第4章 マイクロ加工の信頼性評価*

川 中 龍 介**

Reliability Evaluation of Microfabrication*

by Ryusuke Kawanaka**

1. 信頼性とは

信頼性の定義は「対象物の作動または性能の時間的安定性を表す度合または性質」とされている。マイクロ加工における信頼性を考える時、加工物の性能が、加工物の精度の自然な経時変化や、外部のストレスの長期または繰り返し負荷によって生ずる経時変化、強度の劣化、結晶成長によるトラブルなどの長期の時間経過後に生ずる変化によって期待する値からはずれることを対象としなければならない。これらの変化は破壊限界を越えた外力による変形は信頼性を考える時は論外の現象として除外すると、信頼性の面からみた変化や劣化は、材料の内部の変化に基因するものである。これらの変化はマイクロ加工でなくても当然起こる現象であるが、マイクロ加工である故に問題となる点は、十分な強度を持つ材料や構造が選定できないこと、使用材料が他の要求から限定されて変化に耐える材料が選定できないこと、従来の機械加工や接合方法とは全く異なる新しい加工方法を用いたために生ずる材料の変化・劣化が生ずること、微細領域での加工のために生じた局所的な変化が全体に拡がる時の影響が従来よりも大きいことなどが考えられる。

材料基因変化を分類してみると、寸法、強度、機能における変化が、内部要因で自然に起こるか、外部ストレスにより起こるかなる。これを示したのが図1である。

図1 マイクロ加工の信頼性要因

2. マイクロ加工における信頼性要因

2.1 マイクロ加工

加工には機械的、熱的、又は物理的、化学的な加工がある。従来の機械加工は、切削・研摩によって材料表面の原子の結合を機械的に引きはなして行くものであるが、この時引きはがされる原子が表面から取れて行くだけでなく、残った原子の結合にも大きな爪跡を残して、いわゆる加工層といわれる原子の結びつきの乱れた領域や加工歪の残っている領域が生じている。この領域は硬度が高くなっていたり、後で熱が加わると原子の配列が変化したりして、寸法や強度に影響を及ぼす基となる。

熱による加工には、放電加工や電子ビーム、イオンビーム、レーザビームのような高エネルギービーム加工によって局所的に材料を加熱溶解し、原子を溶かし去る方法があり、穴あけや切断に使用されている。この場合材料は融点以上に加熱されるので、除去されない材料部分も融点近くまで昇温される。少し離れた加工部の周囲は温度が上がっていないため、非平衡状態の加熱となり、加工部付近は大きな熱応力が生じる。大きな加工ではこの熱のため変形を生じるものもあるが、小さな加工では変化しないまでも内部応力をもったままとなり、時間の経過と共に変形することが考えられる。

接合が行われる場合、局所的な加熱冷却が行われるため同様な熱応力が発生して変形破壊されることが考えられるが、この場合はむしろ異種材料の接合によって生じる問題の方が大きい。即ち、熱膨張係数の違いによっておこる問題、拡散係数の違いによって生じる欠陥、金属間化合物の生成によって生じる問題など多彩であり、また変化（劣化）の程度も大きい。

接合には表1に示すように、融接、固相接合、ろう接の三種がある。第一番目の融接は相互の材料を溶融凝固させて融体と元の材料の接合を行うもので、同種の材料に対して行われることが多い。次の固相接合は融体を界することなく、同種の材料または異種材料間の相互拡散

*原稿受付 昭和59年9月25日

** 三菱電機㈱ Mitsubishi Electric Corp.

表1 接合の種類

No.	接合の種類	接合の状態	例
1	融 接		ガス溶接 アーク溶接
2	固相接合		圧 接 超音波接合
3	ろう接		ろう付 はんだ付

による接合である。最後のろう接は接合すべき材料と異なる第三の材料の融体と、接合材料との接合である。最後の二つはA+B又はA+C、C+Bのように材料の界面相互作用による接合である。マイクロ接合では微小領域を短時間に接合しなければならないこと及び材料の種類の選択の幅が小さくて接合し易い材料を選べる可能性の小さいことから、固相接合及びろう接が用いられることが多い。

薄膜技術は半導体工業の技術の進歩に伴って大きく発展して来たマイクロ加工技術であり、半導体以外にも電子部品の製造やバイトのコーディングなど広い分野に用いられている。薄膜技術は膜形成と膜の微細エッチングの二つに分けられる。いずれも物理的方法と化学的方法とがあり、それぞれにいくつかの方法がある。膜形成はいずれも蒸気（原子または分子状）にして推積させるものであるから、融液成長した材料とは相当異なった構造と性質をもっており、例えば、拡散係数など大幅に異なっていて、ホイスカの発生やマイグレーションなどはバルク金属よりもはるかに生じ易い。

2.2 マイクロ加工における信頼性要因

マイクロ加工における信頼性要因をまとめると表2のようになる。

形状加工のための機械的・熱的加工は、加工された極表面だけの表面現象及び数 $10\mu\text{m}$ 迄の極く浅い領域での現象である。この場合には、極く表面の変質層または融界残渣などが使用中にはがれたり、表面層が引張り応力をもつため加圧使用条件で用いるとクラックが入って寿命が短かったり、加工によって生じている内部応力が以後の熱処理や熱的環境下での使用により応力緩和や変質を生じて変形したり、強度不足になったりする。

接合においては、融接、固相接合、ろう接の種類によって異なるが、共通しているのは、一つの異種金属の接合

表2 マイクロ加工の信頼性要因

加工の種類	信 頼 性 要 因	故 障 状 況
機械的加工	加工層の形成 内部応力の増加	剥離 変化
熱 的 加 工	融液残渣の付着 内部応力の増加	剥離 変形
接 合	拡 散 ボイドの形成 金属間化合物の形成	接合力の劣化
薄 膜 形 成	エレクトロマイグレーション ホイスカの発生 腐 蝕	電氣的短絡 電氣的開放

部において生じる拡散現象によって惹き起こされる劣化、もう一つは、接合時の加熱冷却による応力によって生じる変形、劣化である。拡散では、二種の元素の拡散係数に差が存在することから、拡散が進行するにつれて原子の移動に差が生じ、一方の金属側にはvoidが生じる。このため、接合面積が減少して接合強度が低下したり、外力が加わると応力集中を起こし易くなって低外力で破断したりする。また、二種の元素の組合せによっては金属間化合物が形成される。金属間化合物は脆いものが多く、低外力によって破断したり、周囲の金属との熱膨張係数の差から、加熱冷却が繰り返されると熱疲労によって破壊に至ることもある。

薄膜は、半導体デバイスのチップ配線に広く用いられている。集積回路のチップの内部に形成されたトランジスタやダイオードなどを電氣的に接続するために、チップの表面に $2\sim 5\mu\text{m}$ 幅のアルミニウム薄膜を配線材料として使用している。この他にも集積回路では絶縁膜として酸化膜や窒化膜などが用いられている。これらの薄膜は、トランジスタなどとの接続のために、穴あけや細線加工を施されるが、すべてが μm 単位の加工である。信頼性上の問題では、酸化膜や窒化膜では成膜時のピンホールなどが問題となる。絶縁膜として使うものであるから、ピンホールがあると、濡れ電流の元となり、長期間使用している間に導通路ができてしまったり、電圧が高くなった時にパンチスルーを起こしてしまう。一方、アルミニウム配線の方は、電流が流れる通路であるため、長期間の使用や大電流が流されるとアルミニウム原子が電子で押し流されて「マイグレーション」を起こし、アルミニウム原子のなくなった所では断線、アルミニウム原子が堆積したところではショートしたりする。また、アルミニウムのホイスカが生じて、ショートの原因となったりする。電流密度が高いと起こり易いので、設計基準を設定して、過大電流密度の生じないようにしたり、アルミニウム薄膜の結晶粒子の大きさを調整した

り、第三元素の添加を行って防止している。

2.3 半導体デバイスの接合における例

半導体デバイスを構成しているのは、機能を司どるシリコンチップと、チップを保護しつつ外部と接続するための外装パッケージである。これらの接続のために、チップの接着とチップと外部リードを接続するためのワイヤボンディングが行われる。

パッケージには、大きく分けて、セラミック（金属封止）、セラミック（ガラス封止）、樹脂封止の三つがある。これらは、デバイスに対する信頼性の要求の度合に応じて選択使用される。パッケージの主な構造を図2及び3に示す。これから、最も信頼性の高いセラミック（金属封じ）パッケージを用いる場合、チップ取り付け部はシリコンと熱膨張係数の近いセラミックが用いられ、Au-Si合金ろうで取り付けられている。ワイヤの接続では、チップ側はアルミニウムボンディングパッド部にアルミ

ニウム細線を用いるため、Al-Al ボンドと同種金属の接合になっていて信頼性上は大変好ましい形である。パッケージ側では金めっき面上にアルミワイヤで接続されているが、超音波接続することにより昇温を極力抑え、金属間化合物の形成を防いでいる。また、この Au-Al 接合は Au めっきと Al パルクの組合せのため、後述の Au パルク（細線）-Al 蒸着膜よりも金属間化合物の形成が遅く、その内容も異なり、信頼性は高い。アルミニウム蒸着膜への金拡散と、Au めっき膜へのアルミニウム原子の拡散とではその速度が異なり、同じ Au-Al 系の組合せでも信頼性は大いに異なる例である。

セラミック（ガラス封止）及び樹脂封止パッケージでは、チップの取付部がセラミックではなく金属である。このため、チップより熱膨張係数が大きく、熱サイクルが加わると剝離の生ずる可能性は前のセラミック（金属封止）よりも大きくなる。セラミック（ガラス封止）パッ

(a) セラミック金属封止

(b) エポキシ樹脂封止

図2 集積回路のパッケージ構造

表3 集積回路の構成及び信頼性

項 目		パ ッ ケ ー ジ の 種 類		
		セ ラ ミ ッ ク (金属封止)	セ ラ ミ ッ ク (ガラス封止)	エ ポ キ シ 樹 脂 (モールド)
ダイボンディング (チップ付け)	材 料	セラミック	コバール	銅合金
	めっき	金	銀	銀
	ろう材	Au-Si	Au-Si	Pb-Sn 又は, Ag ペースト
ワ イ ヤ ボンディング	チップ側	ワイヤ材料	アルミニウム	金
		パッド	アルミニウム	アルミニウム
	パッケージ側	接合法	超音波	熱圧着又は 超音波熱圧着
		めっき	金	銀
		接合法	超音波	熱圧着又は 超音波熱圧着
封 止 方 法		Pb-Sn 又は Au-Sn	ガラス	エポキシ樹脂
信 頼 性 (相 対 的)		高	中	低

ケースでは、封止部にガラスを用いるため、金属フレームにはコパールや Fe-42%Ni 合金が用いられており、樹脂封止の場合の銅合金よりも熱膨張係数の差は小さい。銅合金をチップ取り付け台に用いると、特にチップが大きい場合に影響が大きくなるが、加熱冷却のサイクルを受けるとチップに応力が働いてチップ割れを起こす。これを避けるため、接合部材には軟らかいはんだや銀ペーストを用いて応力を吸収し、チップに応力が直接働かないように工夫されている。これらの材料の熱膨張係数を表 4 に示す。

内部の細線の接続は、チップ側では金ワイヤとアルミニウム蒸着膜の Au-Al 系の組合せになっている。この組合せは高温で長時間放置すると AuAl_2 , AuAl , Au_2Al , Au_3Al_2 , Au_4Al などの金属間化合物が形成されて、脆い金属間化合物の所で破断したり、金属間化合物相互や元の金属との間での熱膨張係数の相異から熱サイクルでクラックが生じて破壊する。これを防ぐため、作業温度や作業時間に上限を設けて金属間化合物の形成を抑えている。ケース側は銀めっきと金パルクの組合せである。この組合せは接合も容易で信頼性も高い。

以上の例で示したように信頼性は材料の種類、組合せ、作業条件によって大幅に異なる。上記の金線を銀線に置き換えてアルミニウム蒸着膜の上にボンディングすると、初期の接合強度は金線の場合と同程度であるが、高温放置の試験をすると、接合部がすぐに脆くなって破断強度が著しく低下してしまい、金の場合の 1/10 の寿命もない。このように材料の選定は信頼性を確保する上から非常に重要である。信頼性の程度を FIT (10^9 時間当りの故障数) で表す時、同一チップを先に示した三種類のパッケージに入れた時の信頼度は表 5 に示すようになる。しかも最高使用温度は、セラミック(金属封止)パッケージで 125°C であるのに、樹脂封止パッケージでは 75°C

表 4 膨張係数

材 料	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$)
アルミナ	7.0
コパール	4.7
Fe-42% Ni	7.9
銅	16.8
シリコン	2.6

表 5 信頼度と最高動作温度

項 目	パ ャ ケ ー ジ の 種 類		
	セラミック	セラミック	エポキシ樹脂
信頼度 (FIT)	20	100	500
最高動作温度 ($^\circ\text{C}$)	125	100	75

と一番低い。これはパッケージ材料の差にもよる。

3. 信頼性を確保するために

3.1 材料の選定

IC の組立の例で述べたように、同じ使用目的、同一機能のチップであっても、これを包むパッケージの材料(材料の組合せを含む)の選択によって信頼性は大幅に異なり、使用温度範囲の制限も大幅に変動する。もちろん、IC の信頼性はパッケージ構造、材料だけでなく、IC の製造、使用時における温度、湿度、その他種々の条件が重畳して効いている。しかし、この中で、パッケージの占める比率は大きい。高い信頼性を得るためには、材料の選定が非常に重要であり、構造や性質、機能から要求される材料に対する条件、特性の他に、信頼性上の観点からも材料の選定を行わなければならない。今後、材料の選定は、材料設計を含めて幅広い活動が行えるようになって行くと思われるので、この中に信頼性の面からの設計要素を入れておくことが大切である。材料選定にはもう一つの要素があり、製品のコスト面からの要求である。材料の選定は、(1)材料の機能、(2)信頼性、(3)コストの三つの兼ね合いを最適にするように行われなければならない。

信頼性の面から考慮すべき因子は、

- (1) 被加工材の性質
- (2) 熱や外力によって受ける影響
- (3) 経時変化
- (4) 接合して用いる時の材料の組合せによる拡散の程

表 6 集積回路の信頼性試験

試 験 項 目	試 験 条 件 例
はんだ耐熱	260°C , 10秒
はんだ付性	230°C , 5 秒
*熱 衝 撃	$0^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$, 5 回
*温度サイクル	$-55^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$, 5 回
温湿度サイクル	$65^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C} \sim 65^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$, 95% RH, 5 回
気 密 性	ファインリーク, 10^{-8}ml/s
*衝 撃	$1,500\text{G}$, 0.5 ms, 3 回
*定 加 速 度	$10,000\text{G}$, 1 分
*振 動	$2,000\text{Hz}$, 1.5 mm, 10G , 20分
*端 子 強 度	90° 曲げ, 3 回
*塩 水 噴 霧	5% 食塩水, 35°C , 24時間
*高 温 保 存	150°C , 1,000 時間
*低 温 保 存	-65°C , 1,000 時間
*耐 湿 性	85°C , 85% RH, 1,000 時間
定常動作寿命	$T_a = 25^\circ\text{C}$ 又は $T_{\text{ope.max.}}$, 1,000 時間
断続動作寿命	$T_a = 25^\circ\text{C}$ 又は $T_{\text{ope.max.}}$, 1,000 時間

度、熱膨張係数の差、金属間化合物など異物の形成などである。

3.2 信頼性評価

信頼性の評価には管理された既知のストレスをかけて得られた実験室的データから、部品やシステムの耐久性（寿命）特性を評価するための信頼性試験が行われる。一般に、電子部品に対しては、信頼性試験として環境試験及び耐久性試験が行われ、使用環境における劣化の様子と使用条件における劣化の様子を最大ストレスによって調べたり、過大ストレスにより加速して劣化させ耐久性を推定する。半導体デバイスに対して行われる信頼性試験の例を表6に示す。これらの試験を行うに当たって注意しなければならないのは、試験での劣化メカニズムと実際の使用状態で発生する故障のメカニズムが同一であることである。故に試験条件の設定に当たっては同一故障メカニズムになるように設定することが必要である。この表には半導体デバイスのもつ信頼性要因をすべて判断するように設定されている。この内、マイクロ加工に関連する項目を取り出すと*印をつけたものである。先に示したように、半導体デバイスにおいては信頼性は設計や製造で決定される要因が多く、特にパッケージとデバイス組立関連の項目が信頼性に大きく影響する。*印のついたものをみると温度に関するものが多く、接合部への熱的影響が極めて大きいことが判る。

以上に述べた方法は半導体デバイスに対して標準化された方法であり、判定基準を電気的特性の劣化、変動にしている。材料や接合の変化や劣化を判断するにはこれでは不十分である。電気的特性が良であっても、接合部は破断して“接触”しているだけの場合がある。これは材料的見地から言えば不良である。マイクロ加工の信頼性評価という観点からは、材料や接合の特性の変化を検出できる方法を確立し、適正な判定基準を設けて試験を実施しなければならない。条件の設定に当たっては、製造環境、使用環境で受ける外的要因と材料や接合のもつ劣化特性をよく調べた上で設定する。これは電子部品の場合の考え方と同一である。

3.3 故障解析

信頼性試験を行うことにより、どのストレスで、いつ、いくつ、故障が生じたかを知ることができて、弱点（どのストレスでこわれ易いか）が判る。これにより、およその改善対策は立てることができるが完全ではない。信頼性の真の改善のためには、故障に至るメカニズムを明らかにし、故障の源で改善しなければならない。故障箇所の観察、分析などの手段を用いて詳細に調査し、故障メカニズムを推定すると共に、再現実験を行って、こ

の推定が正しいことを確認する。このようにして故障のメカニズムを明らかにした上で、故障の起こらないように対策を立てる。

マイクロ加工の場合、加工領域が非常に小さいので、観察するにせよ、分析するにせよ、微小領域の解析できる装置が必要になる。さらに、材料の特性や温度、湿度、ガスなどによる変化の様子を測定する装置も必要となる。これらの解析に必要な装置の一部を表7に示した。

表7 故障解析装置

方 法	装 置
観 察	光学顕微鏡 走査型電子顕微鏡 透過型電子顕微鏡
微量分析	X線マイクロアナライザ オージェ電子分光装置 イオンマイクロアナライザ X線光電子分光装置
特性測定	X線回折装置 熱分析装置 極微小硬度計 微小引張試験装置

マイクロ加工は半導体工業をはじめとしてあらゆる分野に広く用いられているが、新しい加工法や新しい材料が数多く取り入れられており、熱や湿度、外力などによる影響にも新しい現象が生じている。これらの解析を確実にやって行くことと、既存の装置、技術で間に合わないものに対して新しい方法や新しい装置を開発することが信頼性向上のために不可欠の要素である。

3.4 故障メカニズムの確立

信頼性は設計段階で十分な検討を行っても十分ではない。あらゆる使用条件までを検討し尽くすことは不可能だからである。生じた故障を解析し、故障発生源を一つ一つ無くして行くことにより信頼性は向上する。正しく故障現象を解明し、そのメカニズムを基にして故障の発生しない方法を確立して行く。信頼性は故障解析の実施と故障メカニズムの確立を基にした科学的性質をもつものである。

4. ま と め

マイクロ加工の信頼性を考える時、材料の選定、材料の外部ストレスによって受ける経時変化の事前対策を講じることが大切である。このためには材料の特性、変化を評価できる試験方法を確立することも必要である。新しい材料、新しい加工法も増加するのでこれに対処し得る手段も講じなければならない。また、発生した故障に対する解析、故障メカニズムの解明を行って故障の発生しない対策を講じることが大切である。