IC プラスチックパッケージ内シリコンチップ 熱応力の検討*

三 浦 英 生^{*1}, 西 村 朝 雄^{*1}
河 合 末 男^{*1}, 西 邦 彦^{*2}

Thermal Stress in Silicon Chips Encapsulated in IC Plastic Packages

Hideo MIURA, Asao NISHIMURA, Sueo KAWAI and Kunihiko NISHI

Thermal stress in silicon chips encapsulated in IC plastic packages was discussed using stress-sensing chips which the authors developed utilizing the piezoresistive effect of silicon. Sensor chips were encapsulated in dual-in-line-type packages using various combinations of packaging materials: metallic leadframe, die-bonding paste, and resin. Thermal stress in the silicon chip was measured with changing oven temperature between 20°C and 100°C. It was found that thermal stress in silicon chips changes almost linearly with temperature. The stress varied with the material combination of the package from 75 MPa to 110 MPa when the temperature decreased from 100°C to 20°C. However, the thermal stress varied irreversibly with temperature when epoxy paste was used as the die-bonding paste. This unstable stress change with temperature was due to propagation of the delamination between a silicon chip and metallic leadframe.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Piezoresistive Effect, Thermal Stress Delamination, Ultrasonic Inspection, Structural Reliability, IC Plastic Package

1. 緒 言

IC プラスチックパッケージはシリコンチップ、金属リードフレーム等をトランスファモールド用エポキシ樹脂（レジン）で封止した構造となっている（図1参照）。封止用樹脂はシリコンチップあるいは金属リードフレームより大きな熱膨張係数を持ち、封止工程が約 200°Cで行われるため、室温近傍の使用条件ではシリコンチップ内部には圧縮残留応力が発生している。近年、半導体の高集積化が進められる一方で、チップ寸法が大形化しているため残留応力が急増する傾向にあり、構成材料の割れや異種材料界面接着はく離などの機械的不良⁽¹⁾⁽²⁾あるいは抵抗値やトランジスタ特性の変化などの電氣的不良⁽³⁾⁽⁴⁾が発生する場合は生じてきた。さらに半導体製品の普及に伴い自動車や大型計算機などに使用される製品では、その使用環境温度範囲が広がり、場合によっては一日の環境温度落差が 100°Cを越えるような製品も現れてきた。このため製品

の信頼性向上を図るためには、使用環境温度の変化に伴う残留応力変化（熱応力変化）を正確に把握し、製品の寿命予測あるいは特性変動予測などを行うことが重要となってきた。

半導体製品内部の応力を測定する技術としては、これまでにひずみゲージを利用した測定方法⁽⁵⁾や光弾性法を応用した測定方法⁽⁶⁾が報告されているが、近年製品の実使用状態での応力測定が可能なことからシリコンチップのピエゾ抵抗効果⁽⁷⁾⁽⁸⁾を応用した測定方法が盛んに活用されるようになってきた^{(9)~(13)}。著者らはピエゾ抵抗効果を応用してシリコンチップに発生する

図 1 IC プラスチックパッケージ構造例

* 平成 3 年 4 月 1 日 第 68 期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成 2 年 12 月 3 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所 機械研究所 (〒300 土浦市神立町 502)。

^{*2} (株)日立製作所 半導体設計開発センター (〒187 小平市上本水町 5-20-1)。

応力を三次元成分に分離検出する機能を持つ応力測定素子を開発し、これまでにICプラスチックパッケージの組立工程においてシリコンチップに発生する応力のパッケージ構成材料依存性あるいはパッケージ構造依存性などを明らかにしてきた^{(14)~(16)}。

本報では、ICプラスチックパッケージの使用環境温度変化に伴う熱応力変化について検討した結果につきその概要を以下に述べる。

2. 実験方法

熱応力測定に使用した応力測定素子寸法は、長さ9 mm、幅4 mm、厚さ0.4 mmであり、チップ表面に応力分布の測定を目的として15個の応力センサ(センサ寸法:0.8×0.7 mm²)を内蔵したもので、各センサの熱応力の測定分解能は1 MPaである。本素子を幅約7.6 mm、長さ約19 mm、樹脂厚さ約3 mmの図1に示した形状のプラスチックパッケージに搭載し、恒温槽内部に放置することにより定常状態での応力測定を行った。パッケージ組立に使用した構成材料の機械特性を表1にまとめて示す。金属リードフレーム材料として低熱膨張の42NiFeと熱放散性に優れた銅合金を、シリコンチップと金属リードフレームを接着する接着剤として弾性率の異なる金シリコン共晶接合、エポキシ系接着剤およびシリコンゴム系接着剤を、封止用樹脂としては熱膨張係数とヤング率の異なる3種類のエポキシ系樹脂をそれぞれ使用してさまざまな材料構成のパッケージを試作した。なお、同一構成材料で12個のパッケージを試作して応力測定を行った。

シリコンチップ応力はチップ表面中心に配置したセンサを使用して測定した。熱応力の測定は一般の半導体パッケージ製品の使用温度上限が70°Cから75°Cであることから室温(20°C)から100°Cの温度範囲で行い、昇降温速度は毎時60°Cとし、各測定温度で10分保持した後測定を行った。

応力測定の手順を以下に示す。応力センサの各ゲ-

ジ抵抗は温度と発生応力に依存して式(1)に示したように変化する。

$$\Delta R/R = \beta(T) + \pi(T) \cdot \sigma \cdots \cdots (1)$$

ここで $\Delta R/R$ は抵抗値変化率、 β は抵抗温度係数、 π はピエゾ抵抗係数、 T は温度、 σ は応力である。このため、熱応力の測定には温度測定とゲージの抵抗測定が必要となる。 β 、 π の温度変化の詳細は前報⁽¹⁴⁾で報告したのでここでは省略するが、一次近似で β は 1.3×10^{-3} 、 π は 1×10^{-10} m²/N程度の値を持っている。発生応力は式(1)を変形して、

$$\sigma = \{(\Delta R/R) - \beta(T)\} / \pi(T) \cdots \cdots (2)$$

から求めることができる。シリコンチップの温度は応力測定素子に内蔵させた温度センサを使用して測定した。その後、各センサゲージの抵抗値を測定して熱応力を式(2)を使用して算出した。一点の測定時間はパーソナルコンピュータを使用して約1秒であった。

3. 熱応力の構成材料依存性

3.1 封止樹脂依存性 金属リードフレームとして42NiFe材を、シリコンチップと金属リードフレームを接着する接着剤(以下ダイボンディング材と呼ぶ)としてシリコンゴム系接着剤をそれぞれ使用してパッケージを試作した場合のシリコンチップに発生する熱応力(圧縮応力)の測定例を図2に示す。図の横軸は測定温度、縦軸は100°Cにおける応力を0 MPaと仮定した場合の発生圧縮熱応力(チップ長手方向垂直応力成分)を示している。図中には表1に示した3種類の樹脂で封止した場合の測定結果をそれぞれ示している。発生圧縮熱応力は温度の低下とともに温度落差に比例して単調に増加することがわかる。この発生応力は昇降温過程で可逆的に変化し、昇降温を繰返しても再現性があることが確認された。測定温度範囲におい

表1 パッケージ構成材料機械特性

Material	Young's Modulus (GPa)	Thermal Expansion Coefficient ($\times 10^{-6}$ /°C)
Si	171	2.7
42NiFe	148	5
Cu Alloy	113	17
Epoxy Paste	0.35	60
Rubber Paste	0.01	150
Resin A	15	24
Resin B	15	20
Resin C	13	18

図2 シリコンチップ発生熱応力測定例

て封止樹脂は脆性破壊挙動を示し、かつヤング率の温度依存性も少ない⁽¹⁷⁾ため、熱応力が温度落差にほぼ比例して発生しているものと考えられる。図3には温度落差 80°C の場合のシリコンチップ熱応力（圧縮応力）のチップ長手方向および幅方向垂直応力成分の封止樹脂依存性をまとめて示す。図の横軸は樹脂特性パラメータで、樹脂とシリコンの熱膨張係数差と樹脂のヤング率の積である。発生熱応力はこの樹脂特性パラメータにほぼ比例して増加することがわかる。図中には各 12 個のパッケージで測定した結果の個体ばらつきの範囲も示している。測定ばらつきは平均値に対して 10% 以内に入っている。なお、先に述べたように各パッケージにおいて発生する応力は再現性があり変化しない、応力センサの特性の個体ばらつきが約 10% あることを考慮すると、この測定値の個体ばらつきはセンサ特性の個体ばらつきによるものと考えられる。また、熱応力はシリコンチップ内部で等方的ではなく、チップ長手方向垂直応力成分のほうが幅方向垂直応力

成分よりも約 30% 大きな値を示している。この差は、シリコンチップ形状、パッケージ形状ともにチップ長手方向に細長い形状になっているというパッケージ構造に起因したものである。

発生熱応力が温度落差にほぼ比例することから、有限要素法を使用した熱弾性解析で発生する応力を解析できると考え、平面ひずみ問題と仮定して応力解析を行った。図4に解析に使用した要素分割例を示す。解析はパッケージ長手方向断面（チップ幅方向）について、対称性を考慮して二分の一の断面について行った。本例では節点数 1 070、要素数 930 である。解析には表 1 に示した材料定数を使用した。温度落差を 80°C とし、解析した結果と測定結果（いずれもチップ幅方向圧縮垂直応力）を比較してまとめたものを図5に示す。解析応力は樹脂特性パラメータの増加に従い単調に増加していることがわかる。また、解析値は測定値平均と比較して約 10 MPa 小さな値を示しているものの、ほぼ一致していることが確認される。したがって、パッケージ内部に発生する熱応力は室温近傍の材料定数を使用して、有限要素法による熱弾性解析で評価でき

(a) シリコンチップ長手方向応力

(b) シリコンチップ幅方向応力

図3 シリコンチップ発生熱応力（温度差 80°C）

図4 パッケージ応力解析要素分割例

図5 解析熱応力と測定熱応力の比較
（シリコンチップ幅方向垂直応力）

ることが明らかとなった。

3・2 ダイボンディング材依存性 ダイボンディング材はシリコンチップと金属リードフレームを接着する働きを持つため、チップ応力にも大きな影響を持つ。特に金属リードフレーム材の熱膨張係数がシリコンチップと比較して大きくなるほど顕著にその影響が現れる。この両材料間の熱膨張係数差が大きくなると、前報⁽¹⁴⁾で示したようにシリコンチップと金属リードフレームを安定に接着することは困難となり、接着はく離が発生する。いったん接着はく離が生じると、はく離の状態に応じて応力値が大きく変動する可能性がある。そこで、ダイボンディング材を変更した場合のパッケージ内部応力の変化について次に検討した。封止用樹脂としては樹脂Bを使用し、金属リードフレームとダイボンディング材の組合せを種々変えてパッケージを試作して応力測定を行った。

金属リードフレームとして42NiFe材を使用した場合の測定例を図6に示す。図の横軸は測定温度、縦軸はチップ中心幅方向垂直応力（圧縮応力）であり、100°Cでの応力値を0 MPaと仮定している。図中には3種類のダイボンディング材で接着を行った場合の測定例をそれぞれ示している。金シリコン共晶接合およびシリコンゴム系接着剤を使用した場合には、熱応力は温度の低下に伴い単調に増加し、昇降温過程で可逆的な変化を示す。これは、いずれの接着法でも接着状態が安定に保たれる⁽¹⁴⁾ためと考えられる。発生応力は金シリコン共晶接合を使用したほうが約10%高くなっている。本試作パッケージにおいてはシリコンチップがパッケージ厚さ方向のほぼ中心に位置しているため、チップ上下部の樹脂の収縮力が等しくなり、樹脂封止時にはシリコンチップの反り変形に起因した曲げ応力は発生しない。この場合、シリコンチップにはチ

ップより熱膨張係数の大きい金属リードフレームの収縮に伴う圧縮応力も加わることになる。このため、接着力の高い接着方法の順、すなわち金シリコン共晶接合、シリコンゴム系接着剤の順に発生応力（圧縮応力）が高くなる。

一方、ダイボンディング材としてエポキシ系接着剤を使用した場合は、発生応力は昇降温過程で不可逆変化を示すなど、大きく変動することが明らかとなった。温度の低下とともに応力値が増加するという傾向は同じであるが、単位温度落差当たりの応力増加量は一定していない。さらに、発生応力は降温過程と昇温過程で異なり、同一温度で測定される応力値に再現性が認められなかった。

図7に金属リードフレームとして銅合金を使用した場合の応力測定例を示す。銅合金を使用する場合は、シリコンチップと銅合金の熱膨張係数差が大きいため、ダイボンディングの際の発生応力が大きくなりすぎてチップ割れを生じるため、金シリコン共晶接合は使用していない。本測定結果においてもシリコンゴム系接着剤を使用した場合には発生圧縮応力は温度落差に比例して単調に増加しているが、エポキシ系接着剤を使用した場合には発生応力は温度変化に対して不可逆変化を示した。

ダイボンディング材としてエポキシ系接着剤を使用した場合のような不安定挙動の原因としては、シリコンチップと金属リードフレーム間の接着状態の変化（接着はく離の進行）が考えられる。実際、エポキシ系接着剤を使用した場合にはダイボンディング工程において接着はく離が発生する場合があることが確認されている⁽¹⁴⁾。さらに、パッケージに温度サイクル負荷を加えると異種材料の接着界面において接着はく離が進行することが報告されている⁽²⁾ことから、シリコンチ

図6 シリコンチップ応力のダイボンディング材依存性

図7 シリコンチップ応力のダイボンディング材依存性

チップと金属リードフレームの接着界面における接着状態がチップ応力に及ぼす影響を次に検討した。

図8にエポキシ系接着剤を使用して全面接着が達成された場合と全面はく離が生じた場合のチップ中心におけるチップ幅方向垂直応力の有限要素法解析結果(温度落差80°C)を測定結果の応力変動幅とともに示す。ここで、応力変動幅とは、1個のサンプルにおいて昇降温を繰返した場合に、室温(20°C)で測定された応力値の最大値と最小値の差のことである。金属リードフレーム材として42NiFe材を使用した場合には解析応力変動幅は約10 MPaと小さいが、銅合金を使用した場合は変動幅(解析値)は30 MPa以上に達し、相対的には30%以上も発生応力が変動することが明らかとなった。この接着はく離に伴う解析応力値の変動幅は実際に測定された応力変動幅とほぼ一致しており、エポキシ系接着剤を使用した場合の熱応力変動はシリコンチップと金属リードフレームの接着状態の変化に起因したものであると考えられる。

さらに、昇温過程と降温過程で応力変動の状況が異なり(不可逆変化を示すこと)、再現性が認められない原因については、次の二つの理由を考えることができる。まず、接着はく離を起こした界面が平坦ではなく凹凸状態にある場合に、いわゆるアンカー効果により接着状態が不連続的に変化し、発生応力が不連続および不可逆的に変動することが考えられる。次に、接着はく離の状況が温度サイクル負荷(昇降温の繰返し)とともに変化する、すなわち接着はく離が進行することが考えられる。そこで、温度サイクル負荷に伴うシリコンチップと金属リードフレーム界面の接着はく離の有無を確認するため、超音波映像装置(周波数25 MHz)を使用して同接着界面の観察を行った。

図9に観察映像例を示す。超音波はパッケージ上面から垂直入射させ、シリコンチップと金属リードフレ

ーム接着界面からの反射波を検出することにより観察を行った。図9には同一サンプルについて(a)初期状態、(b)室温(20°C)と100°Cの間の温度サイクルを50サイクル経過後、および(c)100サイクルを経た後の観察例をそれぞれ示している。図中黒色に見える部分がはく離が発生している場所に相当する。本観察例から明らかなように、初期状態ではシリコンチップ/金属リードフレーム界面はほぼ全面接着が達成されているが、温度サイクル負荷を受けることによりシリコンチップの四隅からチップ中央に向かってはく離が進行していく。この結果から、温度サイクル負荷によりシリコンチップ/金属リードフレーム界面の接着状態が変化していくことが確認された。

以上の解析結果から、ダイボンディング材としてエポキシ系接着剤を使用した場合にシリコンチップに発生する熱応力の不安定現象(経時変化)は、シリコンチップ/金属リードフレーム界面の接着状態の変化によるものであることが明らかとなった。なお、昇温あるいは降温過程における発生応力の非線形現象は、先に述べた接着はく離界面の凹凸に伴うアンカー効果作用によるものと考えられる。

4. 結 言

ICプラスチックパッケージ内のシリコンチップに発生する熱応力に及ぼす構成材料の影響を、著者らが

図8 チップ/リードフレーム接着のチップ応力への影響

(a) 初期状態

(b) 温度サイクル50サイクル後

(c) 温度サイクル100サイクル後

図9 チップ/リードフレーム接着状態の超音波観察例

開発した応力測定素子を応用して検討し、以下の知見を得た。

(1) 室温から 100°Cまでの温度範囲でシリコンチップ熱応力は温度落差にほぼ比例して発生する。発生応力は室温近傍の材料定数を用いた有限要素法熱弾性解析で予測できる。

(2) シリコンチップと金属リードフレーム界面の接着状態が変化すると、構成材料が同一でも発生熱応力は最大約 30% も変化する。

(3) エポキシ系接着剤をシリコンチップ/金属リードフレーム接着に使用した場合には、温度サイクル負荷に伴い接着はく離が進行する場合があります、発生熱応力は不連続、不可逆的に変化する。

(4) いったん接着界面にはく離が発生すると、温度変化に対する発生熱応力は非線形的に変動するため応力変動状態を予測することは困難であるが、最大変動幅は解析により予測することができる。

文 献

(1) Nishimura, A., ほか 3 名, *IEEE Trans. CHMT*,

CHMT-10-4(1987), 637.

(2) Nishimura, A., ほか 2 名, *IEEE Trans. CHMT*, CHMT-12-4(1989), 639.

(3) 鈴木・小松, 応用物理, 48-12(1979), 1211.

(4) Smith, C. S., *Phys. Rev.*, 94(1954), 42.

(5) 扇谷・岩崎, 第 11 回日科技連信頼性保全性シンポジウム発表報文集, (1981-6), 311.

(6) 長谷川・ほか 4 名, 電子通信学会技術研究報告, (1988), R85.

(7) Machova, A. and Kadeckova, S., *Czech. J. Phys.*, B27 (1977), 555.

(8) Kanda, Y., *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-29 (1982), 64.

(9) 芹沢, 第 14 回日科技連信頼性保全性シンポジウム発表報文集, (1984-6), 64.

(10) Spencer, J. L., ほか 6 名, *Proc. 19th Ann. Reliability Physics Symp.*, (1981), 74.

(11) Edwards, D. R., *Proc. 33rd Electronic Components Conf.*, (1983), 386.

(12) Usell, R. J. and Smiley, S. A., *Proc. 19th Ann. Reliability Physics Symp.*, (1981), 65.

(13) Groothuis, S., ほか 2 名, *Proc. 23rd Ann. Reliability Physics Symp.*, (1985), 182.

(14) 三浦・ほか 3 名, 機論, 55-493, A(1987), 1826.

(15) 三浦・ほか 3 名, 機論, 55-513, A(1989), 1763.

(16) 三浦・ほか 3 名, 機論, 56-522, A(1990), 365.

(17) 西村・矢口・河合, 材料, 38-434(1989), 1322.