

高信頼性鉛フリー化製品の製造における課題

要約

近年、鉛フリー化製品が推し進められており、パッケージ材料が大幅に変わりつつあります。エレクトロニクス機器製造メーカーは、240°C~260°Cのリフロー・ピーク温度に一貫して耐えられる材料を求めています。このような高温でリフローはんだ付けを行うと、特に長時間湿気にさらされた後では、いくつかの問題が発生します。高信頼性製品を製造するためには、こうした問題を解決する必要があります。

プラスチック・パッケージでは、モールドおよびダイ・アタッチに、エポキシ樹脂、粒子状充填剤、その他添加剤から成る各種有機化合物を用いています。周囲の雰囲気と平衡状態にあるエポキシ樹脂は少量の湿気を吸収しており、その湿気はプリント回路基板のリフロー工程時に飽和蒸気化します。この蒸気による過度な圧力と、モールド・コンパウンドおよびダイ・アタッチ材の曲げ強度の低下により、パッケージに破壊的な不具合が生じるおそれがあります。パッケージの典型的な不具合モードとしては、封止材の亀裂、基板の亀裂、パッケージの激しい変形、1つまたは複数の材料接合面の剥離などがあります。この問題は、アルテラのデバイスに典型的な大型ダイを用いると、さらに悪化します。

この論文では、鉛フリー製品の信頼性および使いやすさの要件を満足するのに必要な変更点の一部を説明します。また、プラスチック・クワッド・フラット・パック (PQFP)、薄型クワッド・フラット・パック (TQFP)、ボール・グリッド・アレイ (BGA)、およびフリップ・チップ BGA コンポーネントの信頼性を実証する信頼性試験結果を提示して、その試験結果でそれぞれ異なったパッケージ・タイプに応じて異なるアプローチをとります。これにより、それぞれの製品がより高いリフロー温度に適合できるようになります。あるパッケージ・ファミリの場合、アセンブリ・プロセスが改善、最適化され、鉛フリー・リフロー温度に対する信頼性が確保されました。その他の製品では、新たなパッケージ材料を使用することで既存のパッケージ材料の限界を克服することができました。

また、リフロー温度が各パッケージ・ファミリの代表製品の耐湿レベルに及ぼす影響についても示します。信頼性試験時のポップ・コーン現象や層間剥離など従来型の対応だけでなく、高温時に、吸収された湿気がコンポーネントの反りに及ぼす影響を観察することの重要性についても述べます。吸収された湿気は、パッケージの反りを増大させることが知られています。鉛フリー・リフロー温度で大型 BGA コンポーネントの反りが大きい場合は、最終アセンブリの製造性と信頼性に影響するので、規定の吸湿レベル (MSL) をモニタする必要があります。

はじめに

アルテラの鉛フリー化ソリューションは、半導体およびエレクトロニクス業界に課せられている鉛使用の削減や廃絶要求が動機となっています。欧州理事会 (European Council) の廃電気電子機器指令 (WEEE) で、2006年までにエレクトロニクス製品への鉛使用を制限することが提唱されています。日本では、旧通商産業省が自動車に対して鉛の最大量を設定しています (バッテリーを除く)。日本にはエレクトロニクス・デバイスに使用される鉛の削減を規定する法令はありません。

んが、エレクトロニクス業界は鉛フリーのエレクトロニクス・デバイスを積極的に売り込んでいます。

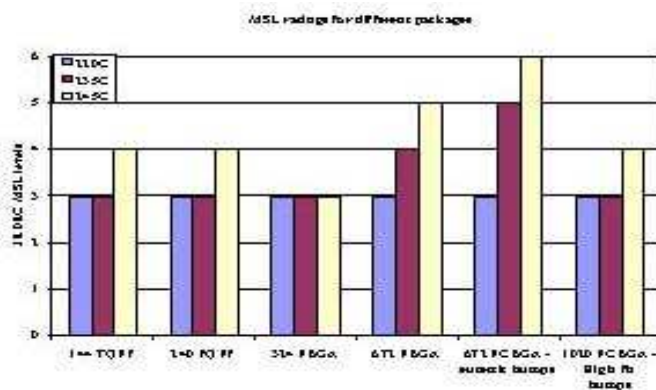
こうした提案と指令に基づいて、アルテラはサプライヤと連携して、鉛フリー化パッケージ・ソリューションの提供に積極的に取り組んできました。鉛フリーの仕上げとしていくつかの競合したオプションを利用できます。アセンブリ・サブコントラクターと連携して、アルテラは、リード付きパッケージには無光沢 Sn や Sn-2% Cu リード仕上げで、BGA パッケージには Sn-3-4%Ag-0.5%Cu はんだボールでパッケージを評価してきました。代替の可能性がある仕上げとして、プリ・メッキ Ni/Pd 仕上げに関する追加の評価も推し進めています。リード付きパッケージの場合は、12 ミクロン厚の Sn または Sn-2% Cu メッキが標準のリード・フレームに使用されます。リード仕上げの変更のほかに、鉛フリーのはんだペーストを用いた基板のアセンブルに必要とされる程度の高いリフロー温度を許容できる適切な材料とプロセスを選ぶことで耐熱性が改善されました。

収集されたデータでは、プロセスや材料の変更により、アルテラ提供のほとんどのデバイスをアセンブルできる技術的能力が証明されています。テスト対象の一部デバイスは、特有の課題をもたらす大型のダイ・サイズでした。標準的なアルテラ・デバイスのダイ・サイズは大型なので、アセンブリ現場で利用できるアセンブリ・プロセスおよび材料戦略には移植が容易ではないものもありました。信頼性を向上させるためのプロセスの変更や新材料の採用などのさまざまなアプローチによって、製品の鉛フリー・リフロー温度に対する信頼性が向上しました。

吸湿レベル (MSL) の検証

各吸湿レベル (MSL) で標準の JEDEC 表面実装シミュレーション・テストに従って、変更を一切加えずに標準 Sn-Pb 製品をテストしました。製品は、各リフロー・ピーク温度 (220°C、235°C、245°C) でテストしました。ほぼすべての製品が 220°C で MSL3 に適合していますが、大型の製品の一部は 220°C より高い温度で MSL4 またはそれより悪いレベルになっています (図 1 参照)。

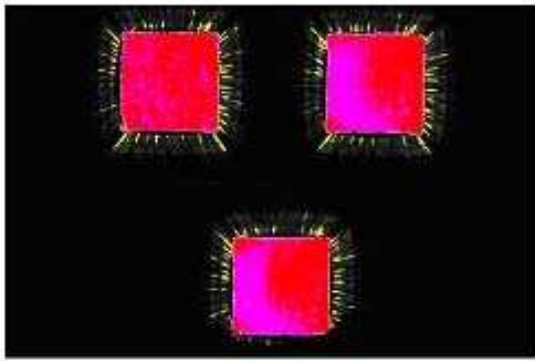
図 1. 各リフロー・ピーク温度で J-STD-020 に準拠してテストされた標準 Sn-Pb 製品の MSL 評価



245°Cのリフロー・ピーク温度の場合は、大型製品 (および大型ダイ・サイズ) のテストで、MSL 3 においてダイ表面の剥離が発生しました (図 2)。様々な程度の耐湿性の低下が各パッケージ・

タイプで観察されました。小型の TQFP、PQFP、および FBGA パッケージは、245°C のリフローの耐性を備えていました。

図2. 材料やプロセスが未変更の大型 QFP および FBGA パッケージで観察されたダイ表面の剥離



フリップ・チップ BGA (FCBGA) の場合は、はんだバンプ組成が共晶であるとアンダーフィルの剥離とはんだの染みが観察されました (図 3)。高融点はんだバンプが使用されている場合は、一辺が 35mm 以下の全製品では、245°C までアンダーフィルの剥離は観察されませんでした。図 3 では、共晶はんだバンプで組み立てられると、245°C のピーク・リフロー温度のプリコンディショニング後にアンダーフィルの剥離と、はんだの広がり/染みが観察されたことを示しています。

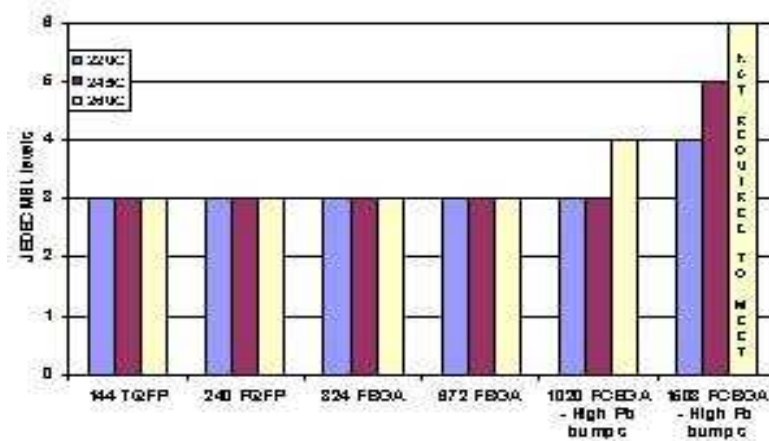
図3. 共晶はんだバンプで組み立てられた場合、245°C のプリコンディショニングリフロー・ピーク温度でアンダーフィルの剥離とはんだの広がり/染みが発生



生産性を向上するために、アルテラは全製品で MSL 3 定格を達成するつもりです。全製品で MSL 3 を獲得するためには、パッケージ・タイプごとにいくつかの変更が必要でした。パッケージ・タイプごとに、様々なアプローチを取ることも必要でした。各業界グループの要求基準では、製品サイズに応じて 245°C~260°C のリフロー・ピーク温度に対する製品の能力が求められています。

クワッド・フラット・パック (QFP) パッケージの場合は、新しいモールド・コンパウンドとダイ・アタッチ材料を使用して、層間剥離およびポップ・コーン現象によるパッケージ破損を回避する必要がありました。改善の一要因として、新しい材料ではより低い吸湿率が挙げられます。また、力学的なシミュレーション・モデルによると、こうした材料はリフロー温度範囲全体を通じて製品の反りを減少させるので、全ての接合面でストレスが低下します。(図4に示すように) 新しい材料の組み合わせにより、すべての TQFP および PQFP パッケージで JEDEC の MSL 定格 3 を達成することができます。いずれの場合も、標準のリード・フレームが使用されています。鉛フリーのメッキは、無光沢 Sn または Sn-2% Cu のどちらかでした。図4では、材料および組み立て工程フローを改善した場合の MSL 定格も示しています。大半の製品は、260°C のリフロー・ピーク温度に対して MSL 3 を適合しています。

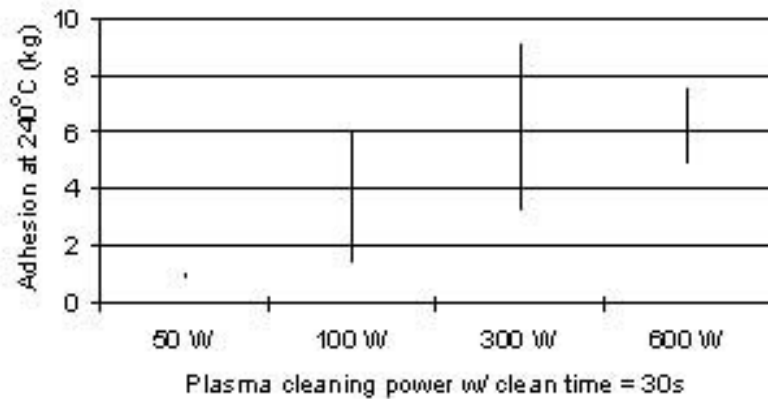
図4. 材料および組み立て工程フローを改善した場合の MSL 定格



いずれの FineLine BGA (FBGA) パッケージの場合も、標準の Sn/Pb 組み立て用モールド・コンパウンドおよびダイ・アタッチをわずかな変更で使用することができました。19mm 以下の FBGA パッケージでテストされた全てのデバイスは、245°C のリフロー温度に対して JEDEC の MSL 3 に適合しています。ただし、大型 FBGA パッケージおよび 245°C を超えるリフロー・ピーク温度の場合は、ダイ表面の剥離が観察され、追加変更が必要でした。全デバイスは、ダイ表面にポリアミドがコーティングされました。ポリアミドのコーティングがない場合は、ダイ・サイズが超大型なので MSL 定格 3 の適合は不可能と思われる。ダイ表面へのモールド・コンパウンドの接着性を向上するために、2つのプロセスが変更されました。また、ダイ表面へのモールド・コンパウンドの接着性を向上するために、最適化されたプリ・モールド・ベーキング工程とダイ表面のプラズマ・クリーニング工程が追加されました。良い接着性を確実にするために表面の粗さを最適化する必要があると考えられます(図5)。これらの改善により、アルテラの全ての FBGA パッケージ・デバイスが JEDEC の MSL 定格 3 を実現しました。AUS5 はんだマスクは、鉛フリー・パッケージに求められるリフロー・ピーク温度に対応しないことを示す報告が文献で発表されています。このため、AUS5、AUS303、および AUS308 はんだマスク付きサブストレートを検証しました。テストでは、テスト対象のどの組み合わせにも、はんだマスクに関連した不具合は観察されませんでした。図5は、一定時間のプラズマ・クリーニング・パワーに応じてポリイミド・コーティング

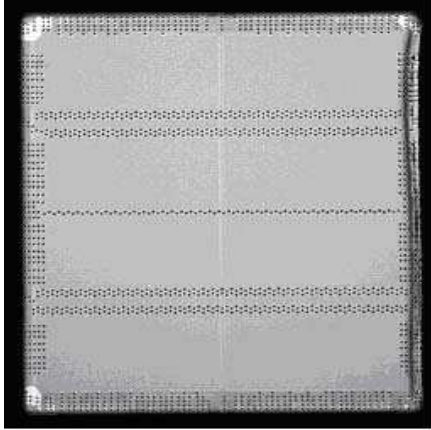
付きの粗いダイ表面に対するモールド・コンパウンドの密着性の向上を示すサブコントラクタのデータです。

図5. モールド・コンパウンドの密着性の向上を示すサブコントラクタのデータ



フリップ・チップ BGA (FC-BGA) は、JEDEC の MSL-3 を達成するのが極めて困難なパッケージです。たとえプリコンディショニング後に不具合が観察されない場合でも、こうした製品は温度サイクル条件 B の 500 サイクル後でしばしば不良となりました。典型的な不具合モードは、ダイのコーナーにおけるアンダーフィルの剥離でした (図 6)。6000 以上のはんだバンプを備える 20mm 以上のダイ・サイズを使用すると、さらに別の問題が発生します。製品のコプラナリティを製造可能なレベル内に維持しながら、MSL の要求基準を満たすには、材料を適切に選択する必要があります。当初のテストでは、225°C を超えるリフロー温度では共晶の Sn/Pb はんだバンプを使用できないことが明らかでした。リフロー温度におけるアンダーフィルの静水圧により、溶解した共晶はんだがダイ表面に沿って広がってしまいます。この問題は非常に重大で、製品は乾燥状態でのみリフローに耐えることができます。こうした理由により、アルテラは全製品に高融点のはんだと共晶プリ・ソルダを採用することにしました。バンプの全体の組成は、はんだバンプ接合において 85% を超える鉛は当面の間免除されるというヨーロッパの要件に適合しています。高融点のはんだは柔らかいので、はんだバンプ接合部の引張負荷を最低限に抑える必要があります。そうしなければ、繰り返しの負荷により、高融点のはんだと共晶 Sn/Pb の接合面でポンピング効果が発生し、ボイドやはんだ接合オープンを引き起こします。図 6 は、古い部品表の大型ダイのフリップ・チップに観察されるダイのコーナーでの剥離を示しています。この不具合モードは、220°C および 245°C のリフローの両方で観察されました。

図 6. 古い部品表で大型のダイ・フリップ・チップに観察されるダイ・コーナでの剥離



はんだ接合部の引張応力および剪断応力を最小限に抑えるために、アンダーフィル、サーマル・コンパウンド、およびリッド・アタッチ接着剤に新たな材料を選択しました。また、シミュレーション・モデルを使って、最適な材料特性を確認しました。外部だけの鉛フリー・フリップ・チップを構成するために選ばれた材料により、ほとんどの FC-BGA は JEDEC の MSL3 に適合できるでしょう。現時点で、超大型のダイ（一辺 23mm）およびパッケージ・サイズ（本体 40mm）に対しては改善しても、245°C で JEDEC の MSL 5A を達成するにすぎません。

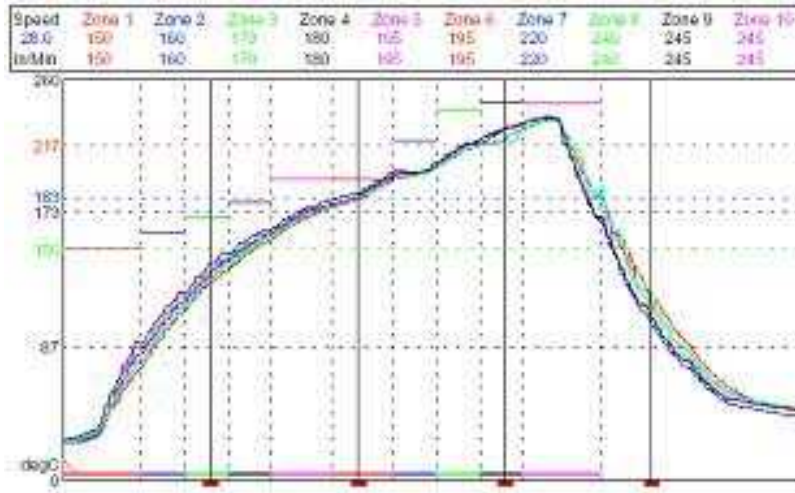
260°C のリフロー・ピーク温度は必要？

標準の製品レベル・テストに加えて、はんだ接合の信頼性を検証するために、パッケージ・タイプごとの製品がプリント回路基板に実装されました。これらのデバイスは、10 ズーンのリフロー・オープンを使用してソレクトロン社（Solectron Corporation）においてプリント回路基板に実装されました。リフロー・プロセスの間、このオープンを窒素でパージしました。リフロー・プロファイルは、デバイスごとに最適化されました。Kester 256-LF、Alkaline no-clean flux が、3 つ全てのデバイスの実装に使用されました。製品を実装可能な最低温度を推定するために、製品は窒素のある環境および窒素のない環境で実装されました。図 7 では、代表的なリフロー・プロファイルを示しています。図 7 のリフロー・プロファイルは、780 ピン FC-BGA パッケージの表面実装に用いられます。

- リフロー・ピーク温度は 236°C
- デバイスは大気中で実装
- 融点を超える時間は 70 秒

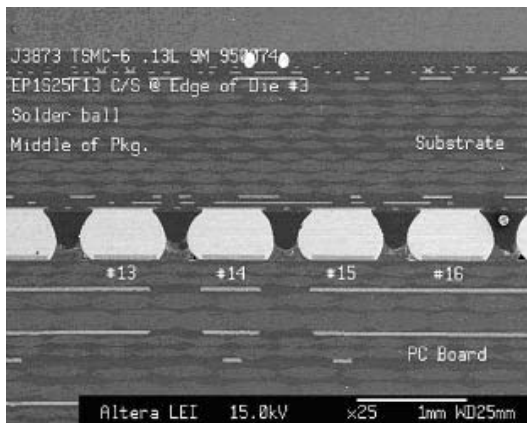
はんだ接合を示す断面図も、図 8 に示されています。標準の基板アセンブリのほかに、鉛フリー製品用のリワーク用アセンブリも研究しました。この研究結果については、米国サンディエゴで開催される APEX-2004 ミーティングで発表されます[1]。大型製品の基板アセンブリに必要なピーク温度は、大気中での実装でも 235°C という低い温度が可能です。

図 7. 780 ピン FC-BGA パッケージの表面実装用のリフロー・プロファイル



はんだ接合の断面図は、図 8 に示されています。この断面図により、大型製品は 235°C という低い温度で実装できることが明らかです。大型基板全面にわたって約 15°C の変動を想定しても、基板上のどの場所にも 250°C を超えないピーク温度で各種製品を実装することができます。全製品に 260°C でリフローすることを要求するのは、製品サプライヤに不要で多大な負担をかけることになると思われます。図 8 は、780 ピン FCBGA デバイスの断面図で、235°C のリフロー・ピーク温度における鉛フリーはんだ接合の良いつづれ方を示しています。

図 8. 鉛フリーはんだ接合を示す 780 ピン FCBGA デバイスの断面図



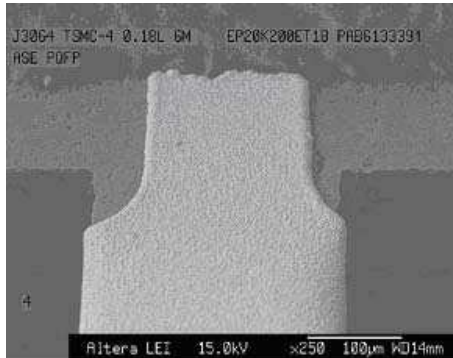
リード付きパッケージのウイスカ成長

「錫のウイスカ」と呼ばれる単結晶構造の自然成長が起きやすい純錫仕上げに関するレポートがいくつか発表されています。この錫のウイスカにより、特性のずれから突発的な回路短絡にわたる電気的な不具合を引き起こします。錫のウイスカ現象は数十年にわたって報告され、研究されてきましたが、特に機器が使用前に長期間保管されていた場合は、いまだに信頼性の阻害要因となります。こうしたウイスカの成長を加速する信頼性試験を考案する試みがいくつかなされてきましたが、今のところ、どの結果も特定のメッキ・プロセスにのみ適用可能と思われる。錫のウイスカの成長を加速するテスト方法がないので、長期間室温で保管された製品を観察して、錫のウイスカの成長現象を検証することにしました。5個の製品を組み立て後、30日、180日、および450日間保管した後の観察を行ないました。室温状態で保管された製品を検査しただけでなく、信頼性試験（プリコンディショニング、高湿バイアス、およびオートクレーブ）の終了後の5個の製品も検査しました。いずれの場合も、20本のリードを20X、100X、および250Xの倍率で観察しました。無光沢SnおよびSn-2%Cu仕上げリードの画像を図9および図10にそれぞれ示します。これらの画像は、450日間、室温で保管されたデバイスの画像です。メッキの厚さは、両仕上げとも12ミクロンでした。どの場合もウイスカの成長が観察されませんでした。この観察から、メッキ工程、リード・フレーム材料、およびメッキ厚を調整することにより、錫のウイスカを排除できると思われる。図9では、450日保管したサンプルを示しています。粒子が粗いので、仕上げが無光沢に見えます。ウイスカは観察されませんでした。

図9. PQFP デバイスの無光沢Sn仕上げリードの高倍率画像



図10. 450 日間保管されたPQFP デバイスのSn-2%Cu 仕上げリードの高倍率画像



鉛フリー・リフロー条件での製品の反り

製品の反りは、超大型 BGA 製品の製造性に重大な影響を及ぼします。Shook ら [2] が発表した論文では、侵入した湿気があるままでテストをした場合、侵入した湿気により反りがさらに増大することが示されました。アルテラの場合は、全ての大型 BGA でフリップ・チップ接続を採用しています。アルテラでは、パッケージを湿気にさらした大型フリップ・チップ・デバイスと湿気にさらしていない大型フリップ・チップ・デバイスの反りの挙動を研究してきました。FC-BGA は通常、室温で最も反り、リフロー温度で平らになる傾向があります。乾燥したデバイスと吸湿したデバイスでは、室温で測定された反りに約 10% の差が観察されました。リフロー温度では、吸湿デバイスの場合、この反りが継続的に増大しました。その後の C-SAM 解析では、パッケージに剥離は見られませんでした。また、製品はベーキング時に反りが減少し、乾燥した製品と区別できませんでした。アルテラの観察は、Shook らが行った観察と一致しています。ただし、反りは、8mil というアルテラ社内規格を超えませんでした。乾燥したデバイスおよび吸湿させたデバイスの室温とリフロー・ピーク温度での反りの測定値が、図 11 および図 12 に示されています。これらの測定値は、33mm パッケージで観察されました。同様の結果が、27mm ワイヤ接続 FBGA パッケージで観察されました。

図 11 は、30°C および 60% の RH (相対湿度) で 192 時間吸湿した後の、33mm パッケージの反り測定値を示しています。5.6mil の最大反りは、室温で観察されました (上)。リフロー条件下では、反りは ~2mil で安定していました (下)。剥離は観察されませんでした。

図 11. 30°Cおよび60%のRH（相対湿度）で192時間吸湿後の、33mmパッケージの反り測定値

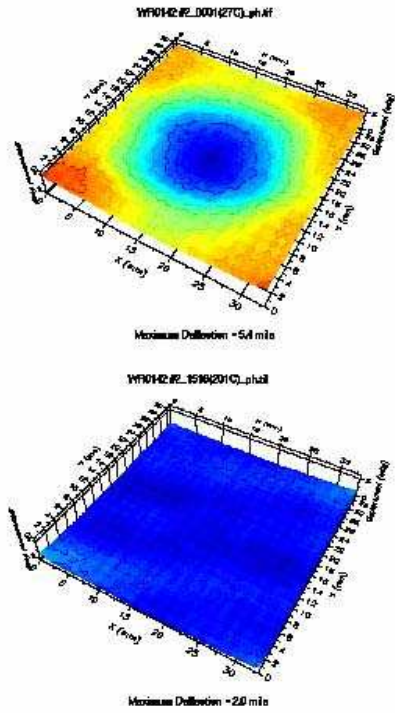
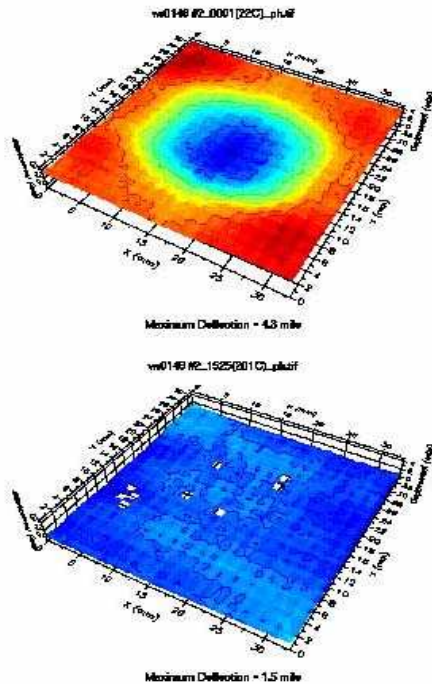


図 12 は、乾燥状態での 33mm パッケージの反り測定値を示しています。4.3 mil の最大反りが室温で観察されました（上）。リフロー状態では反りは～1,5mil で安定していました（下）。

図12. 乾燥状態における33 mm パッケージの反り測定値



まとめ

数年間にわたる鉛フリーの研究により、エレクトロニクス業界にはPb-Snはんだを置き換えるための即効性のあるソリューションはないと結論付けられました。ただし、この業界では、はんだボール用に共晶Sn-Ag-Cuを、リード仕上げ用には無光沢SnまたはSn-2%Cuを使用することを受け入れました。アルテラではこれらの仕上げの製品をテストして、ほとんどの製品が高い信頼性のもとに製造され、かつ基板に実装できることを確認しました。また、製品の組み立て工程および材料を適切に変更することにより、信頼性の高いTQFP、PQFP、FBGA、およびFC-BGAパッケージ・ファミリの製造が可能であることが示されました。さらに、260°Cというリフロー温度要件は過大で、250°Cのリフロー・ピーク温度を超えないで基板への実装とリワークが可能であることも示されました。また、大型フリップ・チップBGAの反りに関する研究では、湿気の侵入は製品の耐湿定格の決定に影響を及ぼすことも示しています。

謝辞

コンポーネント・アセンブリ・サブコントラクターとともにプロセスおよび材料の改善を調整していただいたことに対し、アルテラのパッケージ開発グループのAlbert Puah氏、Don Fritz氏、およびYuan Li氏に謝辞を述べたいと思います。また、反りの測定結果を提供していただき、Toan Do氏にも感謝いたします。

最後に、基板への実装と、鉛フリー製品の 2nd レベル信頼性に関する議論への支援に対して、ソレクトロン社の Jasbir Bath 氏と Samson Lam 氏、および Sam Yoon 氏に感謝いたします。

参考文献

1. *Board Assembly and Rework of Large Flip-Chip Ball Grid Array Devices*, Sam Yoon et al, Apex-2004 to be published
2. *Impact of Ingressed Moisture and High Temperature Warpage Behavior on the Robust Assembly Capability for Large Body PBGAs*, R. L. Shook et al., pp1823, ECTC-2003, May 27-30, 2003, New Orleans.

図一覧

- 図 1. 各リフロー・ピーク温度で J-STD-020 に準拠してテストされた標準 Sn-Pb 製品の MSL 評価
- 図 2. 材料やプロセスが未変更の大型 QFP および FBGA パッケージで観察されたダイ表面の剥離
- 図 3. 共晶はんだバンプで組み立てられた場合、245°C のプリコンディショニング・リフロー・ピーク温度でアンダーフィルの剥離とはんだの広がり/染みが発生
- 図 4. 材料および組み立て工程フローを改善した場合の MSL 定格
- 図 5. モールド・コンパウンドの密着性の向上を示すサブコントラクタのデータ
- 図 6. 古い部品表で大型ダイのフリップ・チップに観察される、ダイ・コーナーでの剥離
- 図 7. 780 ピン FC-BGA パッケージの表面実装用のリフロー・プロファイル
- 図 8. 鉛フリーはんだ接合を示す 780 ピン FCBGA デバイスの断面図
- 図 9. PQFP デバイスの無光沢 Sn 仕上げリードの高倍率画像
- 図 10. 450 日間保管された PQFP デバイスの Sn-2%Cu 仕上げリードの高倍率画像
- 図 11. 30°C および 60% の RH (相対湿度) で 192 時間吸湿後の 33mm パッケージの反り測定値
- 図 12. 乾燥状態における 33mm パッケージの反り測定値