

氏名	えなみ としお 江南 俊夫		
学位の種類	博士（工学）		
報告番号	甲第 1641 号		
学位授与の日付	平成 29 年 3 月 21 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	ピエゾ抵抗素子内蔵 TEG チップを用いた NCF 接続フリップチップパッケージにおける残留応力に関する研究		
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	遠藤 正浩
	福岡大学	教授	鈴木 孝将
	九州大学大学院	教授	澤田 廉士

内容の要旨

本研究は、ピエゾ抵抗素子を内蔵した TEG チップを用いてフリップチップ半導体パッケージを加温した際に、発生する内部応力をリアルタイムで定量測定する手法を開発し、本手法を用いて、次世代の薄厚フリップチップパッケージで発生する内部応力を定量的かつそのチップ内応力分布を解析し、パッケージを構成するチップ及び基板構造とチップと基板を封止接着する封止材の特性設計に反映させることを目的として研究を行った。

現在の半導体パッケージの応力解析は、有限要素法を用いたシミュレーションとパッケージの実際のそり変形を測定して、その応力分布と各温度別影響度を相互比較し、相対的に算出している。しかしながら実パッケージのそり変形は、ある特定温度での内部応力トータルを視覚的に外から測定したもので測定する。本手法は、パッケージの構成（厚み、大きさ）で異なり、材料由来か構造由来かを層別することは困難であった。そのため、パッケージ設計では、都度上、構造と材料のトライアンドエラーと経験で最適化を行う必要があった。今日までの設計手法でもパッケージ開発を行うことはできた。チップ厚みが従来の 100 μm から 50 μm 、基板厚みが 300 μm から 100 μm と薄くなり、そのパッケージの基板配線の微細化、接合部のバンプと呼ばれる電極部分が微細化、近接化（狭ピッチ化）されるにつれて、応力による微細配線の断線や、加温時の樹脂膨張による微細バンプへの応力集中での破壊/剥離が顕著となり、“そり”の現象を外的に測定評価するだけでなく、内部発生する現象を定量的に捉えて、低応力施策が必要となる。そこで本研究では、以下の 3 つの項目について、研究を実施し、パッケージ内部に発生する残留応力を定量化し、将来の材料設計に必要なパッケージの構造と材料について考

察したので報告する。

1) 第2章では、ピエゾ抵抗素子を内部回路として有する TEG チップを開発し、本 TEG チップを使用して有機基板上にフリップチップ (Flip Chip Bonding ; FCB) 実装を行い、封止材無しでの TEG チップと有機基板の熱膨張係数の差により発生する残留応力を定量化、また現在主流で使用されている封止材 CUF (Capillary Under Fill) を TEG チップと基板隙間に毛細管現象を用いて注入封止したときの発生する残留応力、及び次世代薄パッケージ用封止材として期待される NCF (Non-Conductive Film) を用いて TEG チップと有機基板の熱膨張係数の差により発生する残留応力を定量化、また得られたパッケージを直接加温してその内部応力をリアルタイム測定し、チップ内での応力分布と熱によるその変化を定量化した。また CUF 及び NCF を使用したパッケージを用いて吸湿リフロー処理での残留応力を比較解析し、TEG チップのリフロー後の剥離検出性能を評価した。CUF と NCF 比較から、NCF のチップコーナーに配置されたバンプ保護性やその程度を定量化という成果が得られ、結果は、Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging Vol.8, No.1, 2015 及び Proceedings of the International Conference on Electronics Packaging (ICEP2015) に掲載されたので、得られた研究成果について詳しく述べる。

2) 第3章では、第2章でピエゾ抵抗素子内蔵 TEG チップを用いた加熱評価試験手法を確立し、その有効性を確認出来たので、ガラス転移温度 T_g 、熱線膨張係数 CTE の材料特性の異なる NCF、チップ厚み、基板種を有機基板とシリコンインターポーザ基板に変えて FCB 実装で発生する残留応力の定量化と加温温度別の残留応力の定量化し、将来微細パッケージに必要とされる低応力基板構成・材料の指標化を行った。結果は、Proceedings of 17th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC2015) に掲載されたので、得られた研究成果について詳しく述べる。

3) 第4章では、第3章で得られた結果と従来の外的な測定手法であるシャドーモアレ測定で得られるそりデータとの相関性を確認して、本研究の有効性を確認した。結果は、Proceedings of the International Conference on Electronics Packaging (ICEP2016) に掲載及び Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging , 2016 に掲載が決定したので、得られた研究成果について詳しく述べる。

結論

ピエゾ抵抗素子内蔵 TEG チップを用いて NCF を用いたフリップチップ型のパッケージの実装後のチップ内応力分布とその大きさを明らかにした。

またパッケージを実際に熱処理環境下に置いたときの中に発生する実応力値を測定する手法を開発し、その手法を用いてチップ厚、基板厚、基板種の影響度を実応力値から明確にした。

また従来の外部測定手法であるシャドーモアレ法と本手法を比較し、本手法の有効性を明らかにした。本研究により、次世代薄厚フリップチップパッケージに必要な NCF 材料

特性設計が可能になり、NCF 開発を加速することが出来た。

開発した NCF を用いた成果は、Proceedings of the Electronic Components and Technology Conference (ECTC2016) , pp122-127, May 2016 として次世代薄フリップチップパッケージを共同開発する顧客開発メンバーの成果として掲載され、筆者は Acknowledgments の開発メンバーとして掲載された。

審査の結果の要旨

平成 28 年 11 月 16 日に開催された博士論文事前審査委員会で、申請者は申請資格に定める「申請者が第一著者である査読付学術論文 1 編(冊)以上の研究業績を有する者」であると確認されたので、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。また類似度判定実施の結果、まとまって類似する文章が出てくる部分は全く無く、本学位論文はオリジナル作であることと判定された。平成 28 年 11 月 30 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以下の提案どおり承認された。

主査 福岡大学 末次 正教授

副査 福岡大学 遠藤 正浩教授、 鈴木 孝将教授、九州大学大学院 澤田 廉士教授
第 1 回審査会は平成 28 年 12 月 20 日 (火) 14 : 00~15 : 40、4 号館 2 階 電気電子会議室にて開催された申請者本人から申請論文の内容説明を受け、審査委員から次とおり質疑並びに指示があった。

- 1) CUF と NCF は同じですか？
- 2) CUF を間に入れるということはできないのですか？
- 3) NCF を層間に CUF のように入れることもできませんか？
- 4) シリコンと同じ熱膨張係数の基板は作れませんか？
- 5) ガラスエポキシ基板にシリコンインターポーザ用の Poly Si 配線を貼り付けるという発想はありませんか？
- 6) 残留応力のみみればアンダーフィルと NCF はどちらがよいのですか？
- 7) 私にはそう見えないので数値を見るとアンダーフィルの方が私には小さく見えます。熱膨張だけ考えるとどちらがよいのですか？
- 8) 全体の応力が同じと仮定しているのですか？
- 9) ピエゾを入れて今回の応力現象を見ることが新規ですか？
- 10) チップの端部がどうなっているのかが重要なのですか？
- 11) チップ端部の実応力を調べたものはありますか？
- 12) そこを強調する内容にしてはどうでしょうか？

- 13) CUF はなぜ剥離してはがれるのか断線することはないのでしょうか？
- 14) バンプのそりがなぜそんなに重要なのか？シリコンの圧縮が測定されている。チップのピエゾ抵抗素子の圧縮を測るとそりが出てくる。チップ内のどこかに引っ張りが出ていてクラックが出てくるということか。何がどうなってどうなっているのかという、そういう説明がほしい。最初のところにそういうわかりやすい説明が欲しい。測ることによって何が得られるのか強調して説明して欲しい。
- 15) 結果の引張応力は信頼性に問題になりませんか？
- 16) チップ端部の半田バンプのクラック亀裂は横に入りますか？
- 17) 説明の中の全体応力とはなんですか？総量のようなもののでしょうか？
- 18) 全体応力を同じと仮定して、全体が変形する割合と一部が変形する割合がバランス設計できると壊れないという話ですか？全体応力とチップにかかる応力の割合は何なのか？要するにひずみが見たいのか？バンプにかかる応力が高いか低いかを示しているのか？説明頂きたい。
- 19) 応力とひずみが一緒に議論されています。新規性のところをわかりやすくする必要があります。
- 20) 17 番のスライド $\sigma(T1)$ は消し忘れでは？また式(2)は $R1_T(0)$ をテーラー展開しないといけないので、変形が間違っているのではないですか？
- 21) 文献[3]の式も間違っている。この式は温度依存性のない温度で式を作り、温度依存性を考慮したものを足しているとなっているので論文を見る限り妥当ではないかとも思います。
- 22) 加熱すると応力が減ってゼロに近づくというのは樹脂が固まる温度で固定されるからで、冷やすと熱膨張が違うことから、もし室温でガラス転移するフィラーを開発して冷やしてフィラーを入れて室温で硬化させるとまったくひずみのないフィラーができるのでしょうか？
- 23) ひずみシリコンはこれに使いませんか？
- 24) 第 2 章 5 節の参考文献には、章印字をしないこと。
- 25) 修正版は、1/7 に提出して下さい。

指摘事項に基づく学位論文の修正対応については、申請者が各審査委員に直接報告することになった。また、学位論文の内容と審査会中の質疑応答から、申請者は、専門領域に関する十分な学識と研究能力を有すること、国際学術雑誌への投稿、国際会議での口頭発表などの実績から十分な英語能力を有することを認めた。以上を踏まえ、第 2 回の審査会は行わないこと、公聴会を開催することを全会一致で了承した。

公聴会は、平成 29 年 1 月 24 日（火）10：00～11：00、14 号館 4 階 1441 室にて開催された。参加者数は審査員 4 名を含めて 14 名だった。公聴会では申請者による約 45 分の発表の後、出席者から 9 件の質疑があり、申請者は全ての質疑に対する確かな回答を行った。主な質疑応答の内容は次のとおりである。

- 1) 最後に反りを測っているが、高温ほど反りは大きいですか？

→温度が高いほどそりの方向は戻っていくという方向です。

2) ピエゾを形成することによって発生するチップ反りはどれぐらいですか？

→データはありませんが、チップ全体の面積でみるとピエゾ素子の専有面積は非常に小さいので、反りへの影響は少ないと考えています。

3) シリコンインターポーザと値段はいくらぐらい違うのですか？

→約2倍異なります。

4) Tgの高い材料を作ることの難しさはありますか？

→自社合成が必要となるケースがほとんどで高くなる傾向になります。

5) 接合温度 Tg の温度の差で応力に影響しますか？

→接合温度違いについては、応力に影響はない。理由は接合温度時には半田も樹脂も溶融状態で、この状態では自由に動くことが出来るので、熱線膨張差での応力は発生しないと考えます。半田硬化で初めてチップと基板の熱線膨張係数の差で応力が発生します。この状態では樹脂の Tg が半田溶融温度以下なので、樹脂の Tg 温度になるまでに発生する応力は、バンプを通じてチップに圧縮応力として働きます。樹脂の Tg が高い場合には冷却時に早期に高温側で固化しますので、バンプを通じて働く圧縮応力範囲は小さくなり、チップ全体に圧縮応力がかかりやすく、結果として応力は大きくなります。

6) Tg が高いものが応力は高いというが圧縮応力が高いものは信頼性あるのか

→圧縮応力が高いものの方が、バンプ及び樹脂の剥離には優位であり引張応力側にある材料よりは信頼性が高くなる。

7) 大きく反るとそれ自体問題になりますか？

→基板への実装で問題となります。

画像素子やメモリなどそり自体が問題になりますが、チップ設計自体が反りを考慮したものになりつつあります。

8) バンプのところの応力が見たいのか全体の応力が見たいのか如何ですか？

→全体の応力からバンプへの応力と今回のチップ変形応力とすべてをみたいと考えています。現在チップの変形応力以外の応力を観察する方法がありませんが、今後は明確にしてゆきたいと考えています。

9) 今後の半田付の世の中の将来方向は如何ですか？

→反り低減手法に低温化の流れがあります。

現状常温の金属接合や低温半田が候補材としてあります。

公聴会后、11:10~11:45に4号館会議室において主査と副査全員が審査員(4名)となり申請者に対し口頭試験を実施した。回答はいずれも的確であり、口頭試験の結果も合格と判定した。その後11:45~11:55に同会議室にて審査員4名にて最終審査会を開催した。学位論文の内容、口頭試験の結果、審査会および公聴会での質疑応答の内容を踏まえ、全会一致で当該学位論文を合格と判定した。

審査委員の結論として、申請学位論文は工学研究科博士学位申請取扱細則第7条の審査基準に照らして学位論文に値すると判定した。