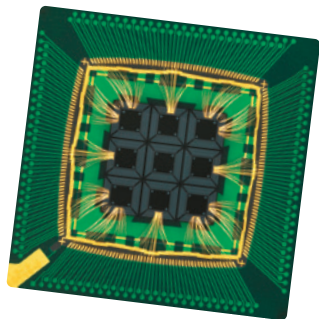




# マイクロエレクトロニクス製品の微細構造検査用試料作製

**Struers**  
Ensuring Certainty

## アプリケーションノート

過去25年以上にわたり、電子機器の開発と製造技術は絶え間ない急速な進歩を経験してきました。以前の電子機器と消費財は大型でかさばり、大きなプリント回路基板でそれぞれ配線された部品を搭載していました。現在の電子機器の携帯性は小型化に対する要求を根拠にしています。コンピュータ、携帯電話、カメラは小さくなる一方で、多数の機能を搭載するようになっていきます。部品の小型化は、中枢部品としての集積回路(IC)を含む、マイクロエレクトロニクス製品の開発によって可能になりました。ICは電子回路の基本要素としての個別の電子部品(抵抗、コンデンサ、トランジスタなど)に対する要求を低減しました。配線される回路と比較した場合のICの利点は、サイズと重量の大幅な削減、信頼性の向上、費用の削減、回路性能の改善です。

集積回路は通常シリコンから製造される半導体材料の単独の微細薄片内部で完全な電子回路を構成するトランジ

スタ、ダイオードなどの能動素子と抵抗、コンデンサなどの受動素子を集約(集積)しています。(図1と2)。この素子はチップと呼ばれます。チップは多数のトランジスタ、コンデンサ、その他の電気素子の機能を実装し、全てが複雑な回路の課題を実施するために相互配線されています。チップを相互配線する設計と製造は、実装と呼ばれます(下記を参照)。これらのチップを使用した部品は、電子ユニットに差し込むプリント回路基板に実装されます(図3)。

部品は大量生産されるため、その品質管理は通常、欠陥部品を検出するための熱サイクル試験に限定されます。しかしながら、チップを使用した部品の開発、設計、不具合分析にはマイクロビア、亀裂、ポイド、導電層、接続部などを観察するために部品の金属組織学的な横断面が必要です。また、金属組織学は製造時の異なる段階の抜き打ち検査にも利用されます。これらの部品は非常に小さいため、これらの金属組織学的試料の準備と観察に必要な精度を確保するためには特殊な手法と装置が必要です。

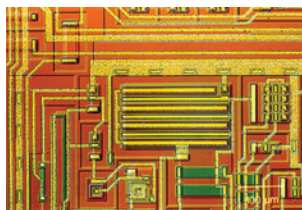


図1:中心に伝導リード、トランジスタ、抵抗、ビア、コンデンサを含むリニア集積回路の詳細

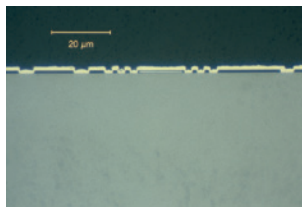
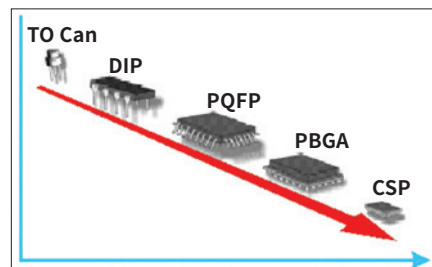


図2:ICの伝導リードを含むシリコンウエハの横断面



IC実装の進化。提供:テッセラ

### 微細構造検査用試料作製時の課題

微細構造検査のためにマイクロエレクトロニクス製品を準備することの主要な課題は、小さな試料形状です。微細で複雑なICは、試料準備に関する最大の課題を提供します。試料準備工程時には、3次元側面を考慮する必要があるだけでなく、代表的な結果を達成するには時間、精度、忍耐が必要になります。以下に試料準備時に発生する一般的な課題のいくつかを示します:

**切断:**ウエハ、ガラス、セラミックのチップング、クラッキング

**埋込み:**機械的変形と熱損傷

**研磨:**ガラス繊維やセラミックなどの脆性構成要素の破壊(図4)。

**琢磨:**軟性層のスミアリング。部品内の材料硬度の相違による浮き彫り(図5)。ハンダ内に残るシリコンカーバイドとダイヤモンド粒子(図6)。

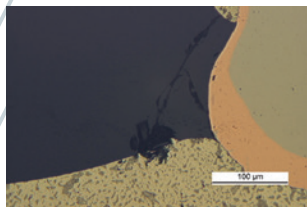


図4:粗研磨SiCフォイル/ペーパーによって生じたガラスダイオードの亀裂と破壊損傷

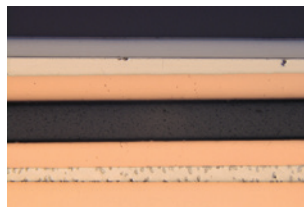


図5:異なる材料硬度の研磨による浮き彫り

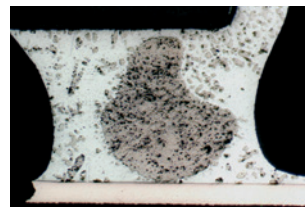


図6:ハンダ内のダイヤモンド粒子の浮き彫り

### ソリューション:

対象まで迅速に切断、研磨、琢磨するための特殊工具と自動装置の使用。冷間埋込みの使用。剛体円板上のダイヤモンドと硬質研磨布による精研磨と琢磨。

# マイクロエレクトロニクス製品の製造工程と応用

チップを使用した部品の製造は、新しい部品のコンセプトから最終製品までの作業をカバーする幾つかの専門的な製造業者を伴い、重複する要素もある非常に複雑な工程です。チップを使用した部品の基本的な製造手順を以下で簡単に説明します：

## 設計

電子機器の製造者が新製品の製造を決定する場合、その装置の必要な機能と特長を実現するマイクロ電子部品が必要になります。新しい部品の製造には、実装設計の選択の一部であるチップデザインが含まれます。製造者は部品の自社内での設計、または専門のデザインハウスやチップメーカーへの外部発注のいずれかを実施することが可能です。

## 試作品の作成

通常、新しい部品が望み通りの特性を備えているかを確認するために、多数の試作品が製造、試験されます。この段階では、多数の横断面が金属組織学的に加工、評価されなければならないため、金属組織学が重要な役割を果たします。これらの微細構造検査は、装置の製造者、チップの製造者、パッケージングハウスが行えます。

## チップの製造

製造はチップの設計に基づいて、チップファウンドリーまたは「ファブ」によって行われます。チップの基本的な材料は、(通常、シリコンの)単結晶から切り出されるウエハです。

## 実装

チップが機能するためには、相互配線され、組み立てられなければなりません。これらの相互配線の設計と製造は、実装と呼ばれます。電線、溶剤ボール、導電層を使用した相互配線は、製造工程の最後にプラスチックやセラミックで覆われます。ウエハは単一のダイスに切り出され、様々な方法で実装されます(図7)。ワイヤボンディングとボールグリッドアレイ(BGA)という2つの主要な相互配線技術があります。極度のコンパクト性のために、チップとPCBの直接相互配線であるフリップチップ技術が利用される場合があります。

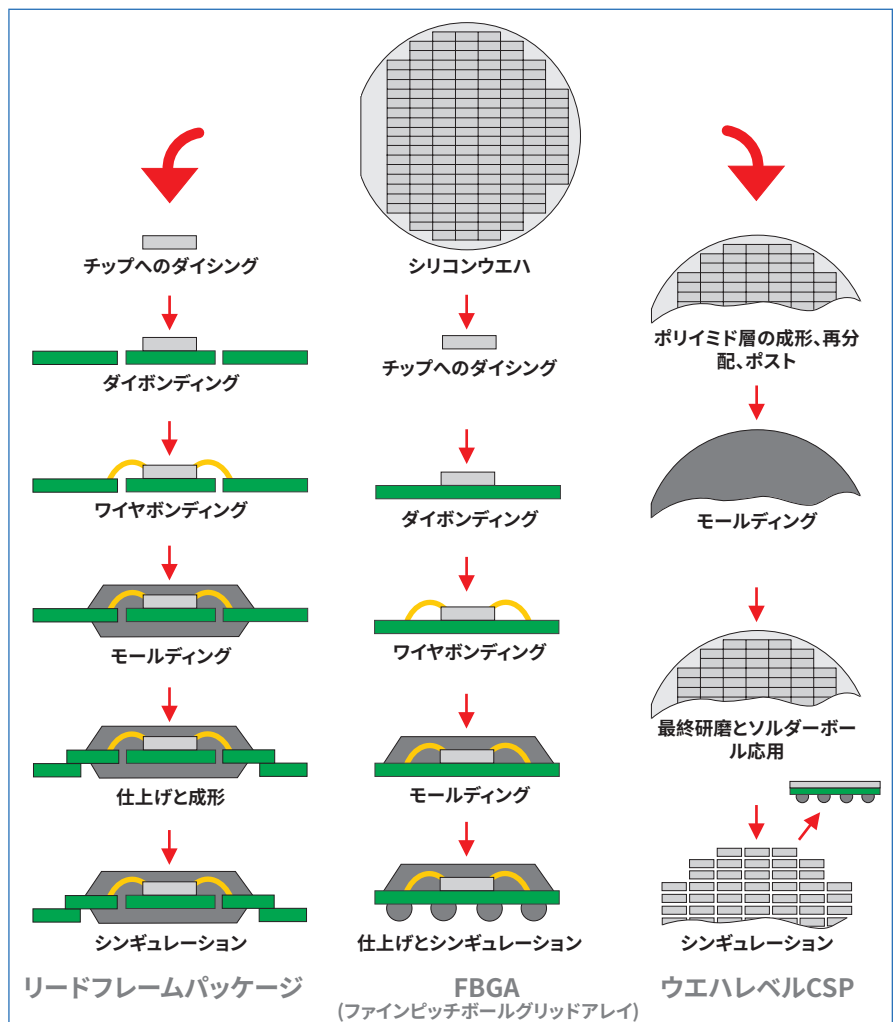


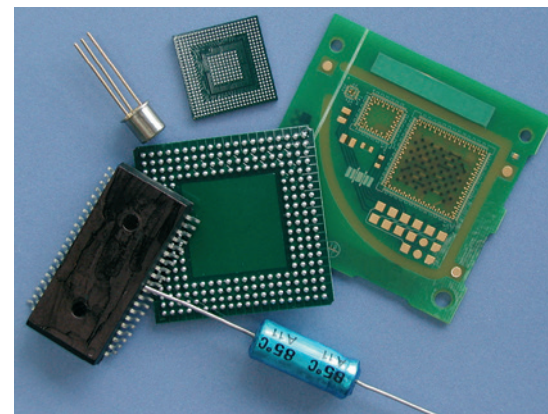
図7:異なるチップ実装方法

## 試験

この製造工程の段階では、熱サイクルを使用した大規模な品質管理が行われます。これは故障した部品を選別するための最終試験です。

## アプリケーション

マイクロエレクトロニクスは通信、データ処理、消費財などの幅広い製品に利用されています。例えば、車にはコンピュータ150台と同数のコンピュータが搭載されています。しかしながら、マイクロエレクトロニクス製品は従来の応用分野以外で使用されることが増えており、各製品に搭載された超薄型フレキシブルチップを使用した、スーパーでの野菜の自動スキャンを含む、新たな応用が絶えず追加されています。



様々なマイクロ部品



各製品に搭載された超薄型フレキシブルチップを使用した、スーパーでの野菜の自動スキャンを含む、新たな応用が絶えず追加されています

# マイクロエレクトロニクス製品の試料準備における課題

与えられた試料に関する微細構造検査の主要な要件の一つは、実装内部の特定の領域を観察することです。対象が現れ、琢磨準備ができるまで「研磨して観察」の手作業による手法には、非常に時間がかかります。不具合分析の調査において、対象を逃すことは、唯一または貴重な試料を失うことを意味します。

ガラス、セラミック、金属、ポリマなど大きく異なる特性を備えた様々な材料がマイクロ電子部品内部で一緒に実装されます(図8)。これらの材料の様々な組み合わせには、これらの材料の各特性を明らかにする一方で金属、ポリマのスキミングなどの人工的傷やガラス、セラミックの破損を生じさせない準備が必要です。マイクロエレクトロニクス製品の検査には準備によって生じる人工的傷が間違った結論の原因となる様々な種類の評価が含まれるため、このことが特に重要です。以下の点検項目の幾つかが実施されます：

ボイド、含有物、亀裂などの欠陥のサイズと分布(図9)。  
材料の結合と付着、その境界面。  
層の厚さ、ワイヤ、ハンダメニスカスなど実装内の異なる部分の寸法と形状。  
セラミック内の多孔性と亀裂。  
様々な材料の間にある非常に薄い層が高い倍率で検査されなければならない場合が多いため、平坦度とエッジ保持が特に重要です(図10aとb)。

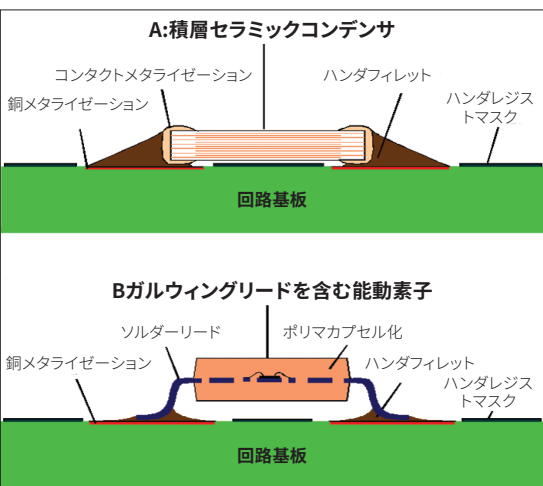


図8: マイクロ電子部品における材料構成の例

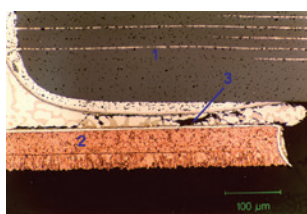
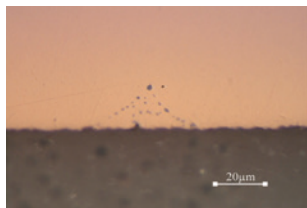
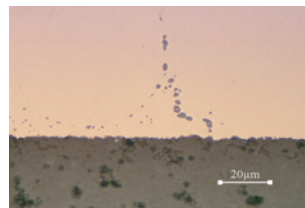


図9: 回路基板(2)の銅メタライゼーションにハンダ付けされた積層コンデンサ(1)。ハンダを通して連続的に広がる疲労亀裂(3)



10 A



10 b

図10 aとb: 平坦度の相違を高倍率で示す銅を含むセラミック:  
a) シリコンカーバイドフォイル/ペーパーを使用した最初の精研磨  
b) MD-ラルゴ精研磨円板を使用した最初の精研磨

## 推奨事項

マイクロエレクトロニクス製品に対する微細構造検査検査の大多数は、横断面に対して行われます。上述の手順は横断面に適しています。しかしながら、特殊な検査には平行断面が必要な場合がありますが、推奨事項の多くがそれに対して有効です。

上述したようにマイクロ電子部品の横断面の主要な目標の一つは、部品内の特定の対象エリアを明らかにすることです。切断と研磨の各工程中に材料を除去する場合、細心の注意が必要です。両方に対して、幾つかの手法が利用可能です。以下に幾つかの手法、半自動、自動の各手順を説明します。自動化の度合いは対象に達する成功率を向上させます。

**切断:** 調査する試料の種類に合わせて様々な精密切断機で切断を行えます。例えば、携帯電話や部品が搭載された基板の場合、中型機械で簡単に横断面を作成できます。オペレータはセコトム-1と同様に手動で切断ホイールを介して素子を押込みます。プラスチック切断には電気めつきダイヤモンドホイール(E1D20)または樹脂接合ダイヤモンドホイール(B0D20)が推奨されます。より大型の部品を切断する場合、セコトムが使用可能です(ここでは同じ種類の切断ホイールが使用されていますが、より精密な切断の場合、サイズは直径20 mmまたは15 mmのいずれかを使用できます)。個別の小型または脆性質の横断面を作成する場合、アキュトムが推奨されます(より小型の切断ホイールが使用可能です)。



セコトム



アキュトム

部品または組み立て品のサイズや脆性に応じて、機械的な損傷を防止するために切断前に部品やパーツを保持することが必要な場合があります。

いずれの場合も、調査する実際の領域から十分離れた箇所を切断し、直接的な損傷を与えないようにします。その後、残りの材料を横断面の作成後に慎重に研磨可能です。この最初の手順をより慎重に行うことにより、セラミック、チップ、ガラスへの亀裂の発生や、層またはハンダスポットの層間剥離の原因を低減できます。

**埋込み:** マイクロ電子部品はその複合的、脆性的な特性から、熱間圧縮埋込みに適していないため、必ず冷間埋込みされます。熱はハンダやポリマに影響を与えるだけでなく、樹脂の高い収縮率がシリコンウエハに亀裂を発生させる可能性があるため、高い硬化温度を発生させる冷間埋込み用樹脂は推奨されません。使用する分析方法によって、埋込み方法も異なります。光学顕微鏡向けの通常の埋込みでは、透明エポキシ樹脂が使用されます(プロントフィックス、エポフィックス、スペシフィックス-20)。ボイドおよび穴を埋める必要がある場合は、真空含浸がお勧めです。蛍光染料(エポダイ)とエポキシの混合は、光学顕微鏡でロングパスブルーやショートパスオレンジフィルタを使用した場合にボイドと亀裂の卓越したコントラストを与えます。極小のビアの場合は、穴に流れ込みやすい低粘性の透明樹脂が適しています。Struersターゲットシステムを使用した場合、部品を直接、対象準備に使用される特殊サンプル支持体に埋込みできます(右を参照)。

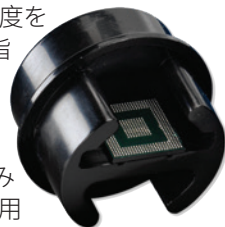


表1  
直径30 mmの実装されたマイクロ  
電子部品の準備方法

研磨・琢磨

部品のサイズや準備される試料数に応じて、平行断面と横断面の両方に対して手動、半自動、自動の研磨・琢磨方法を使用できます。粗粒研磨材による面出しは原則として脆性材料を損傷させ、軟性材料に深刻な変形を発生させる可能性があるため、避ける必要があります(図4を参照)。卓越した平坦度のために、シリコンカーバイドフォイル/ペーパーでの研磨ではなく、剛体円板(MD-ラルゴ)上のダイヤモンドを使用した精研磨が推奨されます。その後の絹布でのダイヤモンド研磨が平坦度を非常に良好に保持します。軟性金属に研磨剤の粒子が埋込まれた場合、その粒子が取り除かれるまでダイヤモンド研磨を延長する必要があります。浮き彫りを防止するために、コロイドシリカ(OP-Uノンドライ)を使用した仕上げ研磨は短時間にする必要があります。

手動・半自動のターゲット試料準備カプセル化されていないウエハとパッケージの手動準備の場合、手動の「研磨して観察」方法を使用したトライポッドが非常に有効な工具です。この方法の場合、30 μm～0.05 μmの範囲の粒径を持つ研磨剤フィルムがガラス板に埋込まれており、試料は手動で研磨、琢磨されます。シリコンカーバイドフォイル/研磨紙を使用した手動と半自動制御の材料除去と対象準備の場合、アキュストップとアキュストップ-Tが埋込み済みまたは未埋込みのマイクロ電子部品に対応した特殊な試料ホルダです。アキュストップ-Tには、例として全てのソルダーボールの列を一度に同じ平面まで研磨できるように対象の位置調整を可能にする傾斜機能があります。

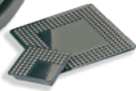
トライポッド



試料ホルダプレート内のアキュストップ



アキュストップ-T



研磨

シリコンカーバイドフォイル/ペーパー#320、#500、#1000に接触して対象付近までアキュストップを使用した手動または半自動の研磨後、試料はダイヤモンドを使用した精研磨・琢磨のために自動装置に挿入されます。

| 工程 |          | FG             |        |  |
|----|----------|----------------|--------|--|
|    | 作業面      | MD-ラルゴ         |        |  |
|    | 砥粒       | 種類             | ダイヤモンド |  |
|    |          | サイズ            | 9 μm   |  |
|    | 懸濁液/潤滑剤  | ダイヤプロアレグロ/ラルゴ9 |        |  |
|    | rpm      | 150            |        |  |
|    | 荷重[N]/試料 | 30             |        |  |
|    | 時間(分)    | 4              |        |  |

研磨

| 手順 |          | DP 1       | DP 2       | OP*                 |
|----|----------|------------|------------|---------------------|
|    | 作業面      | MD-Dac     | MD-Nap     | MD-Chem             |
|    | 砥粒       | 種類         | ダイヤモンド     | シリカ                 |
|    |          | サイズ        | 3 μm       | 1 μm                |
|    | 懸濁液/潤滑剤  | "ダイヤプロダック3 | ダイヤプロナップR1 | OP-Uノンドライ/OP-Sノンドライ |
|    | rpm      | 150        | 150        | 150                 |
|    | 荷重[N]/試料 | 20         | 20         | 15                  |
|    | 時間(分)    | 3          | 1          | 0.5                 |

\* オプションの工程

幾つかの試料がアキュストップを使用し、手動または半自動で対象前の約50 μmまで研磨された後、試料は個別試料としての精研磨・琢磨のために、アキュストップから取り除かれ、半自動機械に搬送されます。表1はテグラミンでの個別試料の半自動精研磨と琢磨に適した準備方法を示します。



ターゲットシステム

自動ターゲット試料準備

自動制御された材料除去と準備のために、Struersターゲットシステムは、準備前のサンプルの位置調整と測定を提供しています。埋込みされた、または埋込みされていない試料の横断面と平行断面は、可視または不可視の対象まで研磨・琢磨できます。レーザー測定システムは±5 μmの精度を保証し、除去率は試料準備工程中に自動的に再計算されます。



図11:可視対象の位置調整と測定に対応したターゲット-Zビデオ

| 研磨         |              |                |                    |                         |
|------------|--------------|----------------|--------------------|-------------------------|
| 手順         |              | PG             | FG                 |                         |
|            | 作業面          | ダイヤモンドパッド      | MD-Sat             |                         |
|            | 砥粒           | 種類             | SiC                | ダイヤモンド                  |
|            |              | サイズ            | #320               | 9 μm                    |
|            | 懸濁液/潤滑剤      | 冷却水            | ダイアブロ<br>アレグロ/ラルゴ9 |                         |
|            | rpm          | 300            | 150                |                         |
|            | 荷重[N]/試料     | 35             | 40                 |                         |
|            | 除去(μm) 時間(分) | システムによって算出     | 20 μm              |                         |
| 研磨         |              |                |                    |                         |
| 手順         |              | DP 1           | DP 2               | OP*                     |
|            | 作業面          | MD-Dac         | MD-Nap             | MD-Chem                 |
|            | 砥粒           | 種類             | ダイヤモンド             | シリカ                     |
|            |              | サイズ            | 3 μm               | 1 μm                    |
|            | 懸濁液/潤滑剤      | "ダイアブロ<br>ダック3 | ダイアブロ<br>ナップR1     | OP-Uノンドライ/<br>OP-Sノンドライ |
|            | rpm          | 150            | 150                | 150                     |
|            | 荷重[N]/試料     | 25             | 20                 | 10                      |
|            | 除去(μm) 時間(分) | 15 μm          | 1                  | 0.5                     |
| * オプションの手順 |              |                |                    |                         |

位置調整と測定は可視対象を含む試料の場合はビデオベース(図11と13)、不可視対象(図12)を含む試料の場合はX線ベースのいずれかで実施できます。その後、ターゲットシステムは除去される材料の量を事前に計算し、最終的な対象平面前の約35 μmで面出し手順を自動的に停止します。

精研磨手順は対象前の約15 μmまで試料を下降させ、2つの琢磨手順が試料の事前定義された対象面まで残っている材料を除去します(図14)。切断を含む準備工程全体には45～60分かかります。表2はマイクロ電子部品の自動対象準備に対するデータを示します。

表2:  
マイクロ電子部品の対象準備に対する準備方法

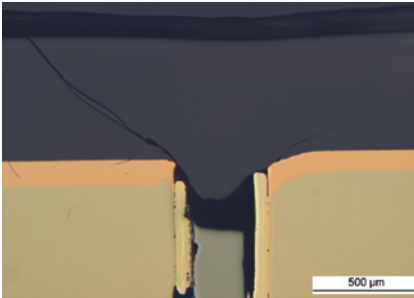
### エッチング

通常、部品内の様々な材料から反射される光の差異が、エッチングを不要にするほど、十分なコントラストを提供します。コロイドシリカによる仕上げ研磨は、特にOP-Uノンドライ懸濁液ではなく、OP-Sノンドライ懸濁液による仕上げ研磨手順が実施された場合、ハンダや銅をわずかに腐食します。OP-Sノンドライ懸濁液に少量の過酸化水素(3%)を添加すると、構造の確認に十分な程度まで、この腐食を十分に強調します。OP-Sノンドライの研磨手順に30秒以上要した場合、非常に急速にオーバーエッチングが発生する可能性があります。30秒後に試料を確認して、必要に応じて段階的に研磨を延長することが推奨されます。

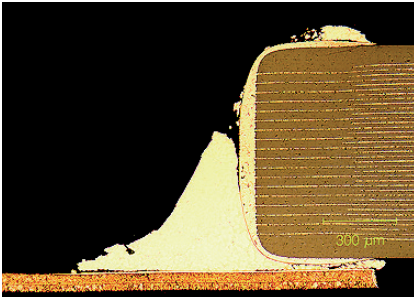
銅・銅合金用エッチング液:  
水 25 ml  
水酸化アンモニウム 25 ml  
過酸化水素(3%) 0.5 -10 ml

異なる照明手法を使用することで、構造のコントラストを強調することも可能です。セラミック内の亀裂を発見するためには、暗視野が有効です。また、微分干渉コントラストと偏光は、コントラストや特定の材料構造の色を改善し、より適

### マイクロ電子部品における通常の微細構造の例



ダイオード中の亀裂検知



ハンダ接続部に疲労亀裂を含む年数を経た積層セラミックコンデンサの断面

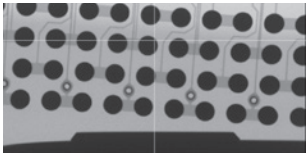


Fig. 12: X-ray of sample with hidden targets

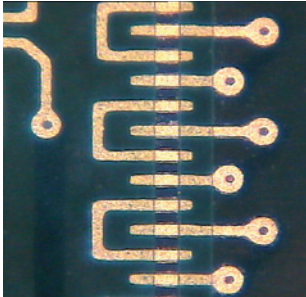


図13:ビデオを使用して表示された可視ターゲット試料

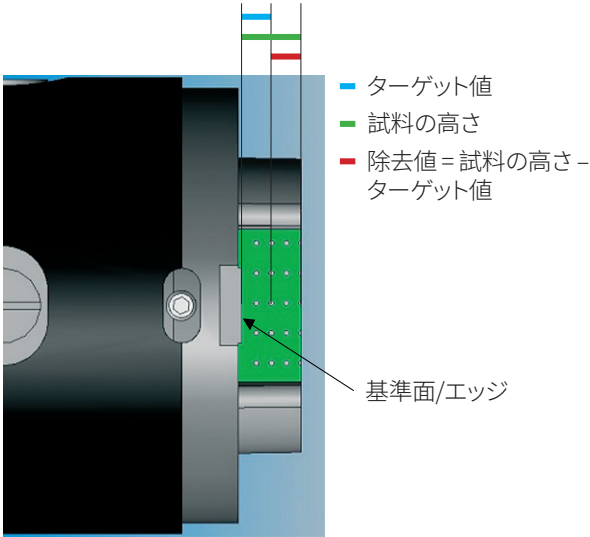
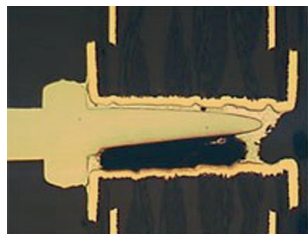
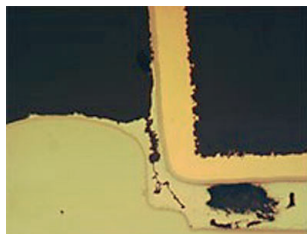


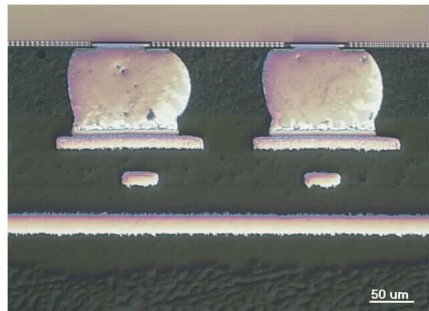
図14:自動的に測定、計算される距離を示す試料を保持しているホルダ



めっきスルーホール接続部のハンダにおける大型のボイド。50 x



めっきスルーホールのハンダ接続部におけるボイドと亀裂。200 x



ソルダーボールの横断面、DIC。

切な材料解明に貢献します。

## 概要

集積回路の開発によって可能になった電子機器の小型化は、電子回路の構成要素としての個別の電子部品に対する要求を低減しました。金属組織学もチップを使用した部品の設計、開発、故障解析の面で重要な役割を担っています。これらのマイクロエレクトロニクス製品に関する横断面の金属組織学的準備には時間がかかるだけでなく、部品内部の特定の対象を研磨・琢磨するには忍耐と技術が要求されます。加えて、金属、ガラス、セラミックなどの装置と部品内で使用される異なる材料が異なる特性を備えていることが、準備を困難なものにしています。特殊工具は、マイクロエレクトロニクス製品に関する手動と半自動の準備の改善に貢献します。自動対象準備の場合、Struersターゲットシステムが、対象までの迅速かつ非常に高精度な研磨・琢磨を提供します。硬質と軟質な層・材料との浮き彫りを防止するために、剛体円板でのダイヤモンド研磨と硬質布でのダイヤモンド琢磨が推奨されます。

## 用語解説

|         |                                                |
|---------|------------------------------------------------|
| BGA:    | Ball Grid Array (ボールグリッドアレイ)                   |
| CSP:    | Chip Scale Package (チップスケールパッケージ)              |
| DIP:    | Dual Inline Package (デュアルインラインパッケージ)           |
| FBGA:   | Fine-Pitch Ball Grid Array (ファインピッチボールグリッドアレイ) |
| IC:     | Integrated Circuit (集積回路)                      |
| PBGA:   | Plastic Ball Grid Array (プラスチックボールグリッドアレイ)     |
| PCB:    | Printed Circuit Board (プリント回路基板)               |
| PQFP:   | Plastic Quad Flat Package (プラスチッククアドフラットパッケージ) |
| TO Can: | Transistor Outline Canister (トランジスタアウトラインカニスタ) |

## アプリケーション ノート

マイクロエレクトロニクス製品の金属組織学的試料準備  
エリザベス・ワイトマン、アンネ・グエスニエル、ハンス・ブントガルト、Struers A/S, Copenhagen, Denmark

### 謝辞

図1、8、9。提供: F. W. ウルフ、T. アーレンス、Frauenhofer-Institut für Siliziumtechnologie, Quality and Reliability, D-25524, Itzehoe, Germany

図4、5、6、10 a+b。提供: カーチャ・ライター。マリオ・ライター、トーマス・アーレンス、Institute für Siliziumtechnologie, Modulintegration, D-25524, Itzehoe, Germany

### 参考文献

「Structure 32, 1998, Microstructure and material analysis for electronic packaging (ストラクチャ32、1998年、電子実装の微細構造と材料分析)」F. W. ウルフ、T. アーレンス、Frauenhofer-Institut für Siliziumtechnologie, Quality and Reliability, D-25524, Itzehoe, Germany

Structure 34, Special aspects of metallographic preparation of electronic and microelectronic devices (「ストラクチャ34、エレクトロニクスおよびマイクロエレクトロニクスデバイスの金属組織学的準備に関する特殊な側面」、カーチャ・ライター)。マリオ・ライター、トーマス・アーレンス、Institute für Siliziumtechnologie, Modulintegration, D-25524, Itzehoe, Germany

Struers Structure 28, 1995, Accurate, metallographic preparation of blind, buried and filled holes in printed circuit boards (「ストラス・ストラクチャ28、1995年、プリント回路基板のブラインドホール、ベリードホール、フィルドホールの金属組織学的準備」)。

「Struers Structure 13, 1986, Anschliffe an elektronischen Bauteilen und Komponenten」。

Struersの装置、アクセサリ、消耗品に関する詳細は、[www.struers.com](http://www.struers.com) を参照するか、または地域のStruersの代理店にご連絡ください。

