<総説>

(受理:平成22年10月5日)

FC・BGA・CSP用アンダーフィル材について
Underfill Materials for FC, BGA and CSP奥野 辰弥*
Tatsuya OKUNO

1. はじめに

携帯電話を代表とする電子機器の小型化・高機能化にともない、高密度実装が求められ半導体部品も表面実装タイプであるQFP (Quad Flat Package) から実装面積を小さくできるフェイスダウン方式FC (フィリップチップ)、BGA (ボールグリッドアレイ)、CSP (チップサイズパッケージ) 等のエリアアレイ実装が主流になっている(図1)。このフェイスダウン方式では、はんだ接合部に応力が集中するためにはんだクラック等により接続信頼性が劣る課題があった。そこで、液状タイプの封止材であるアンダーフィル材料をはんだ接合部に注入し、応力を緩和し接続信頼性向上が行われている。本報告では、アンダーフィル材に求められる特性について紹介する。

図1 半導体の動向

2. アンダーフィル材について

アンダーフィル材の主な使用目的は、基板と半導体のはんだ接合部を保護する目的である。BGA・CSPのはんだ接合部は、一般的にはんだボールと称されその高さは100~400 μ m程度である。この隙間にアンダーフィル材を充填するために、種々の工法が検討されている。代表的な工法は、基板と半導体の隙間に毛細管現象でアンダーフィル材を浸透するキャピラリーフロー工法がある。本工法に適用されるアンダーフィル材は、低粘度(100Pa・s以下)でチクソ性がないタイプが求められる。本工法以外で現在実用化されている事例を図2に示す。

キャピラリーフロー工法以外は全て、アンダーフィル材を先に基板或いは半導体に塗布して半導体を搭載する工法であり、狭ギャップ化にともなう作業性低下の問題を解決する工法である。異方導電材料(ACF・ACP)は、ガラス基板やポリイミド基板への半導体の搭載に多く使用されている。NCP(ノーフローアンダーフィル)工法は、接合部に金が使用され半導体と基板の金/金接合を超音波と熱により接合され、その熱でアンダーフィル材も仮硬化する手法である。硬化時間は数秒レベルが求められる。ノンフローアンダーフィル工法は、はんだ接合に必要なフラックス機能を有するアンダーフィル材で、基板にアンダーフィル材を塗布後にはんだボールが使用される半

奥野 辰弥

略歴: 1983年3月 京都工芸繊維大学工学部工業化学科 卒業
同年4月 サンスター技研株式会社入社
主な研究内容: エポキシ樹脂改質, 各種硬化剤開発, アンダーフィル材開発等
専門: 高分子材料物性
趣味: 映画鑑賞, 散歩等

* サンスター技研(株)ケミカル事業部研究開発部
高槻市上土室5-30-1 〒569-1044
Sunstar Engineering Inc. Chemical Division R&D
5-30-1, Kamihamuro, Takatsuki-shi, Osaka, 569-1044,
Japan

図2 アンダーフィル材工法

図3 自己組織化のプロセス

導体を搭載し、リフロー工程を経由してはんだ付けとアンダーフィル材の硬化を同時に行う手法である。本工法の難しさは、はんだ接合完了まではアンダーフィル材は未硬化であり、またリフロー完了時にはアンダーフィル材の仮硬化状態が必要であることから、各実装ラインのリフロー温度プロファイルに合わせた材料設計が求められることにある。また、リフロー工程で発生する基板からの水蒸気によるアンダーフィル材のボイドを抑えるために、基板の吸湿管理も重要である。最近では、クリームはんだに代わりに、フラックス成分を配合したアンダーフィル材にはんだ粉を混合して、はんだ付けとアンダーフィル機能を有する技術開発¹⁾や同様にフラックス機能を有するアンダーフィル材にはんだ粉を混合した材料を用いて、半導体のはんだボール或いは、はんだバンプを必要としない工法が検討されている²⁾。本材料は、リフロー工程で分散したはんだ粉が、電極部に移動してはんだ接合ができる工法であり、現在インジウム系の低融点はんだであるが、100 μm ピッチまでの接続が可能とされている。そのプロセスを図3に示す。

3. アンダーフィル材の必要性能

アンダーフィル材は、半導体の外的応力（基板変形・基板及び半導体の線膨張差から生じる応力・振動衝撃等）からのはんだ接合部の保護、使用環境（耐湿性・耐熱性・耐寒性）によるアンダーフィル材の耐久性、電気絶縁性、耐マイグレーション等の性能が求められる。代表的なアンダーフィル材の信頼性試験項目及び条件を表1に示す。

4. アンダーフィル材の設計

FC用途のアンダーフィル材は、エポキシ樹脂・酸無水物硬化剤・硬化促進剤・溶融シリカの基本配合系が多い。ベース樹脂としては、電気絶縁性能及び接着性能が優れることからエポキシ樹脂が使用される。そのエポキシ樹脂としては、ビスフェノール型エポキシ樹脂が主流であるが、ビスフェノール A 型エポキシ樹脂は、環境ホルモンの問題から使用禁止物質に登録されるケースが増えてきており、ビスフェノール F 型エポキシ樹脂に代替されてきている。ビスフェノール A 型エポキシ樹脂に比べビスフェノール F 型エポキシ樹脂は、低粘度ではあるが、反応性が劣るこ

表1 代表的なアンダーフィル材信頼性評価項目

試験項目	試験方法・条件
絶縁抵抗	楕形電極へ接着剤を塗布・硬化させ 高温高湿保管 温湿度: 85°C 85%RH 時間: 2000h
電圧印加耐湿	楕形電極へ接着剤を塗布・硬化させ 直流電圧を印加しつつ高温高湿保管 マイグレーション確認 温湿度: 85°C 85%RH 時間: 2000h 印加電圧: DC20V
高温保管	高温保管 温度: 100°C 時間: 2000h
低温保管	低温保管 温度: -40°C 時間: 2000h
高温高湿保管	高温高湿保管 温湿度: 85°C 85%RH 時間: 2000h
熱衝撃	熱衝撃 サイクル条件 温度: A 125°C/B -40°C 時間: AB 各 30min サイクル数: 1000Cycles

とやガラス転移温度が低い等の課題がある。その他のエポキシ材料としては、ナフタレン型エポキシ樹脂が使用されている。ナフタレン型エポキシ樹脂の特性としては、線膨張係数が低減できる特性を有する反面、皮膚刺激性が高い材料であるため、取り扱いには注意が必要である。また、本用途では配線パターンが微細化されているため、マイグレーション防止を目的に、エポキシ樹脂を合成するときに使用されるエピクロヒドリンから生じる塩素イオンを低減したエポキシ樹脂が使用されている。更には、不純物イオンを取り除くためのイオンキャッチャー剤が添加されることもある。

硬化剤としては、一般的に酸無水物硬化剤が使用されている。酸無水物としては、メチルテトラヒドロ無水フタル酸に代表される液状タイプが使用され、アンダーフィル材の低粘度化にも有用である。また本硬化系の特徴としては、

図4 各種硬化剤と耐湿接着性 (121°C, 100%)

図5 各種硬化剤と吸水率

電気絶縁性の高い硬化物が得られことからアンダーフィル材の硬化剤として適用されている。本硬化剤の課題としては、①一液化が求められるアンダーフィル材において、常温でのポットライフが短く、保管温度が-20~-40°Cの低温保管が必要となる。②硬化温度が高い課題もある。通常は150°C以上必要であるが、硬化促進剤の選定によって、硬化条件を調整している。また③図4, 5に示したように、耐湿特性に課題があり封止剤としての耐湿信頼性に課題がある³⁾。図4は耐湿密着性としてせん断強度を示しているが、酸無水物硬化系はフェノール硬化系・アミン硬化系に比べ経時で、大きく接着強度が低下する結果となっている。この要因として、図5で示されているように吸水率が高いことと、酸無水物硬化剤とエポキシ樹脂の反応が、エーテル結合となるために加水分解が生じやすいことである。そのために、耐湿接着性を改善する工夫が各社なされているのが現状である。ここに示したフェノール系硬化剤は、アンダーフィル材としては有用な硬化剤ではあるが、固形タイプがほとんどで液状タイプはガラス転移温度が、80°C程度にしかならない課題がある。またアミン系硬化剤は、粉体系が多くフィラー高充填用途には適さない。

硬化促進剤は、3級アミン・イミダゾール化合物・マイクロカプセル硬化剤が使用されている。常温でのポットラ

写真1 浸透過程でフィラーが凝集

写真2 硬化過程でフィラー沈降

イフ及び硬化条件への影響は大きく、潜在性型（粉体或いはマイクロカプセル型）が選定されている。

線膨張係数及び硬化収縮の低減から熔融シリカが使用される。アンダーフィル材では、キャピラリーフロー性から球状の熔融シリカが用いられる。半導体の誤動作を防止する目的で、低ウランタイプの熔融シリカを使用するケースもある。線膨張係数低減には、高充填化（60wt%以上）されるが、流動性を低下させずに高充填するためには、フィラーの表面処理が必要となる。フィラー選定に関しては、先の形状の他に粒径・粒度分布も重要である。写真1は、アンダーフィル材を浸透する過程ではんだバンプ間で、フィラーが詰まり樹脂成分のみがその後浸透した写真である。これは、はんだバンプのピッチに対してフィラーの粒径が不一致であることから生じる現象である。写真2は、アンダーフィル材の硬化過程でフィラーが沈降した写真を示す。沈降を防止するためには、粒度分布の調整がポイントになる。微細フィラー（ $1\mu\text{m}$ 以下）添加も効果があるが、流動性にも影響されるため注意が必要である。

5. 信頼性向上のための設計

FC用の半導体チップは、大型化・狭ギャップ化・チップの薄型化が進んでいるため、アンダーフィル材の更なる設計が必要となってきている。特にチップの薄型化により、アンダーフィル材の硬化過程或いは熱衝撃により、チップクラックが発生しやすくなっていることからフィラーの高

写真3 浸透化でのボイド

写真4 信頼性が不良であったアンダーフィル材断面

充填化が進んでいる。従来は、はんだバンプの線膨張係数を合わせる目的で、フィラー含量としては60wt%程度であったが、70wt%まで添加されたアンダーフィル材もある。またチップの大型化・狭ギャップ化から高浸透タイプが望まれており、フィラー粒径の微細化が進んでいる。特にギャップは、基板の配線パターンの高さも配慮すると、ギャップが $10\mu\text{m}$ 以下になっているところもあり、浸透方式でアンダーフィル材を注入した場合に、ギャップ高さの違いから浸透速度が異なり空気を巻き込みボイドが発生して、信頼性に課題がでることもある。（写真3で丸部分がボイド）また、写真4には、アンダーフィル材の硬化物の断面を観察した写真を示している。本写真のアンダーフィル材は、熱衝撃性で、不良が発生した材料であるが、アンダーフィル材硬化物の断面を観察すると、フィラーの分散が不均一となり、フィラーが分散していない箇所が確認された。この不均一性は、使用されている硬化剤或いはトナー等の分散状態の影響により生じていると考えられる。逆に写真5は信頼性が良好であったアンダーフィル材の断面写真を示しているが、良好な分散性を示している。狭ギャ

写真5 信頼性が良好であったアンダーフィル材断面

図6 熱衝撃試験結果

プ化によりフィラー粒度分布のみならず、使用される硬化剤等の粒径も配慮する必要が出てきている。

熱衝撃性に関しては低硬化収縮も重要であるが、エポキシ樹脂の低弾性化によるアンダーフィル材の内部応力低減も信頼性に影響を及ぼす。図6に線膨張係数及び弾性率が異なるアンダーフィル材の熱衝撃（-25⇔125℃）の信頼性評価を実施した結果を示す。また、信頼性評価に用いたアンダーフィル材の特性値を表2に示す。これから、線膨張係数が同等であっても熱衝撃性の信頼性が大きく異なることが分かる。信頼性においての低弾性化は、半導体チップの薄型化により益々重要な因子になると考えられる。アンダーフィル材の低弾性化は、アンダーフィル材中に低弾性な樹脂成分を添加することで達成が可能であるが、表3に示したようにどのような構造で低弾性材料を添加するかで、特性に影響を及ぼす。一般的には海島構造と称されるエポキシ樹脂の改質が行われている。この場合エポキシ樹脂と低弾性材料は、溶解することなく相分離構造となる。そのため、海にあたるエポキシ樹脂の特性が維持され、島部分に低弾性材料が含まれているため弾性率が低減できるメリットがある。

6. BGA・CSP用アンダーフィル材の設計について

BGA・CSPアンダーフィル材は、車載関連・モジュール部品等の用途においてはFC用と同等の高信頼性が求められるが、一般的には携帯民生機器（携帯電話・デジタル

表2 熱衝撃試験使用材料の特性

	低弾性■	低弾性▲	高弾性●	高弾性△
ベース・レジン	Epoxy	Epoxy	Epoxy	Epoxy
硬化条件	125／20	125／20	120／30	120／10
T _g (℃)	120	127	120	120
フィラー(%)	50	63	53	60
α1	38	25	39	34
α2	54	45	126	122
曲げ弾性率(Gpa)	4.4	6.5	8	6

表3 エポキシ樹脂の改質と特性の変化

	均一系	不均一系		
相構造		<div>硬化</div> <div>相溶 非相溶</div>
	エポキシ樹脂と相溶	硬化時にエポキシ樹脂と相分離	エポキシ樹脂と非相溶	エポキシ樹脂と非相溶架橋粒子
材料	ダイマー酸変性 ウレタン変性	アクリロニトリルゴム PES	ホリブタジエンゴム シリコン変性	架橋ゴム粒子 アクリルゴム粒子 架橋シリコン粒子
T _g 変化	↓↓↓	↓↓	↓↓	↓↓
弾性率	↓↓↓	↓↓	↓	↓

※ ↓ : 未変性エポキシ樹脂に対しての特性低下度

(a) 落下強度評価用実装基板の説明

(b) はんだパンプの負荷と実装基板の歪

図7 落下衝撃時ののはんだボールへの影響

カメラ・ノートパソコン等)に使用されることから信頼性レベルは高くない。本章では、この民生機器用途のアンダーフィル材について述べる。

BGA・CSPは、技術進展によりアンダーフィル材を使用しなくとも熱衝撃の信頼性は確保できる部品設計となってきた。そのためアンダーフィル材を使用する目的が、落下衝撃や基板変形によるはんだ接合部の保護となっている。また、アンダーフィル材を塗布した基板で不良が発生した時に、修理或いは不良解析のため、アンダーフィル塗布部品が容易に取り除け、基板が再生できるリペア機能を求められる。

落下衝撃性は、図7に示したように⁴⁾ コーナーのはんだボールが最も変形が生じて、基板の変形に比例して、はんだボールにも負荷がかかりはんだ接合が損傷する。アンダーフィル材が使用されていない場合は、落下衝撃のエネルギーがコーナーのはんだボールに応力集中する。アンダーフィル材が塗布されれば、半導体の接続状態がはんだボールの点接合状態から面接合状態となり、落下衝撃時のエネルギーを分散する効果があるため、アンダーフィル材を使用すれば、落下衝撃性は向上する。アンダーフィル材の設

計としては、落下衝撃のエネルギーを吸収することが望まれる。図8に動的粘弾性によって測定された $\tan \delta$ を示す。 Δ で示している材料は、一般的なエポキシタイプのアンダーフィル材で、 $\tan \delta$ は高くないのに対して、 $\circ$ で示した材

図8 アンダーフィル材の損失正接

図9 損失正接と落下衝撃性能

図 10 キー押し変形の信頼性評価結果

料は、高い $\tan \delta$ を保持するために開発されたアンダーフィル材である。 $\tan \delta$ が高いと素早く歪みを緩和してはんだボールに加わる応力を低減できる。実際の落下衝撃の結果を図 9 に示す。 $\tan \delta$ を高く設計したアンダーフィル材が優れた落下衝撃性有していることが分かる。

携帯電話用途では、キー押しにより実装基板が変形する課題がある。更に、小型化・軽量化から基板の薄型化も進み、基板が変形しやすくなってきている。このことから、キー押し変形による半導体のはんだ接合部の保護もアンダーフィル材の要求特性となっている。理想的には基板の剛性を高めることができるアンダーフィル材（弾性率を高める）適用が好ましいが、アンダーフィル材は、100～400 μm 程度の厚みとなるため、ほとんど基板の剛性を高める効果は認められないのが現状である。図 10 に弾性率が高いエポキシ系アンダーフィル材と弾性率が 1/100 であるアンダーフィル材のキー押し評価結果を示す。先の落下衝撃同様にアンダーフィル材の効果としては、基板変形によりはんだボールの接合部に加わる応力をアンダーフィル材で分散することで、キー押し性能を向上が期待できる。よりアンダーフィル材の効果を高める設計としては、基板変形に対して追従できるアンダーフィル材が好ましい。一般的なエポキシ系アンダーフィル材は、引っ張り時の伸びが 2 % 程度と小さいために、基板が大きく変形するとアンダーフィル材自体にも応力集中が生じて、はんだボールの接合部に影響するのに対して、ここで示した弾性率が低い系は、引っ張り時の伸びが 100 % 程度変形するために、基板変形による変形量ではアンダーフィル材に応力集中せず、はんだボールに加わる応力を分散するためキー押し性能が優れると考えられている。

以上のことから最近では、低弾性タイプのアンダーフィル材が開発されており、ウレタン材料を利用したゴム弾性を有するアンダーフィル材も実用化されている。表 4 に一般的なエポキシアンダーフィル材の特性とウレタンアンダーフィル材の特性を示す。

表 4 各種アンダーフィル材の代表特性

Product No	ウレタン系	エポキシ系
Base resin	Urethane	Epoxy
UF type	Reworkable	Reworkable
Cure(℃/min)	80/10	120/30
Hardness (ShoreD)	D40	D86
Tg ^{*)} (℃)	-85	69
伸び(%)	100	2
$\alpha 1$ (℃) ^{*)}	68	63
$\alpha 2$ (℃) ^{*)}	197	210

*) TMA測定

7. BGA・CSP用アンダーフィル材のリペア性について

一般実装で使用されるアンダーフィル材は、リペア性が求められることが多く、リペア性能を有するアンダーフィル材が製品化されている。リペアを必要とされるアンダーフィル材塗布部品は、はんだ溶融するために熱処理され取り除かれるが、基板側にアンダーフィル材の残渣が残るため、この残渣を処理して基板が再生できるかがリペアで求められるところである。

7.1 リペア技術

リペア工法としては、熱と溶剤膨潤の手法が提案されている。溶剤の膨潤法としては、日東電工と日本電気⁵⁾が、エポキシ樹脂の硬化剤成分にフッ素基を含む芳香族アミン硬化剤を用いることにより、溶剤で膨潤して、基板に残った残渣を容易に取り除けるとしている。また熱を利用したリペア技術としては、ナガセケミテックス⁶⁾が、熱硬化エポキシ材料でありながら、エポキシ樹脂及び硬化剤の選定により、硬化後は 80℃付近から熱可塑性として機能し

図 11 ウレタン結合の熱平衡反応

て、簡便にリペアができるとしている。ロックタイト⁷⁾が、熱可塑性材料をエポキシ樹脂に分散することにより熱時の接着強度が低下するために、基板に残ったアンダーフィル残渣がはんだごて等の熱処理で簡単に取り除けるとしている。またサンスター技研⁸⁾は、アンダーフィル材のベース樹脂として、ウレタン材料を用いることによりウレタン結合が部品取り外しの熱より分解(図 11)して、接着強度を低下させて基板残渣をはんだごて等を使用することなく常温で簡単に取り除けるとしている。ウレタンアンダーフィル材とエポキシアンダーフィル材のリペアを行った結果を表 5 に示す。半導体を熱処理により取り除いた後、基板に残った残渣は、ウレタン材料は室温で除去できるのに対して、エポキシ材料は室温での除去が難しいためはんだごての熱を利用して、残渣を取り除いた。その結果、エポキシ系材料はランドの剥離が認められたが、ウレタン材料は基板のランド隔離なく再生が可能であった。

待されている。

また、リペアする基板の多くは両面実装基板となっており、リペアを実施する場合は反対側の部品を取り除く必要がある。更に、高密度実装された基板は多層基板が使用されているため、リペア工程での熱でランド等の剥離がなく、外観上全く問題ない状況であっても、内部断線が起こることもある。

8. おわり

FC 用のベアチップ・WCSP のチップの薄型化が進んでおり、チップクラックに対するアンダーフィル材の対応が重要課題となっている。また、鉛フリーはんだによりクリームはんだ中に含まれるフラックス成分が多くなるとともに、半導体の狭ピッチ化によりギャップが狭くなり、残留フラックスの対応が迫られている。残留フラックスが基板と半導体のギャップをふさぐ状況になりつつあり、フラックス除去の洗浄も難しくなっている。更に、リペア性能を有するアンダーフィル材は、実用化されている多くは、熱により基板との接着力を低下する材料であり、高信頼性が求められる用途或いは耐リフロー性が必要な用途には展開できていないため、両立できる材料開発が望まれている。

表 5 リペア検証結果

	CSP塗布状態	CSP外し基板面	簡易洗浄
ウレタン系
従来 (エポキシ系)

7.2 リペアの課題

リペアに使用される装置としては、局部加熱可能な熱風式のリペア装置が主流である。下部からの加熱と上部からのホットエアーで目的の部品を加熱するシステムである。本装置の課題としては、取り除く部品の周辺部品も加熱され、はんだが溶融する可能性がある。近年、高密度実装は益々進んでおり、部品と部品の距離が 0.3mm 程度になってきている。このことから局部加熱できる新たな工法が期

参 考 文 献

- 1) 特開 2001-219294
- 2) 藤本公三ほか, Mate2004 論文集, 183 (2004).
- 3) 平山浩樹ほか, 日経マイクロデバイス, 43, 4 (1983).
- 4) 富士通技報 (2004).
- 5) 特開 2001-53050
- 6) 西口隆公, 日本機械学会講演会資料集, NO. 01-86 (2001).
- 7) ロバート・チュウ, 日本機械学会講演会資料集, NO. 01-86 (2001).
- 8) 後藤錠志ほか, 第 16 回エレクトロニクス実装学術講演大会論文集, 227 (2002).