

称号及び氏名 博士（工学） 中川 泰忠

学位授与の日付 平成 24 年 9 月 30 日

論文名 「半導体関連製品の製造プロセスにおける
最適化に関する研究」

論文審査委員 主査 横山 良平
副査 大多尾 義弘
副査 杉村 延広

論文要旨

半導体はコンピュータやスマートフォンのような情報機器，冷蔵庫や洗濯機のような家電製品，自動車や電車のような交通機器，各種産業機器など，多くの製品に搭載されている。これらの半導体関連製品の製造プロセスは，シリコンウエハ製造，半導体製造前工程，半導体製造後工程，実装，および組立てから構成されている。

半導体関連製品の製造プロセスの重大な課題の一つは，半導体回路の線幅微細化への対応である。微細化のためには，シリコンウエハ製造においては，ウエハの平坦度向上が求められる。このウエハ平坦度は，主に研磨工程で決定されるため，研磨条件を最適化する必要がある。また，ウエハ研磨を何度か実施した後は，ウエハから除去されたシリコンが研磨布に残留してウエハを傷付けないように，ダイヤモンド砥粒を埋め込んだドレッサを研磨布に押付けて回転させ，研磨布表面を削り取る。この工程は，ドレッシングと呼ばれる。このドレッシングした研磨布の表面形状がシリコンウエハ表面形状に影響するため，研磨布表面にも平坦性が求められる。以上の研磨およびドレッシングは除去加工であり，これらの解析には，連続体を対象として広範に用いられている有限要素法や差分法などの手法が適用できない。このため，数値解析に立脚した平坦度向上のための研究は少ないが，半導体回路の線幅微細化の点からは重要である。

上記の課題に加えて，半導体関連製品の製造プロセスのもう一つの重大な課題として，製品の信頼性向上が挙げられる。これには，半導体をプリント回路基板に実装する工程が大きく影響する。実装工程には，半導体チップと基板の間を樹脂で封止して接着する方法が実用化されている。この実装工程において，樹脂には基板から発生したガスにより気泡が発生するので，気泡をチップと基板の間から樹脂とともに外部へ排出させる必要がある。したがっ

て、気泡の残留を防止するためには、加熱開始から一定の時間は、樹脂が流動できるように粘度を一定の値以下に抑えておく必要がある。また、加熱完了時には、樹脂の接着性を確保するために、硬化反応率を一定の値まで到達させる必要がある。これらの要求に対して、過去の研究は樹脂接着の信頼性に関する現象の分析に留まっており、信頼性向上の点から最適な接着条件を提示するには至っておらず、不十分である。

もう一つの実装方式として、チップを樹脂で封止した半導体パッケージを、リフロー炉内で加熱してプリント回路基板にはんだ付けする方法がある。この工程は、リフロー工程と呼ばれる。この基板は、銅箔による回路パターンをもつ回路層と樹脂を基材とする絶縁層とを交互に積層した構造である。したがって、リフロー工程では、銅と樹脂との線膨張係数の相違により、基板に反りが発生する。この反りが大きくなると、半導体パッケージとはんだが密着せず、接続不良が発生する可能性がある。また、室温になった状態で基板に大きな変形が残留すると、製品の筐体に組み込めないなどの問題が発生する。この対策として、ダミーの銅パターンを追加したり、絶縁層を厚くしたりすることで、基板の変形を抑制することが経験的に行われている。これは、これらの設計変更によって、基板の線膨張係数や弾性が変化するためである。このダミーの銅パターンや絶縁層厚を決定するには、基板の設計とリフロー工程中および工程後における変形との関係を理解する必要がある。また、基板の変形を最小化するために、電気回路層に追加する銅の量や絶縁層厚を最適化する必要がある。しかしながら、過去の研究は基板変形の要因を扱っているだけで、上述した基板の変形を低減する設計を扱っていない。同様に、電気回路を含む積層材の実用的な設計に適したシミュレーションモデルは開発されていない。

本研究では、以上に述べた問題点を考慮し、半導体関連製品の製造プロセスにおける半導体回路線幅微細化と製品信頼性向上という課題に関連して、製造条件・設計最適化手法の構築と現実的プロセスへの応用拡大に取り組んだ。まず、両面研磨と研磨布ドレッシングは、シリコンウエハの平坦度向上が半導体回路の線幅微細化に大きく寄与するため、研磨条件とドレッサ形状を最適化した。また、半導体チップを樹脂でプリント回路基板に接着する工程では、接着信頼性向上や使用エネルギー低減の観点から、接着条件を最適化した。さらに、半導体パッケージを基板に実装する工程では、はんだ付け信頼性向上や製品組立て性向上の観点から、リフロー工程中およびリフロー工程後における基板の変形を抑制する基板最適設計を実施した。上記の対象とするプロセスには、製造条件および設計に関する変数や制約条件が多い、除去、接合といった状態の変化がある、材料や化学反応などによる非線形性があるといった特徴がある。これにより、製造条件および設計に関する変数に局所的最適解がいくつも存在するという場合があり、この場合には、従来の局所的最適化手法に加えて、大域的最適化手法も適用した。

本論文の構成を以下に示す。

第1章では、半導体関連製品とその製造プロセスについて概説し、製造プロセスにおける諸課題を述べ、製造プロセスにおけるこれまでの研究と本論文の位置づけ、さらに本論文の概要を述べた。

第2章では、シリコンウエハの両面研磨を対象として、ウエハ平坦度向上のために、研磨条件の最適化手法を提案した。そのために、まず、ウエハの運動をモデル化し、研磨量と比例関係にある摩擦距離を解析できるようにした。さらに、この摩擦距離がウエハ面内で均一となるように、両面研磨装置の太陽歯車、内歯車、上定盤研磨布および下定盤研磨布の回転角速度を最適化した。また、平坦度に関連する摩擦距離の面内での均一化に加えて、加工時間も評価関数として考慮することにより、短時間で高平坦化が見込める条件が決定できるこ

とを示した。以上の研磨条件の最適化では、加工量に対応する摩擦距離の上限値と下限値、機構的な制限による回転速度の上限値を、ペナルティ関数を用いることで制約条件として考慮することにより、現実のプロセスに対応した最適化が実施できることを示した。

第3章では、シリコンウエハ研磨プロセスで用いるドレッサを対象として、研磨布平坦度向上のために、ドレッサ形状の最適化手法を提案した。そのために、まず、ドレッサと研磨布の運動をモデル化し、ドレッサと研磨布との摩擦距離を定量的に解析できるようにした。そして、この運動モデルを用いて、研磨布削れ量を解析できるようにした。さらに、研磨布削れ量が均一化するように、ドレッサ形状を最適化する方法を示した。この方法で最適化した楕円状ドレッサを用いることにより、研磨布削れ量の差異を低減できるため、ウエハ加工精度向上に効果があること、さらに、研磨布の寿命向上に効果があることを示した。

第4章では、半導体チップのプリント回路基板への樹脂接着を対象として、接着条件の最適化手法を提案した。そのために、まず、樹脂の硬化反応と粘度変化に関するモデルのパラメータ同定法について提案した。この硬化反応は強い非線形現象で、硬化反応パラメータには局所最適解のいくつかの組が存在するので、同定には大域的最適化手法を適用した。そして、気泡の残留防止、硬化反応率確保および使用エネルギー低減という、工業的観点から重要な要件を満足するように、加熱温度履歴を最適化する方法を提示した。硬化反応率と粘度の時間変化は、強い非線形現象であり、温度履歴には局所最適値のいくつかの組が存在するので、再び大域的最適化手法を適用した。最後に、最適化した加熱温度履歴の有効性を、超音波探傷、温度サイクル試験および高温高湿試験により検証した。

第5章では、半導体パッケージのリフロー工程におけるプリント回路基板への実装を対象として、リフロー工程中の変形を抑制する基板の最適設計手法を提案した。そのために、まず、基板の回路層および絶縁層の機械的特性を複合材料の微視力学に基づきモデル化した。また、基板の応力・歪関係を、積層理論を用いてモデル化した。そして、リフロー工程における基板変形を抑制するために、回路層における銅面積比と絶縁層における厚さ増加率を設計変数とする設計最適化問題を定義した。この最適設計では、設計変更によるコストを最小化するためにペナルティを評価関数に導入した。このため、局所最適値のいくつかの組が発生するため、大域的最適化手法を適用した。そして、最適化事例により、少ない変形をより少ない設計変更で実現する基板最適設計の特徴を明らかにした。

第6章では、半導体パッケージのリフロー工程におけるプリント回路基板への実装を対象として、リフロー工程後の残留変形を抑制する基板の最適設計手法を提案した。そのために、まず、基板に用いられる樹脂の粘弾性特性を実験で明らかにし、第5章で構築した解析モデルに導入することで、リフロー工程後に残留する変形を解析できるようにした。そして、この基板変形を抑制するために、回路層における銅面積比と絶縁層における厚さ増加率を決定するように設計最適化問題を定義した。さらに、第6章でも、設計変更によるコスト最小化を考慮し、大域的最適化手法を適用した。そして、最適化事例により、少ない残留変形をより少ない設計変更で実現する基板最適設計の特徴を明らかにした。最後に、初期設計と回路層における銅面積比を変更した最適設計の基板について、リフロー工程後の変形をレーザ変位計により測定し比較することにより、基板変形低減に対する最適設計の有効性を検証した。

第7章では、結論として本論文で得られた成果を総括するとともに、今後の展望について述べた。

審査結果の要旨

本論文は、半導体関連製品の製造プロセスにおける半導体回路の線幅微細化への対応および製品の信頼性向上という課題に関連して、それぞれ研磨および実装工程における製造・設計条件の最適化に関する研究の成果をまとめたものである。研究対象とした工程には、複雑な製造・設計条件が存在する、除去および接合という複雑な状態変化が生じる、ならびに材料および化学反応特性に非線形性が存在するという特徴があり、本論文では、従来の局所的最適化に加えて、大域的最適化にも取り組み、より現実的なプロセスへの応用拡大を図っており、それによって以下の成果を得ている。

(1) シリコンウエハ製造におけるウエハの平坦度を向上させるために、ウエハ自体の研磨工程、ならびに研磨を実施した後の研磨布表面を削り取るドレッシングを対象に、これらの除去加工をモデル化するとともに、最適化手法と組合せ、それぞれウエハの研磨およびドレッサ形状に関する最適条件を明らかにしている。

(2) 加熱によって半導体チップとプリント回路基板の間を樹脂で封止して実装する工程を対象とし、接着性の点から樹脂の粘度および硬化反応率を時間経過に伴って適切に調整するために、実験で樹脂の特性を同定するとともに、加熱実装工程をモデル化し、さらに最適化手法と組合せ、最適な接着条件を明らかにしている。また、実験によりその有効性を確認している。

(3) チップを樹脂で封止した半導体パッケージを炉内で加熱してプリント回路基板にはんだ付けして実装するリフロー工程を対象に、はんだの密着性を高めたり、製品を筐体に確実に組み込めるようにするために、リフロー工程中およびリフロー工程後における基板の変形をモデル化するとともに、最適化手法と組合せ、最適なダミーの銅の量および絶縁層厚さの設計条件を明らかにしている。また、実験によりその有効性を確認している。

以上の諸成果は、半導体関連製品の製造プロセスにおける製造・設計条件を合理的に導出するための手法、ならびにその具体的な応用によって得られた有益な知見を与えるものであり、半導体関連製品の製造技術の発展に貢献するところ大である。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。本委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、申請者に対して博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。