IC プラスチックパッケージ内シリコンチップ残留応力の検討*

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

Residual Stress in Resin-Molded IC Chips

Hideo MIURA, Asao NISHIMURA, Suetō KAWAI, and Kunihiko NISHII

Residual stress in IC silicon chips molded using epoxy resin is discussed. Stress-sensing chips were used for the measurement of residual stress which developed during assembly processes for IC plastic packages. It was found that the stress field in a silicon chip was almost equal to the plane stress field. The thermal expansion coefficient of molded resin had a strong effect on the chip stress. Thermal stress fields in the IC plastic packages were analyzed by the finite element analysis method. It was found that the FEM analysis could predict the stress fields in packages with about 10% error. The stress change in IC chips was measured under the reliability test condition for IC packages. It was found that both temperature cycles and moisture in the package had an effect on the stress change of IC chips. But the stress did not change in a room temperature environment.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Residual Stress, Thermal Stress, Structural Reliability, IC Plastic Package

1. 緒 言

IC, LSI チップは、その 80%以上がエポキシ樹脂(レジン)封止(モールド)したプラスチックパッケージに実装される。このプラスチックパッケージは、図 1 に示したように Si チップ、リードフレームをエポキシ樹脂が覆った構造となっている。これらの構成材料は線膨張係数が異なるため、150°C 以上の高温で行われるモールドやダイボンディング(チップとリードフレームの接着)などの組立工程で、図 2 に示したように室温までの冷却過程でパッケージ内に熱応力が発生する⁽¹⁾。

近年、LSI チップの集積度が急速に高まるとともにチップ寸法も大形化してきたため、この熱応力も急増する傾向にあり、応力に起因したさまざまな不良が発生するようになってきた。代表的な不良例としては、樹脂クラック、チップクラックなどの機械的不良⁽²⁾や電気的な特性変動不良⁽³⁾が挙げられる。このような不

良をなくし、製品の信頼性を向上させるためには、パッケージの開発段階でこの発生応力を正確に把握して、構造および構成材料の最適化を図る必要がある。

そこで著者らは、パッケージ内に発生する応力の測定を目的に、ピエゾ抵抗効果を応用した応力測定素子を開発した⁽⁴⁾。本素子は、-100°C~+200°C の温度範囲で Si チップに発生する応力を三次元成分に分離検出する機能を持つ。前報⁽⁴⁾では本素子の応力測定の原理および基本特性について述べ、さらにダイボンディング工程でチップに発生する応力を測定例として示した。

本報では、ダイボンディング工程後のモールド工程

図 1 IC パッケージの構造例

* 平成元年 4 月 3 日 第 66 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 8 月 30 日。

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

^{*2} (株)日立製作所武蔵工場 (〒187 小平市上水本町 1450 番地)。

およびポストキュア工程におけるチップ応力の変化を測定した。また、有限要素法によりレジン応力の解析も行い測定値との比較検討を行った。さらに、温度サイクル、吸湿条件下でのチップ応力の変化も測定したので、それらの概要につき以下に述べる。

2. モールド 応 力

測定に使用した応力測定素子を図3に示す。チップ寸法は4mm×9mm×0.4mmであり、応力検出部を15個内蔵している。使用したパッケージは300mil(7.62mm)幅のDILP(Dual in-line Package)パッケージ(図1参照)である。使用したパッケージ構成材料を表1に示す。リードフレームには42アロイ(42NiFe)を用い、封止樹脂には3種類のエポキシ樹脂をそれぞれ用いた。モールド温度は175°C一定とした。なお、ダイボンディングはAu-Si共晶接合で行った。

Aレジンを用いて封止した場合のチップ内の残留応力分布測定例を図4に示す。図は、チップ長辺の中心線上の応力分布をチップ中心から端に向けて測定した結果であり、面内の垂直応力 σ_x , σ_y (チップ長辺方向を x 方向、短辺方向を y 方向とした)せん断応力 τ_{xy} およびチップ面に垂直な応力 σ_z がそれぞれ示してある。図から明らかなように、モールド後のチップ残留応力は面内の垂直応力成分 σ_x , σ_y が支配的であり、せん断応力成分やチップ表面に垂直な応力成分 σ_z はほとんど発生していない。すなわち、チップ内の応力場は近似的に二次元の応力場になっている。これは、チップの厚さが長辺や短辺の寸法と比較して非常に小さいためである。面内垂直応力(圧縮応力)は、チップ中心が最も大きく、 σ_x が約210MPa, σ_y が約140MPaの値となっており、チップ端に向けて次第に

減少する分布となっている。一方面内のせん断応力 τ_{xy} および垂直応力 σ_z はチップ中心では1MPa以下であり、チップ端に向けて微増するが、最大でも10MPa以下であり極めて小さい。

次にA,B,C3種類のレジンを用いたモールド工程後のチップ内の残留応力を測定した。各レジンに対してそれぞれ5個の試料を用いて測定した。測定結果を横軸をチップの長手方向垂直応力成分 σ_x , 縦軸をチップの幅方向垂直応力成分 σ_y として図5に示す。チップ内の残留応力はAレジンが最も大きく、Bレジ

表1 パッケージ構成材料の材料定数

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Thermal Expansion Coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Silicon	180	0.3	3
42NiFe	148	0.3	5
Resin A	15	0.25	24
Resin B	15	0.25	20
Resin C	13	0.25	18

図3 応力測定素子

図2 パッケージ組立工程におけるチップの応力履歴例

図4 レジンモールド後のチップ残留応力測定例

ン, C レジンの順に小さな値を示す。この傾向は, 封止レジンの線膨張係数と密接に関連しており, 線膨張係数値がチップ(シリコン)に近いほど残留応力値が低くなっている。すなわち平均値で比較してみると A レジンで(σ_x, σ_y)=(220, 150 [MPa])であったものが, B レジンで(200, 140 [MPa]), C レジンでは(150, 100 [MPa])までそれぞれ減少している。なお, 各レジンにおける測定値のばらつきは平均値に対し $\pm 5\%$ 以内となっているが, このばらつきは前報で述べた応力測定素子特性のばらつきに対応しているものと考えられる。

パッケージの組立工程では, レジンモールド工程の後でレジンの硬化反応を促進させてレジンの安定化を図るために 175°C でベーキング(ポストキュア)を行う。レジンの硬化反応が進むと, 当然レジンの物性値も変化するので, 残留応力値も変化する事が予想される。そこで, このポストキュア工程における残留応力値の変化を測定した。

結果を図 6 に示す。図はポストキュアを 5 時間行った場合の測定例で, チップ中心での垂直応力 σ_x の変

化(平均値)を示しており, モールド工程前を初期状態(残留応力=0)としたものである。図から明らかなように, ポストキュアによりすべてのレジンで圧縮残留応力が増加しており, その増加量は 10% 程度になっている。したがって, モールド後にポストキュアを行ったパッケージ内のチップ残留応力は A レジンで約 250 MPa, B レジンで約 230 MPa, C レジンで約 160 MPa となっており, 封止レジンによって残留応力が 50% 以上も異なることが明らかとなった。

図 6 ではポストキュアの時間を標準的な 5 時間としたが, このキュア時間のチップ残留応力に及ぼす影響をさらに詳細に検討するためキュア時間を 300 時間まで変化した場合の残留応力の変化を測定した。測定結果を図 7 に示す。図はモールド工程完了後からのチップ中心における残留応力 σ_x の変化量(圧縮応力の増加) $\Delta\sigma_x$ をポストキュア時間に対して表したものである。チップ残留応力はポストキュア時間が 50 時間程度までは時間とともに単調に増加している。増加量は A レジンが最も大きく約 45 MPa となっており, 次いで B レジンが約 28 MPa, 増加量が最も小さかった C レジンで約 20 MPa となっている。キュア時間が 50 時間より長くなると, いずれのレジンでも圧縮残留応力はわずかに減少する傾向を示している。この原因は明確ではないが, 高温保持によるレジンの劣化(熱分解反応)⁽⁵⁾が発生したために生じたものとも考えられる。

レジンモールド工程とその後のポストキュア工程においてチップに発生する応力をまとめて図 8 に示す。図はチップ中心での圧縮応力 σ_x の変化(圧縮応力の増加)を示している。図から明らかなように, レジンモールドによりチップ内には大きな圧縮応力が発生し, A レジンでは最大 260 MPa, B レジンでは 230 MPa, 最も小さい C レジンで最大 170 MPa の残留応力が発生している。なお, 残留応力値は封止レジンの線膨張

図 5 チップ残留応力のレジン依存性

図 6 ポストキュア後のチップ残留応力の変化

図 7 チップ残留応力変化のポストキュア時間依存性

係数がシリコンチップの値 ($\sim 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) に近いほど小さくなる傾向を示している。

3. 残留応力の経時変化

前章では、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について検討してきた。次にこの発生応力の経時変化の有無について検討した。

半導体製品は、広範囲の環境条件下で信頼性を保つことを要求される。このため、製品の開発にあたっては各種の信頼性試験を行っている。このうち、温度の変化に対しては温度サイクル試験を行って信頼性を評価している。この試験は製品に一定周期の熱負荷 ($-55^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$, 1h/回) を繰返し与えるものである。ところで、このような熱負荷が半導体装置に加わると、封止レジンの特性が変化し、チップ応力も変化することが考えられる。そこで、レジンモールド後ポ

ストキュアを5時間行った試料に対してこの温度サイクル試験を実施し、チップ残留応力の変化について検討した。

3種類のレジンでモールドした場合のチップ応力の変化の測定例を図9に示す。図中の応力はチップ中心での垂直応力 σ_x の変化量(圧縮応力の増加) $\Delta\sigma_x$ を示している。この図から明らかなように、チップ残留応力は熱負荷の繰返しにより増加することがわかる。BレジンとCレジンでは増加量はわずかで、80サイクル後でも10 MPa程度であるが、Aレジンの場合は残留応力は急激に増加し、60サイクル後には50 MPaも増加した。この後Aレジンではさらに20サイクルの熱負荷を加えた時点でレジクラック(樹脂割れ)が発生した。Aレジンでみられたこのようなチップ応力の増加は、高温でのポストキュアの効果だけでは説明できず、レジン材料の持つ粘弾性特性などに起因したものと考えられる。

この温度サイクル試験におけるチップ残留応力の変化を図10にまとめて示す。Aレジンで封止した場合にはチップ応力は最大300 MPaにも達しており、これが80サイクルでレジクラックが発生した原因である。以上述べたようにパッケージ組立工程後におけるチップ応力の経時変化特性も封止レジンによって異なることが明らかとなった。

パッケージ封止用レジン材料は吸湿特性を持つため吸湿した水分によるシリコンチップ上のAL配線の腐食が生じることがある。このため、製品開発にあたっては高温高湿環境下での信頼性評価を行っている。レジン材料が吸湿すると、膨潤を起こし、チップ応力に対しても影響を及ぼすことが考えられる。そこで、高温高湿(121°C , 2気圧)試験下でのレジンの吸湿膨潤

図8 チップ残留応力のポストキュア時間依存性

図9 チップ残留応力変化の温度サイクル数依存性

図10 チップ残留応力の温度サイクル数依存性

によるチップ応力の変化の有無について検討した。3種類のレジンでモールドした各パッケージを5時間ボストキュアした試料について試験を行った。高温高湿環境下での放置時間に対する各パッケージの吸湿量とチップ応力の変化(圧縮残留応力の減少)の測定結果をそれぞれ図11, 図12に示す。パッケージの吸湿量は放置時間の増加に伴い単調に増加し、80時間後でも飽和にまでは達していない。また、吸湿量はレジンにより大きく異なり、80時間後でみるとAレジンが最も多く6mgに達しているが、最も少ないBレジンでは4mgである。一方チップ応力は放置時間の増加に伴い圧縮残留応力が減少する方向に変化する。変化量が最

も大きいのはAレジンであり、60 MPaにまで達している。逆に最も小さいのはCレジンであり、変化量は10 MPa程度である。このように吸湿膨潤特性はレジンにより大きく異なる。

この吸湿量とチップ応力の変化量の関係を図13に示す。図の横軸はパッケージの吸湿量、縦軸はチップ応力の変化量を示している。この図から明らかなように、吸湿量とチップ応力の変化量との間には近似的に直線関係が成立している。特にAレジンとBレジンはほぼ同じ直線上にのっていることから、両レジンの吸湿膨潤特性は同等であり、応力変化量の差異は吸湿量の絶対値の差に起因していることがわかる。一方Cレジンは吸湿膨潤特性が大きく異なり、吸湿に伴うチップ応力の変化が非常に少ないことがわかる。このように封止レジン間には吸湿膨潤特性にも大きな相違があることが明らかとなった。

実際のパッケージ製品は室温近傍で使用あるいは保存されることが多い。こうした室温放置の条件下でのチップ残留応力の変化について検討した。放置環境は気温10~30°C、湿度30~70%であり、特に制御は行わなかった。測定結果を図14に示す。

1000時間の放置後でもチップ残留応力の変化はごくわずか(10 MPa以下)で、引張側に変化している。この変化はパッケージの吸湿に伴う膨潤応力によるものと考えられる。この結果から、通常の使用状態ではパッケージ内の応力はほとんど変化しないと考えられる。

4. 有限要素法解析

レジンモールド工程においてパッケージ内に発生する熱応力の解析を有限要素法プログラムADINA (version '78)⁽⁶⁾を使用して行った。解析に使用した要素分割例を図15に示す。解析は二次元パッケージ幅方向1/2断面について行った。接点数は1023、要素数は

図11 パッケージ吸湿量の時間依存性

図12 チップ残留応力変化の吸湿時間依存性

図13 吸湿によるチップ残留応力の変化

960 である。パッケージ構成材料の材料定数は表 1 に示した値を使用した。解析はモールド温度(175°C)から室温(25°C)までの冷却過程で発生する熱応力を弾性解析で行った。

図 16 に解析例を示す。図は A レジンを使用した場合のシリコンチップ表面における熱応力分布を面内垂直応力 σ_y 、せん断応力 τ_{yz} 、面外垂直応力 σ_z について示している。チップ上では面外垂直応力 σ_z およびせん断応力 τ_{yz} はほとんど発生せず、10 MPa 以下の値となっている。この結果は実験結果とも対応する。一方、面内垂直応力 σ_y はチップ中心では 150 MPa の圧縮応力となっており、チップ端に向かって次第に減少する分布となっている。この結果も実験結果とよく一致しており、熱弾性解析により、パッケージのレジンモールド工程においてチップに発生する熱応力を十分解析できることが明らかとなった。図 17 には、3 種類のレジンでモールドした場合にチップ表面中心に発生する圧縮応力 σ_y の値をまとめて示す。図中には、応力測定素子を使用して求めたモールド後およびポストキュア 5 時間後の実験結果も示している。図から明らかに、解析結果は実験結果とよく一致している。特にモールド直後の値とは 5% 以内の精度で一致している。ポストキュア後はレジンの硬化反応が進み、チップ応力が増加しているため解析結果との差は 10% 程度まで増加している。今回の解析例ではレジンの材料定数は室温近傍での値をそのまま使用してその温度依存性は考慮していないが、解析結果は実験結果と 10% 程度の誤差範囲で一致しており、この簡単なモデルでも十分発生応力を評価できることが明らかとなった。これは、今回使用したレジンでは物性値が大きく変化するガラス転移点が 150~170°C にあり、解析温度領域においてはレジンはほぼ弾性挙動を示すためと考えられる。

このように、開発した応力測定素子を使用することにより LSI パッケージの組立工程および使用環境に

図 14 チップ残留応力の室温放置による変化

においてチップに発生する応力を精度よく測定できることが明らかになり、また有限要素法解析の妥当性も明らかにすることができた。

5. 結 言

LSI 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熱応力を、開発した応力測定素子を使用して測定するとともに、有限要素法解析を行いレジン特性について以下の知見を得た。

(1) シリコンチップの発生応力は二次元の平面応力場で近似でき、面内の圧縮応力成分が最も大きい。

(a) パッケージの断面図

(b) 要素分割例

図 15 パッケージの有限要素法分割例

図 16 チップ残留応力の解析例

図 17 チップ残留応力の実測値と解析値の比較

(2) チップに発生する応力の封止レジン依存性を明らかにし、レジンの線膨張係数がチップに近いほど発生応力が減少する。

(3) 有限要素法による熱弾性解析でレジンモールド工程におけるチップ応力を 10% 程度の誤差で評価できる。

(4) レジンモールド後のポストキュアでレジンの硬化収縮が発生し、圧縮残留応力が 5~10% 増加する。

(5) チップ残留応力は温度サイクル試験においても圧縮方向に増加するが、増加量はレジンにより大きく異なる。

(6) レジンの吸湿量と膨潤応力の間にはほぼ比例関係が成立するが、その特性はレジンにより大きく異なる。

(7) パッケージを室温に放置した場合には 1 000 時間経過してもチップ残留応力はほとんど変化しない。

文 献

- (1) 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告集, (1981-5), 311.
- (2) 芹沢, 第 14 回日科技連 信頼性保全性シンポジウム発表報告集, (1984-5), 85.
- (3) 鈴木・小松, 応用物理, 48-12, (1979), 1211.
- (4) 三浦・ほか 3 名, 機論, 53-493, A (1985), 1826.
- (5) 松本, 電子通信学会技術研究報告, 85-163 (1985), 49.
- (6) Bathe, K. J., *ADINA user's manual*, Rev. Dec, (1978).

討 論

〔質問〕 池 上 皓 三

〔東京工業大学精密工学研究所〕

シリコンチップ内の残留応力測定結果を興味深く拝見した。下記の点ご教示願いたい。

(1) 図 3 をみると、応力測定用素子は xy 平面内にのみあるように見えるが、 σ_z はどのようにして測定したのか。

(2) 図 6 で樹脂 A と C のモールド工程での残留応力の大きさの比は、表 1 の樹脂の熱膨張係数の比に対応しているようであるが、ポストキュア後の残留応力の比は、熱膨張係数の比以上に、樹脂 C では軽減されている。これはなにに起因するものか。

〔回答〕 有意義なご討論に感謝する。以下ご質問の順に回答させていただきます。

(1) ご指摘のように応力測定部はシリコン基板表面近傍に形成した拡散抵抗からなっている。 σ_z の測定方法については前報(付 1)で詳細に報告しているのでここでは簡単に説明させていただきます。応力測定部は

$$\begin{pmatrix} \delta R_1/R_1 \\ \delta R_2/R_2 \\ \delta R_3/R_3 \\ \delta R_4/R_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi_A & \pi_B & \pi_C & 0 \\ \pi_B & \pi_A & \pi_C & 0 \\ \pi_D & \pi_D & \pi_E & \pi_F \\ \pi_D & \pi_D & \pi_E & -\pi_F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

付図 1 に示したように 4 個の拡散抵抗で構成されており、抵抗 R_1, R_2 は n 形の拡散抵抗、抵抗 R_3, R_4 は p 形の拡散抵抗となっている。各拡散抵抗における応力起因の抵抗値変化($\delta R/R$)は式(1)のように表される。ここで $\pi_i (i=A \sim F)$ は拡散抵抗のピエゾ抵抗係数で、 n 形と p 形の拡散抵抗を組合せることにより一次独立な係数群を選択することができる。したがって 4 個の拡散抵抗の抵抗値が応力場に応じてそれぞれ独立に変化するので、抵抗値変化を測定することにより面外応力 σ_z の測定が可能となる。なお、応力測定素子を作製するシリコン基板として(100)結晶面を使用すると、原理的に拡散抵抗値変化には面外のせん断応力成分 τ_{yz}, τ_{zx} は寄与しない。

(2) モールド工程後の残留応力値については、ポストキュア後の値が封止樹脂の特性を表していると考えている。これはキュア前の樹脂は架橋反応が完了していないために強度特性も不安定なためである。また、

(付 1) 三浦・ほか 3 名, 機論, 53-493, A(1987), 1826.

樹脂 C はシリコン変性エポキシ樹脂で、シリカ粉のほかにゴム状微粒子が分散した構造となっている。このため樹脂 C では発生応力の一部をこのゴム状粒子が吸収するために応力緩和が達成されているものと考えている。

〔質問〕 川上 崇

〔(株)東芝総合研究所機械研究所〕

著者らの一連の半導体デバイスに関する力学的信頼性評価研究に対して敬意を表する。残留応力測定、有限要素法解析の結果について3点ほどご教示願いたい。

(1) 温度サイクル試験における圧縮応力の増加に関し、粘弾性特性などに起因すると考えられているが、想定される機構について説明いただきたい。

(2) 前項に関連して A レジンのパッケージにおける破壊箇所をお示し願いたい。

(3) 図 16 の垂直応力 σ_y の分布に関し、チップ側のせん断応力 τ_{yz} からは推定しにくく、リードフレーム側のせん断応力によるところが大きいように考えられるがいかがが。

〔回答〕 (1) 封止に使用している樹脂が温度サイクル試験の温度範囲で粘弾性挙動を示すことは実験的に確認している。この粘弾性挙動は樹脂のガラス転移温度が 150°C 近傍にあるため高温側ほど顕著になる。このため、温度サイクル試験環境においては、一定時間当たりの応力緩和量が低温側よりも高温側で大きくなるために、全体として応力は一定温度振幅負荷の場合には低温側で発生する応力方向にシフトしていくものと考えている。この結果、シリコンチップで圧縮

付図 1

応力が増加する現象が測定されたと考えている。

(2) レジックラックは、図 15(a) のパッケージ断面図においてシリコンチップと接着されているリードフレームの下端部から、パッケージ下面端部方向に向かって発生した。

(3) リードフレームがなく、チップのみをモールドしても、 σ_y の分布は中央で最大、端面で最小となりせん断応力の分布は中央で最小、端面で最大となる。 σ_y の分布は端面における σ_y の値に表面の外端部からのせん断応力の積分値を加えた値に対応する。チップ全体における σ_y の変化についてはご指摘のようにチップ上面、チップ下面(リードフレーム側)両側のせん断応力変化と対応付けられる。図 16 の σ_y はチップ表面での値を示しているので本図だけからは上記対応関係は読取れない。