第3章 マイクロ接合構造体の強度評価*

日置 進**, 保川 彰 夫***

Strength of Micro-bonded Structures*

by Susumu Hioki** and Akio Yasukawa***

1. 緒 言

近年、産業の主役を担いつつある、半導体製品およびコンピュータ、コンピュータ端末、家庭電子品などエレクトロニクスの分野の製品は従来の産業機械や構造物と比較すると極端に微小であり、かつ高精度に加工された部品がろう付や共晶接合、拡散接合方法などにより精密に組立てられたものが多い。そこに供用される部品はマイクロ接合構造体と呼ぶものである。

このマイクロ接合構造体は、エレクトロニクス関連製品が中心であるがため、一般には熱的、機械的性質の異なる材料が微小で薄く積層され接合されていることが多い。従って、この構造体が製作され使用される時、構造体内部では熱負荷による熱応力、機械的な負荷による振動応力などが発生し、応力の大きさと構成素材の破壊や疲労に対する抵抗値との関係により強度上の問題が起ることとなる。

さて、この様なマイクロ接合構造体の強度を取扱う場合、その強度特性が微小であるが故に、材料の結晶性や極小の析出物などにより影響されることは否めないが、一般には従来より大型構造物で用いられている巨視的連続体に対する解析手法を適用し、微小であるが故に出て来る特異性を適宜考慮して取扱うのが現実的であると筆者らは考えている。

以下に、筆者らが半導体を中心として、マイクロ接合構造体の強度解析を行った例を引用することにより、その評価方法について述べることにする。

2. マイクロ接合構造体としての半導体製品とその強度上の問題点

IC, LSI, トランジスタ, パワーデバイスなどの半導体

製品は先に述べたように、熱的・機械的に性質の異なる材料が積層された構造体となっており、その形態は多様である。しかし、もっとも単純であり、かつ基本的と言えるものは、図1に断面を示すように基板の上に半導体材料がろう付された構造体となっており、一般には基板はCu, 半導体材料はSi, ろう材は半田又はAu-Si共晶ろうであることが多い。これに入出力用のワイヤやリード線が配置され、プラスチックなどでパッケージされたものがデバイスとして供用される。

この様な構造体に製造時や使用時の熱負荷が作用することにより、熱応力が発生し、また熱変形や機械的な負荷により、静的な応力や衝撃的または繰返しを伴う動的な応力が発生する。強度的にはこれらの応力の解析と実測などに材料の強度特性の定量的な把握が必要であり、これらのデータをもとに評価することが可能となる。

図1 半導体製品の構造断面の一例

3. 熱応力解析

半導体製品は、熱的・機械的性質の異なる材料が薄く積層された構造体となっているため、熱負荷が作用すると材料の熱膨張の相違により、寸法的な食い違いにより熱応力が発生する。この熱応力を求めるには、解析解より、有限要素法などの数値解により求めるのが便宜的である。

ここでは、共著者の保川が行った剪断遅れの理論を応用した解法^{1,2)}について述べることにする。

先の図1に示した異なる線膨張係数 α_1, α_2 を持つ部材1, 部材2, (それぞれ厚さ t_1, t_2 , 長さ l , 縦弾性係数

*原稿受付 昭和59年8月28日

**正 員 (株)日立製作所機械研究所 Member, MERL, Hitachi Ltd.

*** (株)日立製作所機械研究所MERL, Hitachi Ltd.

E_1, E_2 が半田 (厚さ h , 横弾性係数 G) により接合されている構造体に, 一様な温度変化が加わった時の歪について考える。半田層が薄く, 被接合部材 (部材 1, 部材 2) の曲げ剛性が大なるものとする。部材 1, 2 は, 伸び変形だけ行ない, 半田層は剪断変形のみ行なうものとして考える。また半田の応力-歪挙動を弾完全塑性体として近似する。さらに, 半田層中に存在するボイド (ボイド面積率 β) の影響は半田層の剪断剛性の低下として評価する。この様な仮定のもとで問題を解けば次のようになる。

$$\gamma = \gamma_{\max} \cdot \sinh \lambda \xi / \sinh \lambda \quad \cdots (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\alpha_2 \Delta T + (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \left(1 - \frac{\cosh \lambda \xi}{\cosh \lambda} \right)}{(1 + E_2 t_2 / E_1 t_1)} \quad \cdots (2)$$

ここに

$$\gamma_{\max} = (\gamma_0 \tanh \lambda) / \lambda \quad \cdots (3)$$

$$\gamma_0 = \ell (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T / 2h \quad \cdots (4)$$

$$\lambda = \sqrt{(1 - \beta) G (1/E_1 t_1 + 1/E_2 t_2) / h} \cdot \frac{\ell}{2} \quad \cdots (5)$$

となる。部材 1, 2 の幅が大きい時はポアソン比 ν を用いて, 上式の E の代りに $E/(1 - \nu)$ とおくことにより, この影響を考慮することができる。

さて, 式 (1) より, 半田層に生ずる剪断歪は中央で 0 となり, 端部へ行くほど大となることから分る。従って温度変化の範囲を大きくとると, 半田層の端部に塑性変

形が生じ, 塑性域は端部から中央部へ広がって行く。この塑性域と弾性域の境界の座標 ξ_Y は式 (6) を数値的に解くことによって得られる。すなわち

$$\lambda + [\lambda^2 (1 - \xi_Y) - \sigma_0 / \sigma_Y] \tanh \lambda \xi_Y = 0 \quad \cdots (6)$$

ここに

$$\gamma_Y = \tau_Y / G \quad \cdots (7)$$

τ_Y = 剪断降伏応力

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_Y \sinh \lambda \xi / \sinh \lambda \xi_Y & (0 \leq \xi \leq \xi_Y) \\ \lambda^2 \gamma_Y (\xi^2 - \xi_Y^2) / 2 + (\gamma_0 - \lambda^2 \gamma_Y) (\xi - \xi_Y) + \gamma_Y & (\xi_Y \leq \xi \leq 1) \end{cases} \quad \cdots (8)$$

$$\quad \cdots (9)$$

$$\varepsilon_2 = \begin{cases} \alpha_2 \Delta T + \frac{(1 - \beta) \tau_Y \ell}{2 E_2 t_2} \left[(1 - \xi_Y) + \frac{1}{\lambda \tanh \lambda \xi_Y} \left(1 - \frac{\cosh \lambda \xi}{\cosh \lambda \xi_Y} \right) \right] & (0 \leq \xi \leq \xi_Y) \\ \alpha_2 \Delta T + \frac{(1 - \beta) \tau_Y \ell}{2 E_2 t_2} (1 - \xi) & (\xi_Y \leq \xi \leq 1) \end{cases} \quad \cdots (10)$$

$$\quad \cdots (11)$$

である。

図 2 に銅板にシリコン板を半田で接合した試験片に熱サイクルを加えた時, シリコン板上面に生ずる歪の測定値と, これに対応する計算結果を示す。図より温度とシリコン板上の歪の関係は半田の塑性変形のため, ヒステリシスループを描くこと, また, 半田の Flow-Stress の温度依在性のため, ヒステリシスループは非対称な形となることわかる。

なお, 計算には後述する図 6, 図 7 より求まる τ_Y を用

図 2 熱サイクルによりシリコン板上面に生ずるひずみ

図 3 半田層に生ずるせん断ひずみの分布

いた。

次に熱サイクルによって半田層に生ずる剪断歪範囲と半田厚さの関係を計算した結果を図 3 に示す。これより半田厚さが厚いほど歪が小さいことが分かる。

さて、上には、基板 (Cu)、接合層 (半田)、半導体材料 (Si) と単純に三層の接合構造体についての解析例を示したが、一般には、もっと複雑で多層となることが多い。多層となった場合には層を適当に分割し、等価剛性、等価弾性率を持った二つの部材が接合されていることと仮定することにより求めることができる³⁾。

4. 材料の強度特性

半導体及びその周辺を構成する材料は、主体である Si をはじめ、Cu、半田や Au-Si などのろう材、セラミックス、Al や Au のワイヤ、モールドのためのプラスチックなどである。これらの材料の物理常数としての熱的・機械的特性はすでに求められている⁴⁾。ここでは筆者らがこれまでに得た、材料強度上の特性について述べることにする⁵⁾。

4.1 Si の強度

Si は、常温近辺では脆性材料であり、セラミックスやガラスと同様に試験片の仕上げ状態により強度は大きくバラック、Si 板の三点曲げによる静的な強度試験結果を、正規分布紙に図示すると図 4 のようになる。

4.2 半田の強度特性

一方引張りに対する半田の応力-歪挙動については Rathore らの研究⁶⁾がある。半田接合層で問題となる剪断応力-歪挙動について筆者らは次のようにして求めている。

図 5 に示すように 95Pb-5 Sn の中空円筒試験片を用いて歪振幅漸増のねじり試験を行った。これは繰返し応力-歪挙動特性を求める試験でよく用いられる手法である。結果を整理して Flow-Stress に及ぼす、歪速度と温度の影響を調べた。歪速度の影響については、全歪振

図 4 Si の強度特性

図 5 中空円筒疲労試験片

図 6 繰返し Flow-Stress とひずみ速度

幅 0.01 の時の繰返し Flow-Stress を求めて図 6 に示した。また、温度の影響についても、全歪振幅 0.01 の時の Flow-Stress を求めて図 7 に示した。これらによると常温近くの 12°C では歪速度依存性は少ないが、高温である 120°C では歪速度依存性は大きい。このことは、例えば、熱負荷が衝撃的な場合の熱応力の計算には適正な値を用いるべきであることを示している。

さて、半田を用いて接合される半導体は使用時に繰返し受ける熱負荷による熱応力により、半田部の疲労が問題となる。半田の疲労挙動は図 5 の試験片を用いて、種々の成分系の半田について温度条件を変えて、ねじり疲労

図7 繰返し Flow-Stress と温度

図8 半田の疲労強度

試験により求めた⁷⁾。結果の一部を図8に示す。図に見え
るようにバラツキはあるが、Manson-Coffin の関係とな
っており⁸⁾ Coombs の報告とも一致している⁹⁾。

5. 接合層熱疲労寿命の予測

半導体製品の使用時には、ON-OFF や環境の温度変化
かどの熱サイクルをうける。この熱サイクルに対して信
頼性を確保することが必要であるが、半田接合されてい
るものについては、上述のデータをもとに解析により熱
サイクルによる疲労寿命を予測することが可能である^{1,2)}。

先に熱応力解析の項で述べたように、半田接合されて

図9 熱サイクル試験結果と寿命計算結果

いる半導体の半田層では端部に近いほど歪は大となっ
ており、熱サイクルによる亀裂は端部に生じ、中央に進行
するものと考えられる。このとき、半田層内部の歪は亀
裂の進行とともに、徐々に増加して行くと考えられる。
そこで、半田層内部の各点について、歪が徐々に増加し
て行く場合の疲労被害を線形被害則を仮定して評価し、
ある点の疲労被害が1に達した時、亀裂がその点に達す
るとして、亀裂の進行過程を考慮した半田層の熱疲労寿
命を予測することができる。

図9に $\Delta T = 90^\circ\text{C}$ の場合について計算した結果と加
速実験の結果をボイド率と寿命の関係について示してい
る。なお、図中実線は、端部の最大歪に対する寿命を示
したものである。

6. 結 言

マイクロ接合構造体の強度について、半導体製品に対
して行なっている筆者らの研究の結果を中心にまとめて
報告した。学会員諸兄の参考になれば幸いである。この
ような異種材料が薄く積層された接合構造をとるデバイ
スは、半導体製品をはじめ、VTR、磁気ディスクなど磁
気記録装置のヘッド、ファクシミリなどの電子機
器の部品の他、電力用のデバイスにも多く見られる。
これらデバイスの強度解析の基本は本文で述べた手法の
応用としてとらえることができる。機会があれば、これ
らの結果もいづれ報告したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 保川他：異種材料の半田接合部の熱疲労寿命予測、
機講論，760-2，p. 121-124 (1976)
- 2) 保川他：パワートランジスタ半田接合層の熱疲労
強度解析；第10回日科技連信頼性、保全シンポジ
ウム予稿，75-80 (1980)
- 3) 北野他：「半田接合多層構造の熱応力解析」機講論
820-11，p. 80~82 (1982)
- 4) たとえば理科年表
- 5) 日置他：エレクトロニクスデバイスの強度設計
(I)，機講論，814-12，p. 59-62 (1982)
- 6) H.S. Rathore, et al.; Mechanical Properties of
5/95 Sn/pb Solder and Solder Containing
Impurities, IBM Technical Report TR22 1009,
(1970)
- 7) 北野、坂本：Pb-Sn 系はんだのねじり塑性疲労に
及ぼす組成と温度の影響、機講論，830-10(1983)
- 8) S.S. Manson; "Thermal Stress and Low Cycle
Fatigue" McGraw-Hill N.Y (1966)
- 9) V.D. Coombs; An. Investigation of Fatigue
Life Performance in Structure and Compo-
nents. ASTM STP, 515, 3-21 (1972)