< 綜 説 >

(受理:平成15年10月21日)

電子デバイスにおける接着接合 Adhesive Bonding in Electron Devices

池上 皓三^{*}
Kozo IKEGAMI

1. ま え が き

情報化社会の発展、機器の知能化の進展につれて、半導体デバイスに代表される電子デバイスの使用範囲は飛躍的に拡大している。このような応用範囲の拡大につれて、電子デバイスへの信頼性への要求がますます高まる一方、電子デバイス自体の高機能化、高集積化も極めて早い速度で進行している。

電子デバイスには、セラミック、金属、プラスチックの材料が使用され、それらの材料の相互接合によって、電子デバイスの機能が発現される。電子デバイスは異種材料によって構成される複合微小接合構造体であり、異種材料の接合はほとんど接着接合されている。電子デバイスの信頼性は、デバイス内部の異種材料間の接合の信頼性によって決まるといっても過言では無い。このようなデバイスでは、内部の非常に小さな損傷、たとえばデバイス構成材料のわずかなき裂、構成材料間の微小なはく離などが、デバイス機能に致命的な影響を与え、さらにそのデバイスが使用されているシステム機能の停止を引き起こす場合もある。

電子デバイス内部の材料間の接合の力学的な因子を評価し、その損傷を防ぐことが、高信頼性デバイス実現の鍵となってきた。ここでは電子デバイスの製造過程や使用時に現れるいくつかの接合問題をとりあげ、デバイス健全性との関連について述べる。

2. 電子デバイスの製造過程

電子デバイスの製造過程は、シリコンやガリウム砒

素のウェハ上に電子回路を形成し、電子機能を発現するチップを製造する工程と、チップをパッケージしてデバイスに仕上げる工程に大きくわけることができる。前者の工程はさらに多結晶シリコンやガリウム砒素を溶融して単結晶インゴットを製造し、そのインゴットを薄層のウェハに切断する工程と、ウェハの上に回路を形成する工程よりなる。後者の工程は回路を形成されたウェハから1個ずつチップ切断し基板に接合した後、チップの電極と外部電極を接続する工程と、基板に接合されたチップを樹脂などで封止する工程よりなる。

図1¹⁾は面実装された電子デバイスの内部構造の概略の一例で、シリコンチップがパッドに接着接合されたの

図1 面実装された電子デバイス

池上 皓三

略歴: 1969年 東京工業大学大学院
博士課程修了
1969年 東京工業大学精密工
学研究所助手
1971年 同助教授
1984年 同教授
2000年 東京工業大学定年退
職
2000年 東京電機大学工学部
教授、現在に至る
研究: 金属材料の塑性変形、高分子
と複合材料の力学、接着接合
の構造への応用

^{*} 東京電機大学工学部機械工学科
東京都千代田区神田錦町2-2 〒101-8457
Tokyo Denki University
2-2 Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan
(平成15年度日本接着学会年次大会特別講演)

ち、チップの電極とリードフレームがワイヤによって接続され、チップ、パッド、ワイヤとリードフレームの一部を、プラスチック材料で封止したものである。力学的モデルとしての電子デバイスは、セラミック、金属、プラスチックの三種の材料よりなる微小接合部をもつ薄層積層体といえる。

3. デバイス用インゴットとウエハ

電子デバイスの機能を発現するチップは、まず多結晶体シリコンやガリウム砒素のような材料を溶融して、単結晶のインゴットを作り、そのインゴットを薄層に切断しウエハに加工する。このときインゴットに内部応力があると、薄層に切断したときに、内部応力が解放されてウエハに反りが生じ変形する。チップの回路パターンは、ウエハのうえに塗布した感光剤に、回路パターンを繰り返し露光して形成してゆくので、ウエハに反りがあると回路パターンの不整合が生じ、チップの歩留まりに大きく影響する²⁾。この過程ではウエハを研磨するための固定作業が、接着接合に関係する。研磨時の固定方法がウエハの反りに影響する。

4. 回路形成

デバイスの回路はウエハ上に回路パターンを蒸着して形成してゆく。この過程は異種材料の薄膜を積層してゆく工程である。たとえば、シリコン基板上に薄膜(SiO_2)を蒸着する過程では、薄膜の固化過程時の体積変化やシリコン基板と薄膜の熱膨張係数の差異のため、基板に内部応力が生じ基板内部に転位の発生や、薄膜を被覆した基板に反りが生ずる。この過程では異種材料の薄層積層の相変化と熱応力による変形と、積層間の付着強度が接着接合に関係する^{3,4)}。

5. ダイボンディング

回路を形成されたウエハからチップを切断し、そのチップがリードフレームの上に装着される。このときチップはリードフレームとの間に接着剤や共晶合金などを用いて接合される。チップとリードフレームの異種材料を接合するので、温度変化が生ずると、それぞれの熱変形量が異なる。このためチップとリードフレームは曲面状に変形する。このような熱変形によって生じた内部応力は、チップ自身の破損の原因になる。シリコンで出来たチップに欠陥が存在すると、この欠陥がチップのクラックの始点となることが多い。また、接着剤の接合強度が低いと、チップとリードフレームのはく離が、内部応力によって引き起こされる。内部応力を減少するには、チップとリードフレームの熱変形の相異を吸収できるような弾性

に富み、かつ接合強度の高い接着剤が必要である。この過程は接着接合そのものの過程で、接着剤の選択がダイボンディングの信頼性に大きな影響を及ぼす^{5,6)}。

6. 電極接合

チップを電子デバイスとして実際に機能させるために、チップの電極が外部電極に接続される。金やアルミニウムの細線を用いて、電極を接続するワイヤボンディング、チップの電極と基板の電極を細線を用いずに直接接続するフリップチップ、テープ上に形成された配線パターンを用いて接続するテープキャリアがある。電極接合はどの方法も接着接合そのものである。

6.1 ワイヤボンディング

細線によって電極接続を行う場合、細線の先端を溶融し球状にして接続するボールボンディングと、細線の先端をそのまま接続するウェッジボンディングがある。接続に用いる細線の直径は数 $10\mu\text{m}$ であるので、接合される面積はきわめて小さい。電極接合に不良が発生すると電子デバイスの機能に致命的な影響を与える。このため微小接合面積で信頼性の高い接合を確保しなければならず、接合部の強度がきわめて重要である^{7,8)}。

6.2 フリップチップ

チップの電極をはんだをつけた基板の電極に、それぞれ位置合わせし仮圧着した後、はんだを溶かして電極同士を一括接合する方法である。チップと基板の熱膨張係数は一般には異なるので、はんだづけ過程での加熱によって生ずる熱変形は、チップと基板で異なる。はんだづけ後室温に戻ったとき、それぞれの熱変形の差によって、はんだ接合部にせん断荷重が作用する。この荷重によりはんだ接合部のはんだボールにひずみが発生する。フリップチップで接合されたデバイスが、繰返し加熱冷却を受けると、はんだ接合部に繰返しひずみが作用することになり、はんだ接合部の疲労破壊を招くことがある。したがって、チップと基板の熱的性質を出来るだけ近づけ、はんだ接合部に加わるひずみを出来るだけ小さくする必要がある^{9,10)}。

6.3 テープキャリア

プラスチックフィルムに接続パターンをエッチングしたリードフレームと、チップの電極端子(パンプ)を熱圧着する。電極端子は異種材料の積層構造をしている。熱圧着時の加熱により、電極を構成する異種材料層に熱応力が発生する。この熱応力と加熱による応力が重畳して、電極や基板の破損を引き起こすことがある。電極の材料構成は電気的な機能の必要性から変えることが困難であるので、電極の形状を変えて、熱圧着時の応力を軽減する方法が試みられている^{11,12)}。

7. デバイスの封止

外部電極と接続されたチップを、衝撃、摩擦、振動、熱などの外部環境から保護することが必要である。これにはチップを金属やセラミックのキャップ内に密閉する気密封止と、チップを樹脂でコーティングする樹脂封止などがある。コストや生産性の点から樹脂封止が多く用いられている。この過程においても接着機能が重要な役割をもっている。

封止された樹脂が硬化するとき、樹脂の力学性質に変化が生じ、その体積も収縮する。このために封止樹脂の硬化時に樹脂に内部応力が発生する。さらに封止樹脂とチップ、チップパッド、リードフレームの間の熱膨張係数の違いにより、樹脂封止されたチップに温度変化が生ずると、樹脂だけでなく、チップ、チップパッド、リードフレームにも内部応力が発生する。これらの内部応力が、樹脂とリードフレームの接合部のはく離を引き起こしたり、封止機能そのものの破損を起こす場合もある。

樹脂でチップをコーティングし十分な封止効果をあげるためには、樹脂とチップ、チップが接着されている基板とリードフレームとの高い接着性が必要である。接着が悪いとリードフレームと封止樹脂の接合部ではく離が起こり、はく離部から水分が浸入し内部の配線の腐食などを引き起こす。

封止樹脂の内部応力を軽減し、接着性を高めることは、樹脂封止の信頼性にきわめて重要である^{13, 14, 15, 16, 17, 18)}。

8. 電子デバイスにおける接着接合

これまで述べてきたように、電子デバイスの構造は殆ど接着接合によって成り立っている。これら接着接合に関係する力学的な問題の共通因子を要約すると、

- (1) 相変化時の物性 (2) 異種材料間の熱残留応力
- (3) 薄層微小構造

となる。以下これらのいくつかについての研究結果を述べる。

8.1 相変化時の熱硬化性樹脂の物性

電子デバイスに使用される熱硬化性樹脂は、液体から固体に相変化する過程で体積収縮すると同時に、その力学の性質も時間に依存して複雑に変化する。また、硬化時には樹脂内部で発熱が起こり、樹脂内部の温度は不均一になり、樹脂の物性値も複雑に変化する。したがって樹脂の硬化時の特性を把握するためには、相変化過程での体積変化と物性変化を調べる必要がある。

熱硬化性樹脂として変性エポキシ樹脂を用いて、2重円筒法により樹脂に硬化剤を加えて、樹脂の温度を(a)

図2 樹脂硬化時の粘弾性特性

25度、(b) 35度、(c) 45度の条件で硬化させ、そのときのクリープコンプライアンスの測定結果が図2¹⁹⁾である。これは硬化剤を樹脂に加えて、3.5時間後に測定した結果である。クリープひずみの大きさは樹脂の温度によって異なり、温度が低いほど大きくなっている。このクリープひずみは温度だけでなく、硬化剤を加えた後の経過時間にも関係し、硬化剤を加えた初期の段階ではクリープひずみは小さく、時間の経過とともにクリープひずみはおおきくなり粘弾性特性が顕著になる。さらに時間が経過し硬化終了に近くなると、樹脂のクリープひずみは小さくなり、ほぼ弾性体と見なせるようになる。

樹脂の硬化時の体積収縮をディラトメータを用いて測定した結果が図3¹⁹⁾である。硬化剤を加えたのち、硬化が進行するときの体積変化を時間に対して示してある。測定温度はクリープひずみを測定した時と同じ温度条件である。樹脂の温度が(b) 35度や(c) 45度の場合には、体積収縮が急速に生じ、ほぼ2時間から2.5時間後に体積収縮が終わっているが、樹脂の温度が(a) 25度の場合にはほぼ3.5時間後に収縮が終わっており、硬化収縮速度が樹脂温度に大きく影響を受けている。また硬化収縮量は樹脂温度が高くなるほど大きくなっている。

これらの物性変化を3要素の粘弾性モデルで定式化し、アルミ板と樹脂の2層モデルの樹脂硬化過程の変形を解析し、実験と比較したのが図4¹⁹⁾である。このモデルは長さ100mm、幅20mm、厚さ1mmのアルミ合金板上に、10mm厚さに樹脂を硬化させたものである。図に示す結果では図中の2層はりの中央(A点)のひずみを測

図3 樹脂硬化時の体積変化

図4 2層板の樹脂硬化時の残留ひずみ

定した結果と粘弾性モデルによる計算結果を比較している。実験の温度条件は35度である。計算結果は(a) 25度, (b) 35度, (c) 45度の場合について示してある。ひずみが時間とともに増加し, 2層モデルが変形していることがわかる。ひずみの増加の傾向は計算結果と実験結果はほぼ同じであるが, ひずみの大きさについては, 計算結果と実験結果の一致はよくない。これは2層モデル内では温度分布が一樣と仮定しているが, 実際は自己発熱のため温度が一樣でなかったためと考えられる。

8.2 異種積層部の熱応力

電子デバイスはセラミック, 金属, 樹脂の薄層の積層複合構造になっているので, 熱変化を受けるとそれぞれの材料が互いに拘束しながら変形するので, その内部で熱応力が発生する。この熱応力により積層材料の界面で

図5 樹脂硬化後の冷却過程の残留応力

のはく離あるいは積層材料そのものの破損が生じ, 電子デバイスの機能停止を引き起こす。異種材料からなる複合構造の熱応力の状態を把握しておくことは, デバイスの健全性の評価に重要である。

内部に異種材料のある硬化後の樹脂の熱応力の状態を調べるために, デバイスのパッケージ樹脂の硬化後の樹脂の粘弾性の力学的性質を, クリープコンプライアンスで測定した。種々の温度で測定したクリープコンプライアンスは測定温度により異なり, その温度依存性が大きい。さらに硬化樹脂の線膨張係数を測定して熱変形の特性を調べた。これらの結果をもとに, 樹脂の熱変形時の構成関係を粘弾性モデルで定式化し, 樹脂と金属の複合構造体の熱応力を解析した。解析モデルは厚さ 10mm, 一辺の長さが 50mm の正方形の樹脂の中央に, 厚さ 2mm, 一辺の長さが 30mm の炭素鋼の板を埋め込んだものである。モデルにあてた温度条件は 170 度で 5 時間の加熱後, 室温まで冷却する過程である。図 5²⁰⁾ の (a) (b) (c) はそれぞれ 170 度で加熱時, 100 度まで冷却時, 20 度まで冷却時の熱残留応力の状態を, 相当応力の等高線で示したものである。応力分布はモデルの 1/4 の部分について描かれている。左下の板状の部分が埋め込まれた炭素鋼板の 1/4 である。樹脂の残留応力は樹脂を粘弾性体としているが, 炭素鋼板の残留応力は炭素鋼板を弾性体として, 解析している。樹脂を高温で硬化させているときには, 残留応力は小さいが, 温度が下がるにつれて残留応力が大きくなっているのがわかる。また樹脂では炭素鋼板の角で大きな残留応力が発生し, 炭素鋼板

図6 樹脂硬化時の残留応力

では中央で大きな応力が生じている。

このパッケージ用樹脂の硬化冷却時の内部応力を解析モデルと同様の試料を作り、内部に埋め込んだ炭素鋼板にストレインゲージを貼り、解析条件と同じ温度条件で硬化冷却したときの内部応力の測定結果が図6³⁾である。図には測定結果のほかに、樹脂を弾性体と粘弾性体と仮定したときの結果も示してある。樹脂の加熱を始め約90分で温度が170度に達するまで、樹脂は未硬化であるため、応力はほとんど生じない。樹脂の硬化が始まると圧縮応力が生じ、硬化終了時にはほぼ-130MPaの圧縮応力が生じている。さらに冷却過程では圧縮応力はほぼ100度まで増加し、100度以下では増加するもののその増加量は小さい。最終的に20度では残留応力は-200MPaまでになる。解析結果と測定結果を比較すると、両者の傾向はほぼ一致しているが、定量的には一致していない。この原因の一つとして、樹脂内部の温度の不均一分布が考えられる。

8.3 微小接合部の強度

電子デバイスの高密度化、高集積化が進むにつれて、接合部は極めて微細化され、極小面積で十分な接続機能を果たすことが要求され、接合部の力学的条件は厳しくなっている。接合部の接合強度を評価することは、デバイスの信頼性の保証に重要である。デバイスの接合部には接合された部分の異種材料間の熱変形の差異により、せん断だけでなく曲げや引張、圧縮の荷重を受けることがあるので、接合部に複合荷重を加えてその強度特性を調べる必要がある。

図7²⁾はデバイス接合に用いられるBGAをモデルにした接合部試験片である。直径1mmのはんだボールを使用して、配線パターンを焼き付けた基板を接合したものである。はんだボールで接合した基板に垂直応力を加えた引張試験を行ったときの、応力とひずみの関係が図8²⁾である。図の(a)と(b)には、それぞれ試験温度が24度と100度の場合が示されている。どちらの温

図7 はんだ接合の試験片

(a) 24°C

(b) 100°C

図8 はんだ接合部の変形特性

度条件でも大きく塑性変形しているが、100度の場合のほうが塑性変形量は多い。また加工硬化率は24度の場合のほうが大きい。図9²⁾は引張応力とせん断応力の複合応力を加えた時の強度である。図の(a)と(b)には、それぞれ試験温度が24度と100度の場合が示されている。図中の実線は引張強度をもとにMisesの条件で計算した複合応力のもとでの強度である。24度では実験値のばらつきがやや大きい、Misesの条件よりやや大きくなっている。また100度では実験値のばらつきも少なく、Misesの条件にほぼ一致している。

(a) 24°C (相当ひずみ速度 0.0005sec^{-1}) (b) 100°C (相当ひずみ速度 0.005sec^{-1})

図9 はんだ接合部の複合応力下での強度

9. むすび

電子デバイスの構造に見られる接合部の力学的問題の概略を述べた。電子デバイスはセラミック、金属、高分子の3種類の材料の薄層積層構造と微小接合構造となっており、電子デバイスの接合部の力学的問題のほとんどは、相変化を受ける異種材料接合構造の熱応力の問題に帰着する。これらの問題を解決するためには、(1) 薄膜の物性、(2) 薄膜の付着強度、(3) 微小接合部の強度、(4) 相変化時の物性、などを解明する必要がある。電子デバイスの信頼性は異種材料の接合部の力学的特性に大きく関係しているといえる。なお、本報告は日本接着学会第41回年次大会での特別講演の内容に加筆したものである。

参考文献

- 1) 北野誠, 河合末男, 清水一男: 日本機械学会論文集, A編: 56巻, 525号, 1140頁 (1990)
- 2) 高須新一郎: 日本結晶成長学会誌: 4巻, 1/2号, 121頁 (1977)
- 3) S. Isomae: Journal of Applied Physics, Vol. 52, No. 4, p. 2782 (1980)
- 4) A. Kinbara, S. Baba and A. Kikuchi: Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 2, No. 1, p. 1 (1988)
- 5) J. C. Bolger and C. T. Mooney: IEEE Transactions of Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 7, No. 4, p. 394 (1984)
- 6) 三浦英生, 西村朝雄, 河合末男, 西邦彦: 日本機械学会論文集, A編, 53巻, 493号, 1826頁 (1987)
- 7) 柏原稔, 中山了, 鈴木政男: 日本電信電話公社 電気通信研究所, 研究実用化報告, 17巻, 6号, 1123頁 (1968)
- 8) J. Onuki, M. Suwa, M. Koizumi and T. Iizuka: IEEE Transactions of Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 10, No. 2, p. 242 (1987)
- 9) L. S. Goldman: IBM Journal of Research Development, Vol. 13, No. 5, p. 251 (1969)
- 10) 佐藤了平, 大島宗夫, 廣田和夫, 石一郎: 日本金属学会会報, 23巻, 12号, 1004頁 (1984)
- 11) J. W. Kanz, G. W. Braun and R. F. Unger: IEEE Transactions of Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 2, No. 3, p. 301 (1979)
- 12) 山口武則, 橋本慎, 水谷卓之: 日本機械学会誌, 84巻, 755号, 1070頁 (1983)
- 13) K. M. Liechti: Experimental Mechanics, Vol. 25, No. 9, p. 226 (1985)
- 14) K. Miyake, H. Suzuki and S. Yamamoto: IEEE Transactions on Reliability, Vol. 34, No. 5, p. 402 (1985)
- 15) 坂田莊司, 服部俊雄, 初田俊雄: 日本機械学会論文集, A編: 53巻, 495号, 2151頁 (1987)
- 16) 服部敏雄, 坂田莊司, 初田俊雄, 村上元: 日本機械学会論文集, A編: 54巻, 499号, 597頁 (1988)
- 17) 西村朝雄, 広瀬潤, 田中直敬: 日本機械学会論文集, A編: 59巻, 559号, 620頁 (1993)
- 18) 田中直敬, 西村朝雄: 日本機械学会論文集, A編: 60巻, 577号, 1992頁 (1994)
- 19) 松井広明, 池上皓三: 日本機械学会論文集, A編: 62巻, 596号, 993頁 (1996)
- 20) 河田裕志, 池上皓三: 日本機械学会論文集, A編: 56巻, 532号, 2471頁 (1990)
- 21) 桐生昌祥, 吉岡成典, 池上皓三: 第17回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, 63頁 (2002)