

氏 名	三 浦 英 生
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 4 年 9 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 58 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	樹脂封止型半導体装置内半導体素子応力測定に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 関根 英樹 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 江刺 正喜 東北大学教授 坂 真澄

論 文 内 容 要 旨

半導体製品，特に L S I (Large Scale Integration) 素子の開発は，高集積化・多機能化の観点から活発に進められており，D R A M (Dynamic Random Access Memory) 製品では 3～4 年で 4 倍のメモリ容量増加が達成されている。

一方，集積度向上の観点から微細加工技術の開発も並行して進められているが，メモリ容量の増加速度には追従できていないため L S I 素子寸法は増加の一途をたどっている。例えば D R A M 製品においては，メモリ容量が 256k ビットから 4 M ビットへ 16 倍に集積化される一方で，素子寸法は約 32mm² から約 90mm² へと約 3 倍も増加している。この素子寸法の増加が，製品開発段階で様々な不良を発生させる原因となってきた。

半導体素子は，その 80% 以上が量産性に富んで生産コストが低く，かつ信頼性にも優れている樹脂封止型半導体装置に搭載されている。この樹脂封止型半導体装置においては，半導体素子すなわちシリコンが，シリコンよりも約一桁線膨脹係数が大きい樹脂で覆われた構造となっている。この樹脂封止は，熱硬化性樹脂を使用して約 200℃ で行われるため，室温近傍では半導体素子には圧縮残留応力が発生する。従来，半導体素子寸法は装置寸法と比較して十分小さかったため，発生する応力も低く，製品開発の妨げにはならなかった。しかし，既に述べたように半導体素子寸法が急速に大形化してきたため発生応力も急増する傾向にあり，この応力が様々な不良を発生させる場合が生じてきた。代表的な不良例としては，機械的な破壊と素子の電気特性変動が挙げられる。

機械的な破壊事例としては，1) 封止樹脂が割れて製品の耐湿性を著しく劣化させる，2) 半導

体素子と外部電極となる金属リードフレームの間を接続する約 $30\mu\text{m}^{\phi}$ の金製ワイヤが断線する、3)半導体素子が割れる、などがある。また、電気特性不良事例としては、素子の抵抗値変動、トランジスタ特性の劣化（リーク電流の増加、電流増幅率の低下等）などが多発している。

このように、樹脂封止型半導体製品の開発において、製品の製造工程あるいは使用環境において製品内部に発生する応力を正確に把握し、装置構造あるいは構成材料の最適化を達成することが、製品の信頼性を向上させる上で非常に重要な課題となってきた。

樹脂封止型半導体装置内部の応力測定方法としては、従来から透明樹脂の光弾性効果を応用した方法や、シリコンのピエゾ抵抗効果を応用した方法が適用されていた。光弾性法は、半導体装置の内部構造変化に基づいた樹脂内部の応力分布の変化を測定するには有効な方法であるが、測定専用の透明樹脂を使用する必要があり、実際の製品に使用されるシリカ粉や染色用のカーボンブラックが添加された樹脂を使用した製品レベルでの測定が困難であった。一方、シリコンのピエゾ抵抗効果を応用した方法は、半導体素子にひずみゲージを内蔵させることが可能であることから実製品レベルでの応力測定を行うことができる優れた方法であるが、従来使用されてきた技術では、半導体素子に発生している応力を3次元の各成分ごとに分離検出することができなかったため、応力の絶対値測定が困難であった。

このように、樹脂封止型半導体装置開発においては、製品の信頼性向上を図る上で、半導体素子に発生する応力を正確に測定する技術開発が望まれていたが、これまでは有効な測定方法が見だされていなかった。

以上のような樹脂封止型半導体装置における応力問題及び応力測定に関する技術ならびに研究の現状を踏まえ、本研究では、樹脂封止型半導体装置内部の半導体素子に発生する応力を高精度かつ3次元の応力成分ごとに分離測定する技術の確立と、開発した測定方法の実製品への適用を試みた。応力測定法としては、シリコンのピエゾ抵抗効果を取り上げ、ひずみゲージとして使用する抵抗体として、電子伝導型の抵抗体と正孔伝導型の抵抗体を共存させるという新しい構造を実現することにより、半導体素子に発生している応力を3次元成分ごとに分離測定できることを明らかにした。本技術は米国、ECにおいて特許が成立し独自技術であることが確認できた。提案した構造の応力測定素子を世界に先駆けて試作し、測定機能の有効性を明らかにするとともに、本素子を実製品の応力測定に適用して応力発生メカニズムを実験的に明らかにした。さらに、4MビットDRAM製品開発に本応力測定素子を適用し、新しい樹脂封止構造における応力発生メカニズムを明らかにし、低応力装置構造開発への指針を示した。

第1章 緒 論

第1章では、近年の半導体素子の開発状況及び今後の製品動向として、高集積化と微細加工技術の進展に伴い顕在化してきた応力問題に触れ、特に樹脂封止型半導体装置内部の応力測定方法に関する従来の研究状況を概観した後に、本研究の動機と目的、本論文の構成ならびに内容の概略に言及する。

第2章 素子応力の3次元成分分離測定法に関する研究

第2章では、始めに piezo 抵抗効果について述べ、piezo 抵抗効果を応用して半導体素子に発生している応力を3次元成分に分離検出するための方法を提案する。半導体素子表面に電子伝導型と正孔伝導型の抵抗体を、2種類の不純物を拡散させて形成することによりひずみゲージを構成することで、一結晶面上で独立した6個の抵抗率変化を検出することが可能となり、ゲージ抵抗の変化に寄与している3次元の応力成分（6成分）を分離できることを示し、具体的なひずみゲージ構造を提案する。

第3章 応力測定素子の素子特性評価に関する研究

第3章では、第2章で提案した応力測定素子構造を具体的に実現する方法について述べる。次に、実際に試作した応力測定素子の基本特性を評価し、試作素子を使用して3次元の応力成分を1MPaの分解能で分離測定することが可能であることを明らかにする。さらに、温度環境変化に伴う熱応力の測定方法について述べ、試作素子特性の温度依存性も明らかにし、通常の半導体素子使用温度範囲である -55°C から 150°C の温度範囲で本試作素子を使用して熱応力の測定が行えることを明らかにする。

第4章以下では、試作した応力測定素子を使用して、実製品の組み立て工程あるいは使用環境における応力測定を試みた結果について述べる。

第4章 ダイボンディング工程における素子応力測定に関する研究

第4章では、試作した応力測定素子を使用して、樹脂封止型半導体装置の組み立て工程の中で、半導体素子と金属リードフレームを接着するダイボンディング工程において半導体素子に発生する応力を検討する。特に、発生応力の材料構成依存性及びリードフレーム構造依存性を明らかにするとともに、低応力接着構造設計指針を提案する。また、次世代主力製品となる4MビットDRAM製品対応として、外部リードを素子搭載部にも利用するという新しく提案したリードフレーム構造を実際に試作し、新提案構造を採用することにより、大形半導体素子に対しても低応力ダイボンディングが可能となることを示す。

第5章 樹脂封止工程における半導体素子応力に関する研究

第5章では、樹脂封止工程において半導体素子に発生する応力を検討する。発生応力と封止用樹脂の強度特性との関係及び発生応力と装置内部構造との関係を明らかにし、樹脂封止型半導体装置設計指針となる半導体素子応力評価パラメータを提案する。さらに、大形の半導体素子搭載を目的として新しく提案したリードフレームを使用した樹脂封止型半導体装置における素子応力発生メカニズムを、本応力測定素子を使用して明らかにし、新装置構造を4MビットDRAM製品開発に適用した事例について述べる。

第6章 樹脂封止型半導体装置内半導体素子に発生する熱応力に関する研究

第6章では、組み立てを完了した半導体装置内部の素子応力の、装置使用環境温度依存性について検討する。素子応力の装置エージング処理依存性あるいは通常使用環境放置時の応力変動について明らかにする。さらに、半導体素子と金属リードフレームの接着状態が素子応力変動に大きな影響を与えることを示し、装置の長期信頼性を確保する上で望ましい材料構成設計法について述べる。また、装置内部の異種材料接着界面の接着状態評価に超音波探傷法の応力が有効であることも示す。さらに、本応力測定素子を使用して、樹脂封止型半導体装置の放熱特性を示す、装置の熱抵抗が測定できることを明らかにし、本機能を応用して樹脂封止型半導体装置の熱抵抗を評価した結果についても述べる。特に、新しく提案したリードフレーム構造を使用した半導体装置においては、装置の熱抵抗が大幅に減少し、良好な放熱特性を示すことを明らかにする。

第7章 樹脂封止型半導体装置内素子応力の経時変化に関する研究

第7章では、樹脂封止型半導体装置内部応力の経時変化について検討する。まず、吸湿性を持つ封止用樹脂が水分を吸収した場合の半導体素子応力の変化について検討する。次に、温度サイクル環境における半導体素子応力の変動について検討する。温度サイクル環境における素子応力の変動を応力測定素子を使用して測定し、素子応力がサイクル数の増加に伴い単調に増加し、その増加量が20%を越える場合があることを明らかにする。この応力変動の原因は封止用樹脂の粘弾性挙動にあることを明らかにし、応力変動の予測法について述べる。

第8章 結 論

第8章では、本研究で得られた結論について述べる。

本研究によって得られた成果を要約すると次の様になる。

(1) 樹脂封止型半導体装置内部の半導体素子応力の測定方法として、シリコンのピエゾ抵抗効果を応用し、半導体素子表面に電氣的に極性の異なる二種類の不純物を拡散させてひずみゲージを構成することにより、半導体素子に発生している応力を3次元成分に分離測定する方法を明らかにした。

応力測定素子を試作してその基本特性を明らかにし、 -55°C から 150°C の通常半導体装置使用温度範囲において、1 MPaの分解能で応力測定が行えることを示した。

(2) 半導体装置の組立工程の中から、応力評価が最も重要な、半導体素子と金属製リードフレームの接着工程及び樹脂封止工程を取り上げ、素子応力に及ぼす装置構成材料及び装置内部構造の影響を実験的に明らかにした。また、半導体装置設計の指針となる半導体素子応力の評価パラメータとして、樹脂特性パラメータを提案した。

(3) 製品の実使用環境を想定して、定常温度状態において半導体素子に発生する熱応力を応力測定素子を使用して検討し、発生応力に及ぼす装置構造の影響を明らかにした。特に半導体素子と金属製リードフレームの接着状態が素子応力の変動に大きな影響を与えることを明らかにし、応力変動を防止する装置構造設計指針を提案した。また、装置内部の接着界面の非破壊検査方法として、超

音波探傷法が有効であることを示した。

(4) 温度サイクル環境における半導体素子の応力を、応力測定素子を使用して検討し、温度サイクルの進行に伴い素子応力が増加する現象が存在することを明らかにした。この応力増加現象は、封止用樹脂の粘弾性挙動に起因していることを示し、応力変動の簡易評価法を提案した。

(5) 本応力測定素子を実製品設計開発に適用し、本素子が製品の低応力構造設計に有効な評価技術となることを確認した。本素子を使用して得られた低応力構造設計指針に基づいて提案した、4 MビットDRAM製品対応の新型リードフレームを使用した樹脂封止装置構造において、低応力ダイボンディングが行えること、樹脂封止後の素子応力設計が容易に行えること、装置の低熱抵抗化が図れることを明らかにし、高信頼性半導体装置の開発に貢献した。

審査結果の要旨

半導体装置の強度信頼性の問題は、急速な高集積化と共に顕在化し、低応力構造設計指針の確立が要請され、そのために、半導体素子に発生する応力の三次元成分を測定する方法の開発が急がれていた。

本論文は、半導体素子に、拡散抵抗層を利用して、特殊構造のひずみゲージを形成することにより、素子に発生している応力を三次元成分に分離測定することに成功し、その学術的基礎を確立したもので、全編8章からなる。

第1章は緒論である。

第2章は、ピエゾ抵抗効果を応用して特定の結晶面上で独立した6個の抵抗率変化を検出する方法を考案し、応力を三次元成分に分離検出することを可能にしている本論文の理論的基礎を与えた画期的な成果を示したものである。

第3章では、第2章で提案した応力測定素子を試作し、実用上十分な分解能を有することを確認すると共に、通常の使用環境温度範囲で熱応力測定が可能であることを実証している。工業上有用な成果である。

第4章では、試作した応力測定素子を使用して、金属リードフレームを接着するダイボンディング工程において発生する応力を測定し、応力低減のための構造設計指針を与えている。

第5章では、樹脂封止工程において半導体素子に発生する応力について検討し、樹脂の強度特性や半導体装置内部構造と発生応力の関係を明らかにしている。

第6章では、組立てを完了した半導体装置内部の素子応力の使用温度依存性について検討し、長期信頼性を確保する上で望ましい材料構成について述べている。

第7章では、温度サイクル環境における素子応力の変化について考察し、応力変動の原因を明らかにすると共にその予測法を述べている。

第8章は結論であり、本研究の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、半導体素子の応力を三次元的に測定する方法をはじめて考案し、半導体装置の低応力設計の基礎を確立したもので、強度設計学ならびに固体力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。