体に用いる新たな材料研究に関して記述している。研究テーマはパネルレベルパッケージング（以下 FOPLP）をターゲットに一貫した記述がなされている。半導体パッケージはプロセスノードの微細化限界によって重要性が再認識されており、その先端技術である FOPLP の製造課題を解決する本論文に記載された材料は高い学術的価値が認められ、産業界の発展に寄与すると判断できる。

本論文では 3 種の異なる材料を提案している。2 章に記述の仮固定用片面粘着テープは、ポリエチレンテレフタレートとアクリル系粘着剤で構成されており、これらの材料で最大 190℃の耐熱性を達成したことは特筆すべき性能である。また、反応性ポリブタジエン化合物の配合による破断特性が向上して段差に対する粘着剤の転移を抑制したことに対して新規性・独創性が認められる。3 章ではシート状エポキシ系封止材料について述べている。FOPLP の製造課題である反りの低減には封止材料の低線膨張係数化が必要である。しかしながらシート状封止材料はシリカ粒子の高充填が困難であり、柔軟性のエポキシ樹脂配合による低応力化による反り抑制を検討している。検討結果は系統的に良く整理されており、柔軟エポキシ樹脂が実用性に耐えることを証明している。新しい樹脂組成のアプローチとして新規性・独創性が認められる。4 章では高耐熱のシート状封止材料を述べている。マレイミド樹脂を用いた樹脂組成のシート状封止材料は先行研究例がない。また、アミノ型複素環状化合物の添加による接着特性の向上、マレイミド樹脂の課題である脆さを改善する配合の検討まで系統的に良く整理されており、新規性・独創性が認められる。

論文提出者は関連分野に関し十分な基礎知識を有し、学術研究遂行能力を有している。論文の内容、および審査会・公聴会の口頭諮問にて的確な回答が得られたことから十分な基礎知識を有すると判断する。また論文の内容から課題に対する高い解決能力を有することと、適切な方法を用いた材料評価と論理的な考察内容から高い学術研究遂行能力を有することが認められ博士（工学）の学位に値する。