

3.1 故障解析とは

故障解析とは、報告された故障を確認し、電氣的測定および科学的な多くの解析技術を用いて故障モードあるいはメカニズムを明らかにすることです。

ここでは具体的な故障解析手法を紹介しますが、実際に解析作業を行う前に発生状況を十分に調査し、故障内容を的確に把握することが必要です。これによって最適な解析方法を決め、迅速な処理を行うことができます。

図3-1に故障解析の手順の一例を示します。

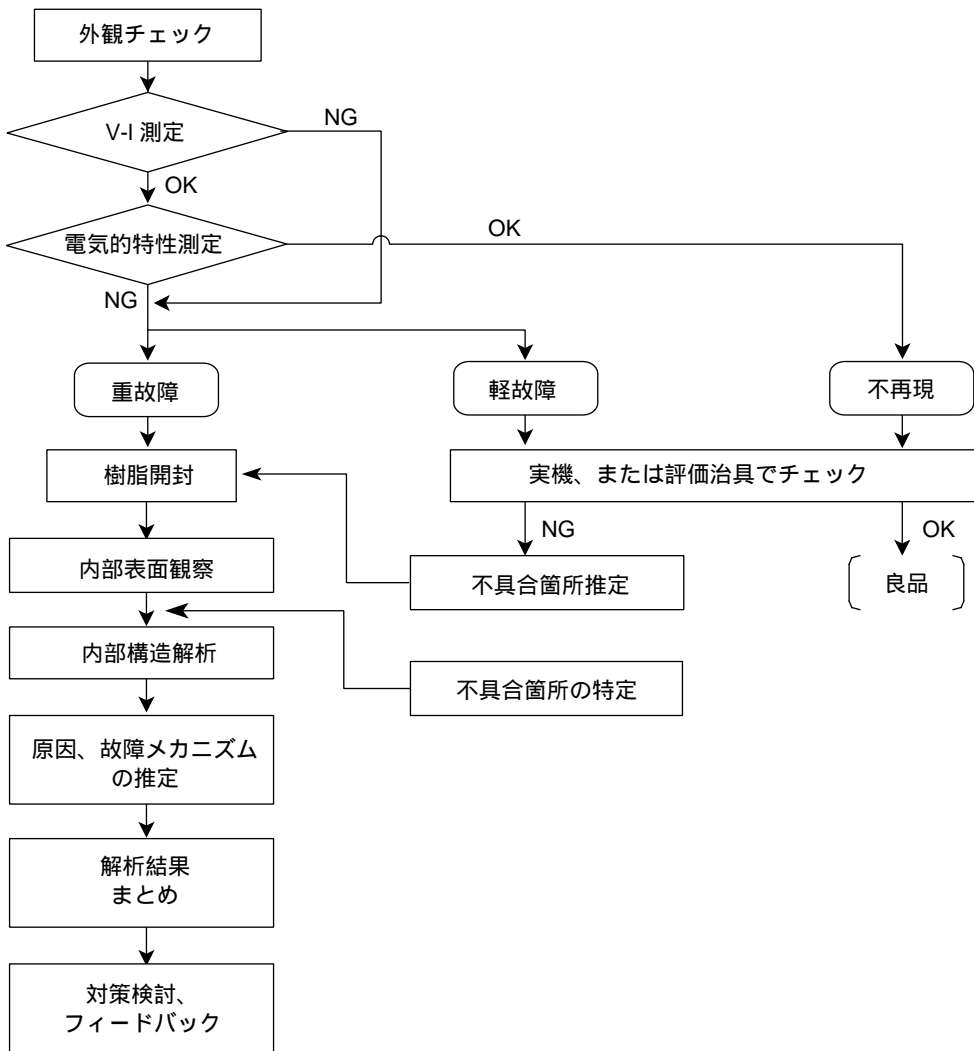


図3-1 故障解析手順の例

3.2 故障解析の必要性

半導体デバイスは高集積化、高機能化が進み、ますます製造プロセスは微細かつ複雑になってきており、多岐にわたる信頼性要因を含んでいます。また、使用される分野についてもとても広範囲になっており、そのため故障となる原因、メカニズムも複雑です。

このような状況において半導体デバイスは非常に高い信頼性レベルを要求されています。

高い信頼性レベルを確保するためには、デバイスの開発段階から製造段階に至るまで信頼性を作り込んでいく必要があります。そのためには、信頼性試験で発生した故障品やお客様の工程や市場で発生した故障品を解析し、故障モード、メカニズムを明確にして製造プロセスおよび設計プロセスへ改善のフィードバックを行うことが重要になります。

故障解析は単に故障品の故障原因やメカニズムを究明するだけでなく、高品質、高信頼性のデバイスの設計・製造の重要な技術分野として必要不可欠なものです。

3.3 故障解析

3.3.1 故障発生状況の調査

故障が発生した場合、その発生状況を把握することは故障解析を進める上でも故障解析の方法や手順を決める上でも重要です。

故障サンプルの入手と同時に、そのサンプルについて得られるかぎりの情報を収集します。製品名、製造ロット番号、故障数および故障率、不具合内容、実装条件、発生場所、使用回路、使用条件、環境条件などの情報は正確に把握、リストアップし、故障メカニズムの推定やシミュレーションなどに役立てます。

3.3.2 故障サンプルの取り扱い

故障サンプルは多くの情報を持っており、また数が限られているために貴重なものです。故障解析に失敗すると何の情報も得られない場合がありますので、故障サンプルの取り扱いには次のような注意を要します。

(1) 故障状態の保持

解析の前にその故障状況を変えてしまうようなストレス（機械的、電気的、熱的）を加えてしまうと正しい解析ができなくなります。

そのため、故障サンプルは故障状態を維持できる処理と保管が必要です。

(2) リード処理

基板にはんだ実装されたデバイスで、基板から取り外したサンプルはLSIテスター測定などのためにリードの処理が必要になる場合があります。この処理ではできるかぎりデバイスに熱を加えず、

リードにもダメージを与えないように細心の注意が必要です。

(3) 保管

サンプルの識別はもとより、保管にも気をつけなければなりません。

温度、湿度などの環境、電氣的破壊の防止、機械的破損の進行防止などの注意が必要です。また、パッケージを開封したサンプルはゴミの付着や表面の損傷が起きないように保管に留意が必要です。

3.3.3 パッケージ外観検査

外部状態の目視観察は重要であり、品質トラブル発生時の解析に対して有益な情報を与える場合が多くあります。

観察に際しては、肉眼で良品との相違をよく観察し、次に実体顕微鏡を用いて細部を観察します。実体顕微鏡では、さまざまな方向から照明角度を調節し観察部位が最もよく見えるようにすることが重要です。また、必要に応じて高倍率の光学顕微鏡で100～1000倍程度に拡大し異常箇所の発見に努めます。さらに破断面、変色、マイグレーションなどの詳細観察が必要な場合はSEMを、剥離およびクラックなどの内部解析が必要な場合はSATを用います。元素分析が必要で採取試料が多い場合には、原子吸光法などを使用します。微小領域で異常物質の採取が困難な試料に対しては、電子マイクロアナリシス（EPMA:Electron Probe Micro Analysis）を用います。

以下に外観観察のポイントを説明します。

(1) ボイド・ピンホール

半導体デバイスに通常用いられる封止樹脂は低粘度で低圧成形するために、気泡残留によるボイド、ピンホールが発生することがあります。（ボイド：パッケージ内部の気泡、ピンホール：パッケージ表面の気泡）ボイドが素子の表面や金線上に発生した場合、水が凝集して配線の腐食を引き起こすため、耐湿信頼性に関わる問題となります。

またピンホールはリフロー時にピンホール（ボイドも含む）を起点としてクラックが発生する場合があります。外観および信頼性に関わる不良となります。ボイドおよびピンホールの発生は、封止材料の含水率、粘度、空隙率（材料、金型構造）に大きく左右されます。これらの要因に対して、適切な条件を設定することにより、これらの発生は実用上問題ない程度に制御することができます。

(2) パッケージクラック

クラックは外部湿気の浸入の原因となります。パッケージ構造や材料によって見逃しやすいものもあり十分注意して観察する必要があります。微少なクラックの観察に対しては、蛍光浸透液による検査が有効です。

(3) 外部端子の機械的損傷

端子形状、荷重、環境などに依存して破壊モードが異なります。

繰り返し応力による疲労破壊、突発的な応力による衝撃破壊、長時間一定応力をかけて生ずるクリープ破壊などがあります。クラック面や破断面に表れる波模様は機械的疲労によるものを現し、

この破断面が皿形やラチェット型のもはこの箇所に応力集中があることを示します。

(4) 異物付着

外部端子に付着した異物は、基板実装時の接触不良の原因となります。

製造過程の取り扱いや作業環境、保管環境が不適切な場合に発生します。また、外部端子間に発生する導電性の異物（ヒゲ状のメッキ組成物など）においては、リード間を短絡する場合があります。

(5) 汚染

水分、油脂分、フラックス、各種スプレー（絶縁材料など）の残渣による汚れで接触不良、リーク不良を引き起こす可能性があります。

(6) リード変色

半導体デバイスに使用されているリードフレームは、はんだ付け性の向上および耐腐食性向上のため、S-Pd PPF（ソニー仕様パラジウムPre-Plated lead Frame）を除いては外部リードには通常はんだメッキを施してあります。メッキの変色は加熱による酸化や硫化などによる化学反応や素地の欠陥、不完全な前処理、メッキの欠陥などによって起こります。

(7) 金属のマイグレーション

高温、高湿度の環境下で電圧が印加されると、絶縁材料の表面や内部を金属イオンが正電極から負電極へ移行して負電極で還元析出し、電極間短絡を引き起こす場合があります。観察に際しては金属顕微鏡、EPMAなどによる調査が有効です。

(8) リードの応力腐食割れ

外部応力や残留応力により引っ張り応力を受けているCu-Zn合金のほか、多種の銅合金がアンモニア、アミン酸、高温多湿などの環境下に置かれることで発生することがあります。割れ破断面の観察、および粒界状態などをSEMで観察することにより判断できます。

3.3.4 電気的特性評価

(1) LSIテスターによる評価

設計評価用のテストプログラムや解析用のテストプログラムを用いて、故障サンプルの電気的特性を評価します。

この電気的特性評価の結果により、故障モードの分類/分析、故障メカニズムの推定を行い、その後の解析方法を決定します。

電気的特性評価では、故障発生状況から故障メカニズムを詳細かつ高精度にすることが可能なため、これにもとづいて以降の効果的な解析方法を決定することができます。

また、メモリLSIではこの評価でチップ上の詳細な故障箇所を特定できる場合も多く、電気的特性の詳細な評価はとても重要です。

(2) DC特性評価

カーブトレーサ、微小電流計などを用いてチップのDC特性を調べる評価方法です。

端子の破壊、オープン、ショートやDC特性の劣化などが検知されます。

微少な劣化や破壊などは良品チップと特性を比較し、差異を見ることによって解析の感度が向上します。

(3) 実装評価

実装機にサンプルを載せて評価する方法です。

(1)(2) で故障箇所が特定できなかった場合に故障モードの再現確認を行うのに有効です。(1)(2) で故障発生が確認できず、実装評価で故障発生が確認できた場合は、故障発生時の状況をシミュレーションできずに故障を再現できなかった場合と、デバイスの使用上の問題があって故障発生した場合の可能性があります。

3.3.5 パッケージ非破壊内部解析

パッケージを開封せずに内部を解析する方法として、X線透視、超音波探査、気密性評価による方法があります。

3.3.5.1 X線透視

ワイヤボンドの状態（ワイヤループ状態、アーチ形状、アーチ高さ）が観察できます。また、チップとダイパッドの間の銀ペーストの濡れ性、およびモールド樹脂のポイドの有無が検査できます。

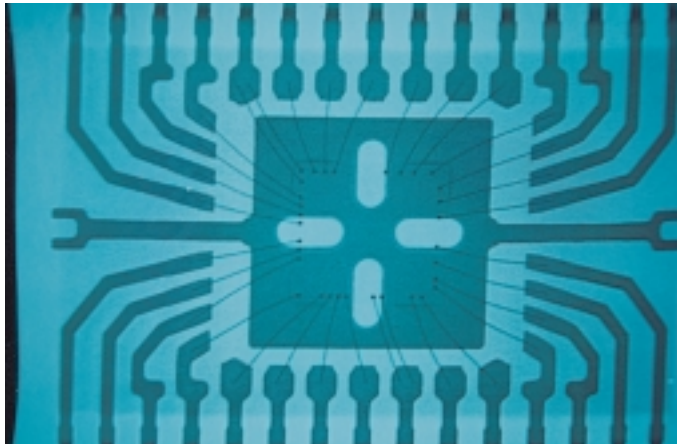


写真3-1 X線透視

3.3.5.2 超音波解析

超音波探傷装置（以下SAT:Scanning Acoustic Tomograph）は超音波（反射波）を用いて、図3-2に示すようなパッケージ内部の界面の接合状態を非破壊で観察することができ、はんだ耐熱性評価などに用いられています。

SATの画像は、接合界面の各材料固有の音響インピーダンスとその組み合わせに依存する反射率Rによって決まります。レジンから剥離（空気層）に超音波が入射した場合の反射率は、100%となり、接着部分より明るく画像化されます。また、このとき反射波形は位相が反転します。

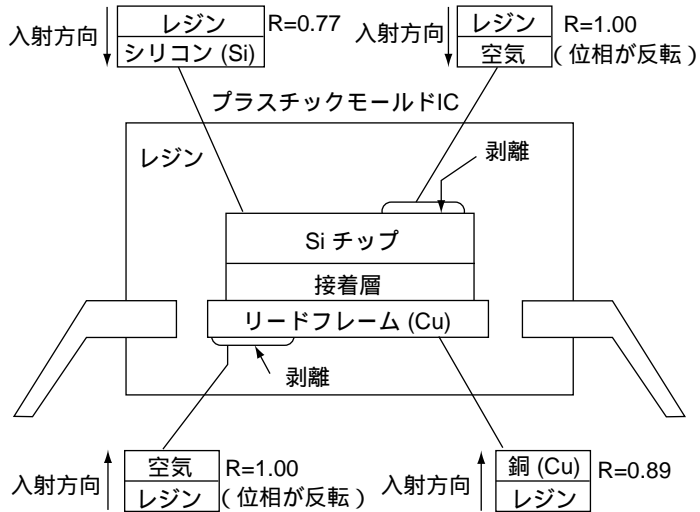


図3-2 パッケージ内部の接合状態と反射

写真3-2にSOP-28pinのSATによる解析事例を示します。

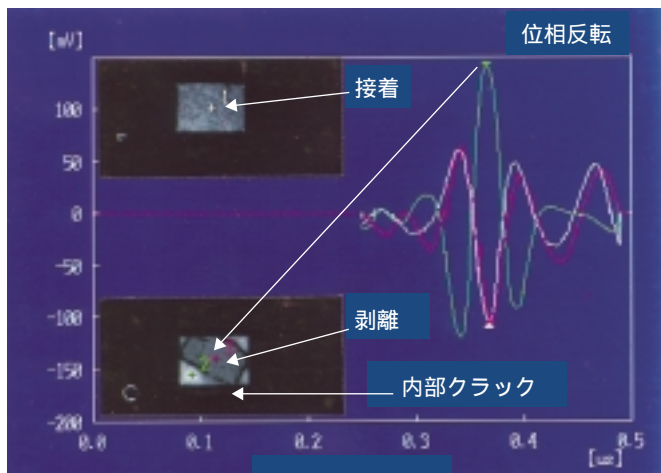


写真3-2 SOP-28pin 超音波解析図

写真3-3にSOP-28pinの断面SEM写真を示します。

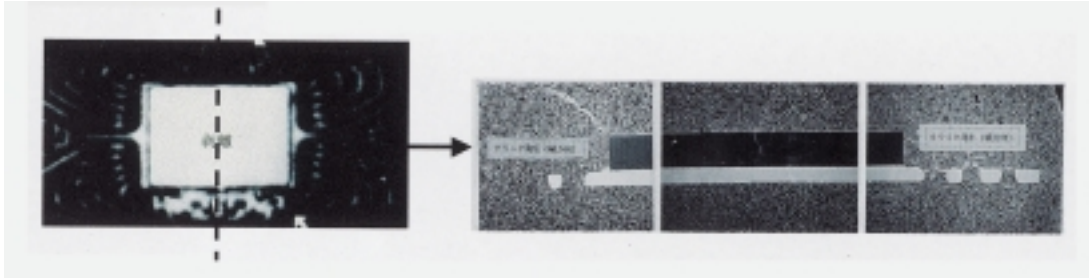


写真3-3 SOP-28pin 断面 SEM 写真

剥離の有無については、解析画像、反射波形（位相の反転）に加えリファレンスサンプルとの比較を行い総合的に判断をする必要があります。

写真3-2に示すように、内部クラックがSATの解析により確認できる場合もありますが、最終的には断面研磨が必要となります。

3.3.5.3 気密性評価

キャンタイプ、セラミックタイプなどのパッケージ内は中空で、窒素ガスが封入されています。水分、不純物の侵入を抑えてアルミパッドの腐食を防ぐため、リーク量を制限する必要があります。フライングリーク測定として、ヘリウムを用いたリーク量測定法があります。

3.3.6 チップ内部故障箇所の特定

3.3.6.1 概要

チップの故障解析では、まず故障箇所特定技術を用いてチップ内部の故障箇所を特定し、次に特定した故障箇所の形状観察、組成分析などの物理解析を行って故障の原因を確定します。

故障箇所特定法としては次のような方法が用いられています。

チップ内温度分布の異常発見には赤外線放射検出法、リークの検出には液晶を利用したホットスポット観察法、微少リークの検出には微弱発光を検出するフォトエミッション法などが利用されています。また動作状態の解析には、PN接合部の電位状態の解析法として電子顕微鏡を用いるEBIC法や走査型レーザ顕微鏡を用いるOBIC法、EBテストを用いて配線の電位状態を解析するVoltage Contrast法などがあります。

これらの手法は、チップ表面への電子ビームの照射やチップ表面から発生する光などの検出を行うため、チップをパッケージに入れたままその表面を露出させなければなりません。そこで、パッケージを開封しチップコーティング膜を除去するなどの前処理が必要になります。

3.3.6.2 パッケージ開封方法

パッケージを開封するには開封装置を使用して開封する方法と治具を使って人間の手作業で開封する方法があります。開封装置を使って開封する場合、開封技術、熟練を必要とせず誰でも簡単に開封できます。写真3-4は開封装置を使ってQFP-64pin（チップサイズ3.6×3.6mm）を開封した例です。

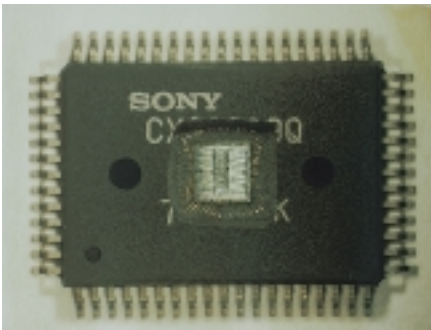


写真3-4 パッケージ開封例

治具を使って手作業で開封する方法はいくつかありますが、ここではその2例を図3-3に示します。(a)はモールド樹脂を削る方法です。チップの上の樹脂をグラインダーやドリルなどで削り、その後薬品液に浸し樹脂を溶かします。チップが見えたら溶解を止め、有機溶剤液に入れて超音波洗浄します。この方法はパッケージの全面を薬品液に浸すためパッケージ全体が溶かされます。開封対象パッケージはDIPなど厚いパッケージです。(b)は耐酸テープを使用する方法です。

パッケージ回りを耐酸テープで覆い、溶かしたい部分のテープをカットします。その後薬品液に浸し樹脂を溶かします。リードの曲がり保護の目的で石英を使います。耐酸テープを使う手法は目的の部分のみ溶かすので動作可能状態で開封できます。

開封対象パッケージはQFP, SOP, BGA, CSPなど薄いパッケージに限られます。

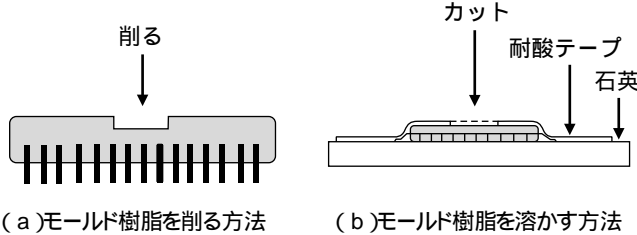


図3-3 治具を使った開封方法

3.3.6.3 フォールトアイソレーション

(1) 機械的プロービング

チップ内部の配線に細い金属針を当て、内部配線の電位波形を測定する手法です。古くから用いられている手法ですが、チップ内部の絶対電位を測定できる手段としては唯一の方法です。

配線に金属針を接触させるには、配線をチップ表面に露出させる必要があるため、一般的にプラズマ処理によるパッシベーション膜の除去が必要です。

下層配線の信号を測定したい時には、FIB (Focused Ion Beam) を用いて層間膜に孔をあけタングステン膜の堆積により測定パッドを作り針を当てる方法があります。

(2) 電子ビームテスト

チップ表面に細く絞った電子ビームを照射し、非接触状態でチップ内部の配線における電位分布や電圧波形を測定する方法です。

非接触であるため高インピーダンス測定が可能で、波形のタイミングなどを高い精度で測定することができます。

電子ビームをチップ表面に照射すると、マイナス電位の配線からエネルギーの高い2次電子が、プラス電位から低いエネルギーの2次電子が発生します。マイナス電位からの2次電子がプラス電位の2次電子より多く検出されるため、コントラストが生じ配線上の電位分布を知ることができます（写真3-5）。また、パルス化した電子ビームを配線上の一点に固定し、パルスビームを照射するタイミングをシフトさせながら電位情報を検出することで電圧波形が得られます。

電子ビームテストで得られる情報は波形などの論理情報であるため、故障箇所を特定するためには期待値情報との比較が必要です。そこで、良/不良チップの電位分布を比較する手法や、実測した波形と論理シミュレーションによる波形とを比較する手法などを用いて故障箇所を絞り込みます。

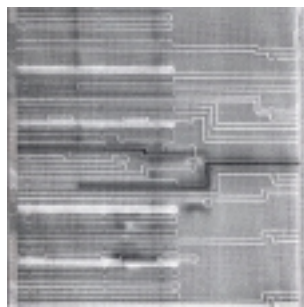


写真3-5 電位差による解析例

(3) 発光解析

チップ表面のさまざまな故障に起因して発生する微弱発光を検出する手法で、エミッション顕微鏡が用いられます。図3-4に発光解析装置の構成を示します。

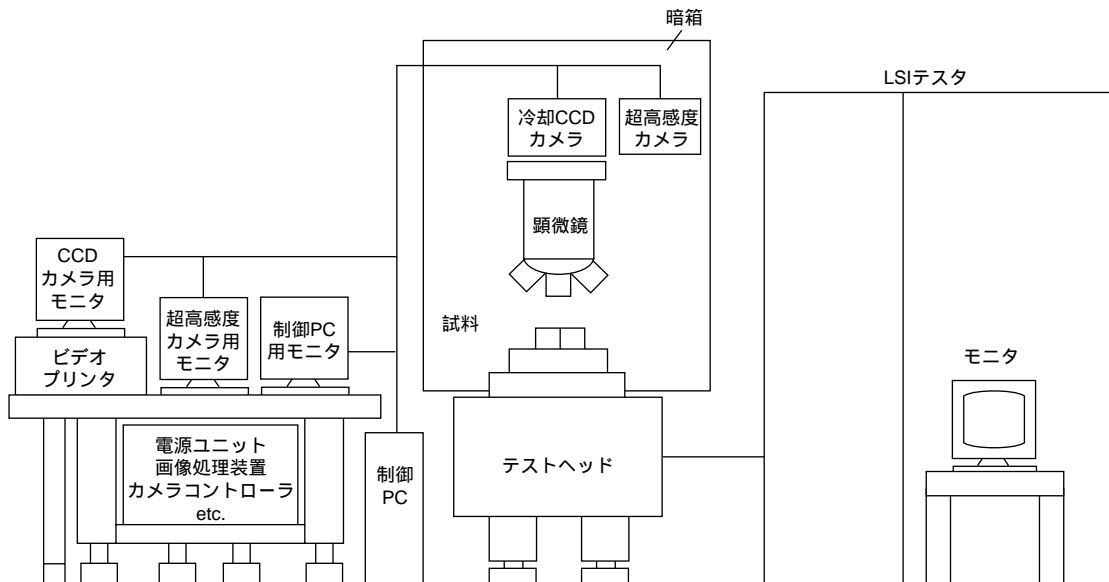


図3-4 発光解析装置構成

発光像と反射像（光学顕微鏡像）を同一の高感度カメラで捕らえ、この2つの像を合成させることでチップ上の発光位置を検出することができます。（写真3-6(a)）

ゲート酸化膜やpn接合などにリーク電流が流れると、高電界領域が発生し、マイクロプラズマ現象による発光が観測されます。

さらに、配線の断線、短絡に起因したMOSトランジスタのホットエレクトロンの発光を観察することで間接的に故障箇所を絞り込むこともできます。発光解析は主にリーク系故障に用いられていますが、LSIテストで動作させたチップから発光を検出することで、微少リークにより引き起こすファンクション故障の原因を特定することもできます。（写真3-6(b)(c)）また、金属配線の多層化が図られたマイコン、ASICなどでは、チップ表面からの発光検出が困難になってきているため、チップ裏面側からシリコンを透過する赤外光を検出する方法を用います。

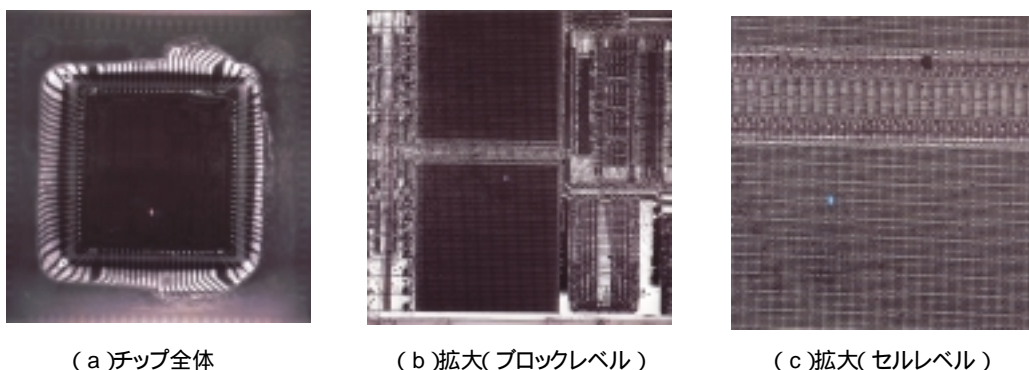


写真3-6 発光解析による微少リーク検出例

(4) 発熱解析

液晶を用いて発熱をともなうリークやショート不良の発生箇所を検出できます。液晶に温度を加えると液晶の相転移が起こり、偏光顕微鏡で観察できます。

その方法にはあらかじめLSIを液晶の結晶性が変化する温度までもっていく方法と、液晶を強制的に相転移させた後自然冷却および強制冷却により、再び液晶が転移点以下になる工程を利用する方法があります。

(5) OBIC(Optical Beam Induced Current)による解析

半導体に光ビームを照射すると、半導体の光吸収現象によって励起電流が発生します。この励起電流が故障箇所に変化するため、これを捕らえることで故障箇所を特定することができます。この手法をOBICと呼びます。

光として特定の波長のレーザービームを照射し、デバイスの電流変化を画像として可視化した、いわゆる電流マップとして見るものです。（写真3-7）

故障解析への応用例としては以下の例があります。

1. リーク電流発生箇所の検出

（PNジャンクションのリーク、ゲート酸化膜などのリーク）

2. スタンバイ電流異常箇所の検出
3. ESD破壊箇所の検出
4. ラッチアップ評価
5. 空乏層の観察

なお、光励起電流は故障の状態やモードによって異なりますが、非常に微小な電流なので定期的に流れる電流をキャンセルし、OBIC電流のみを高感度で分析する必要があります。

現在の装置は、数10pAレベルまで対応できるようになっています。

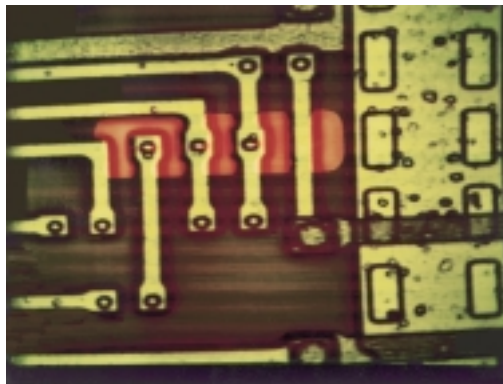


写真3-7 OBIC解析例

3.3.7 チップ物理解析

チップの物理解析は、これまでに述べた方法で特定した故障箇所を観察し、物理的に故障の原因を明らかにすることです。

半導体を構成する回路の破壊された箇所は、表面から容易に観察できる場合もありますが、ほかのパターンの下にあって観察が困難な場合があります。この場合は観察を容易にするために、不要なパターンを除去する必要があります。

具体的方法としては、表面の上層からパターンを除去（除膜）して破壊箇所、原因を露出させる方法と、故障箇所を含む断面を露出させる方法があります。電氣的解析の結果、場所特定の確度、パッシベーション膜上からの表面観察結果などにより、適切な方法を選択します。

3.3.7.1 除膜

パッシベーション膜から、層間膜、メタル配線など順次膜の種類に応じた方法で除去します。注意すべき点は、除去する膜より下の構造にできる限りダメージを与えないようにすることと、各段階で破壊箇所の露出状態を確認し、記録することです。

表3-1に膜の種類に応じた除去方法を示します。

表3-1 膜種に応じた除去方法

膜種	方法	使用薬液・ガス
SiN	ドライエッチング	SF ₆ , N ₂ , O ₂
	ウェットエッチング	H ₃ PO ₄
SiO ₂	ドライエッチング	SF ₆ , N ₂ , O ₂
	ウェットエッチング	HF, CH ₃ COOH, SO-1 (HF, NH ₄ OH)
Al	ウェットエッチング	HCl, H ₂ SO ₄ , H ₂ O ₂
Ti/TiN/TiON	ウェットエッチング	H ₂ SO ₄ , NH ₄ OH, H ₂ O ₂
Poly Si	ウェットエッチング	HF, HNO ₃ , CH ₃ COOH
	超音波洗浄	H ₂ O

3.3.7.2 表面観察（光学顕微鏡・SEM）

広い範囲を手早く観察できることから、ほとんどの場合物理解析は表面観察からスタートします。表面から除膜して故障箇所を露出させる場合は、この方法で観察します。

観察には光学顕微鏡やSEM（Scanning Electron Microscope：走査型電子顕微鏡 以下略SEM）が使われます。

光学顕微鏡は原理的に低倍率（～2000倍程度）ですが、酸化膜が光を透過するので、除膜しなくても故障箇所を観察できる場合があります。また透過する膜の膜厚、屈折率に応じた干渉色を持つため、正常品と色を比較することで成膜時の異常を発見できる場合があります。

SEMは数万～数十万倍で観察できるため、半導体の物理解析では不可欠になっています。観察対象の外形だけでなく、導電性や周囲の回路要素との組成の違いも観察可能です。また、シリコン基板に対し電氣的にフローティングになっているメタル配線はチャージアップして白く輝くため、コンタクト不良や断線を発見できる場合があります。

3.3.7.3 断面観察 (FIB・SEM)

異物の付着工程の特定や、コンタクトホール異常の観察には、断面観察が有効です。断面を露出させる方法としては、へき開、研磨、FIB (Focused Ion Beam) があります。観察は通常SEMを使用します。

(1) へき開

チップをシリコンの結晶方向に割って断面を観察する方法です。

観察対象に応じて、HF、 H_2SO_4 などで少しエッチングすると輪郭が観察しやすくなります。観察場所を厳密に特定することはできませんが、繰り返しパターンや広範囲の観察には有効です。

(2) 研磨

サンプルの加工に時間がかかりますが、チップ上の特定個所の断面をFIBより鮮明に観察することができます。まずチップをへき開した後、観察したいポイントがある断片を研磨して、断面を観察ポイントに近づけていきます。最初は荒い研磨剤を使用し、観察ポイントに近づいたら細かい研磨剤に切り替え、研磨痕が残らないようにします。

(3) FIB

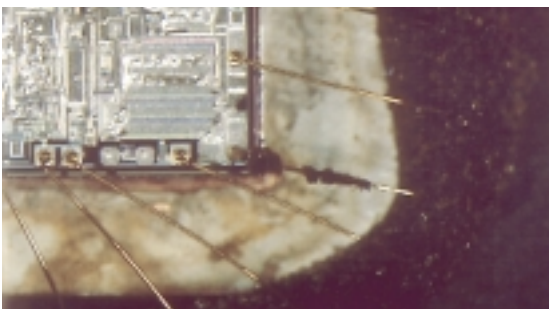
収束させたイオンビームを照射して、チップ上の任意の観察ポイントをエッチングして断面を露出させます。像観察しながら照射位置を決められるので、 $1\mu m$ 以下の精度で断面を露出させることができます。

3.3.7.4 観察のポイント

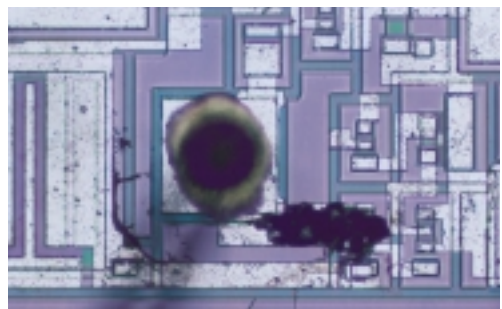
(1) 過大電圧・電流による断線・短絡・リーク

外部からのサージ電圧、電流により、断線、短絡に至る場合があります。主に外部からの入出力セル部分に発生することが多いですが、サージ電圧、電流によりラッチアップが発生した場合には、内部のセルに用いているアルミ配線やAuワイヤが溶融することがあります。(写真3-8)

入出力セル部分での溶融については電気的な確認やチップ上からの金属顕微鏡での観察で容易に確認できます。内部セルの溶融に関しては、注意深く金属顕微鏡で観察する必要があり、ポリシリコンが溶融している場合には下層に位置する場合が多く、その場合は上層から除膜して観察します。



(a) セル内部アルミ配線の断線例



(b) パッド-Al配線間の断線例

写真3-8 過大電圧・電流による断線例

(2) Al配線の腐食

パッケージ外部からの水分の浸入、リン酸の生成や残留塩素イオンなどでアルミが腐食し、断線もしくは隣接するアルミ配線間で短絡する場合があります。(写真2-11) 腐食したアルミ配線は変色していることが多く、パッシベーション膜上からの光学顕微鏡で容易に観察できます。

(3) チップクラック (写真3-9)

熱ストレスによりシリコンチップにクラックを生じる場合があります、電気的には電源 - GND間のリークに至るものが多く確認されます。

クラックはチップ表面を横切って不規則に発生する場合がありますが、裏面研削工程の研削が不十分で、荒く研削された場合には、研削痕に沿って発生する場合があります。観察する場合には、金属顕微鏡でチップ周辺を全体的に観察すると容易に発見できるモードです。またダイパッドからチップを取り外し、裏面の裏面研削痕と照らし合わせて検証できることもあります。

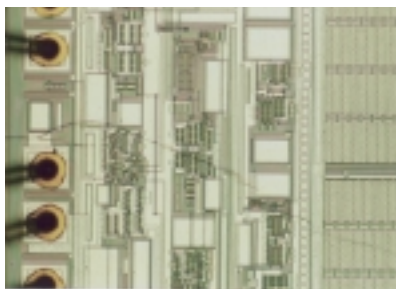


写真3-9 チップクラック例

(4) マスク合わせずれ

拡散領域、ポリシリコン、コンタクトホール、アルミ配線、ビアホールが上下の隣接層に対し、位置ずれしているもので、表面観察で発見できます。ただし故障原因と判断するためには、各回路構成要素の加工寸法や、断面から見た位置関係、形状の観察結果などの情報が必要になります。

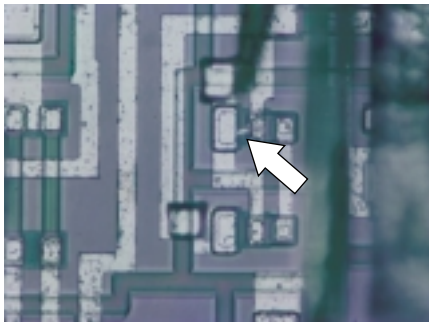
(5) 異物付着

工程内で付着する異物によって配線が細く変形したり、微少リークが起こることがあります。そのまま使用を続けるとエレクトロマイグレーションによって断線したりショートしたりします。異物の位置が不明確な場合は表面から除膜して観察しますが、位置が特定できるときはFIBなどで断面観察すると付着工程の特定が容易になります。また異物の形状や成分分析の結果も原因の特定に有用な情報になります。

(6) 静電気破壊 (ESD)

現在のMOS製品のゲート酸化膜は非常に薄くなっており、絶縁耐性は低くなっています。そのためICの耐圧を越えた静電気が印加されると破壊に至ります。現象として、入出力端子の短絡を生じる場合があります。破壊メカニズムにはアルミ配線やポリシリコン抵抗の焼損、あるいはトランジ

スタのゲート酸化膜破壊、接合破壊などがあります。焼損であれば金属顕微鏡で容易に解析できますが、ゲート酸化膜のピンホールについてはSEMなどの装置を用いて観察する必要があります。(写真3-10-(a)、写真3-10-(b))



(a) Al 配線あり



(b) Al 配線除去

写真3-10 静電気破壊例

(7) エレクトロマイグレーションおよびストレスマイグレーション

製造工程内または使用中の電流、温度、メカニカルストレスによってAl配線の表面が一部隆起したり（ヒロック）、配線に亀裂（ボイド）が入ったりすることがあります。ヒロックの場合は場所によっては横や上の隣接する配線とショートしたり、パッシベーション膜が弱くなって破壊し、配線が腐食することがあります。

ボイドがある場合は、使用中の電流でエレクトロマイグレーションをおこし、抵抗増大、断線を起こすことがあります。解析状況に応じて表面観察、断面観察を行います。

3.3.8 分析・構造解析技術

LSIの高集積化にともない、セルの縮小による微細化、ゲート酸化膜/キャパシタ絶縁膜などの薄膜化、さらに、多層化やトレンチのような三次元化によってプロセスも複雑になり、製造におけるプロセスマージンの低下や多くのプロセス上の問題を引き起こしやすく、品質と信頼性の確保を難しくしています。プロセス上の問題を解決するために、分析・解析技術の重要性がますます高まっています。当社では表3-2に示す解析技術を整えてプロセス上の問題解決に役立てています。

表3-2に各種解析手法の概要について示します。

表3-2 解析方法一覧

1 / 3

	解析手法	測定方法	得られる情報	測定限界	測定対象例
元素分析	イオンクロマトグラフ (IC)	試料イオンの電気伝導度	水溶液中のイオンの存在およびその濃度	ppbレベル～(ng/ml) pptレベル (pg/ml)	無機陰・陽イオン 有機物イオン
	誘導結合プラズマ発光分光分析 (ICP-AES)	原子の励起準位から基底準位に落ちるときの発光量	溶液中の元素濃度	ppb (ng/ml)～ ppm (μg/ml)	無機材料、酸、 アルカリ、 有機溶媒
	原子吸光分析 (AA/FAA)	原子による光の吸収量	溶液中の金属元素の濃度	ppt(pg/ml) ppm (μg/ml)	半導体材料、酸、 アルカリ、 有機溶媒
	誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS)	プラズマを原子状にした試料を質量分析計に導入する。	溶液中の元素濃度 および固体中の元素の定性分析	ppg (fg/ml)～ ppt (pg/ml)	無機材料、酸、 アルカリ、 有機溶媒、 半導体材料
化学構造解析	フーリエ変換赤外分光分析 (FT-IR)	物質による赤外線の吸収量を波長を変えて測定する	有機物の定性、薄膜の膜質	大きさで 数10 μm	有機材料、 半導体表面の 官能基など
	可視紫外分光 (UV-VIS)	紫外可視光の物質に対する透過率を見る	物質の光に対する透過率	0～2Abs	ガラス、 有機材料など
	ラマン分光法	格子振動や分子振動による光の非弾性散乱を測定	格子振動や分子振動の光の非弾性散乱を測定	面内分解能 ～0.8 μm	半導体材料 (Si, GaAs など)、 有機・無機材料
	ガスクロマトグラフ / 赤外分光 / 質量分析 (GC/IR/MS)	気・液分配で分離した物質を赤外分光光度計、質量分析計で測定する	ガス化する有機物の構造決定、定量	ng程度	有機混合物 (固体、液体、 気体)
	ガスクロマトグラフ / 原子発光分析 (GC/AED)	気・液分配で分離した物質を発光分析で元素分析する	有機物の元素組成	ng以下 (元素に依存する)	有機混合物

表3-2 解析方法一覧

	解析手法	測定方法	得られる情報	測定限界	測定対象例
化学構造解析	ガスクロマトグラフ / 水素炎イオン化検出 (GC/FID)	気・液分配で分離した物質を水素炎中でイオン化させ電流として検出する	有機混合物の組成比	10 ~ 100pg	有機混合物
	高速液体クロマトグラフ (HPLC)	ポンプを用いた固・液分配による物質測定	有機物の分離	物質に依存する	有機混合物
	フーリエ変換核磁気共鳴分析 (NMR)	磁気モーメントを持つ物質の磁場中における電磁波の吸収	複雑な構造を持つ物質の微細構造、組成、緩和時間	最小重量 ¹ H核0.1mg、 ¹³ C核5mg	有機化合物、高分子、生物物質、触媒
	高分解能質量分析 (HRMS)	揮発させてイオン化	分子量、分子組成式	分子量 5,000程度	有機材料
熱分析・熱物性	熱分析 (TG,DSC,TMA) (TG-DTA)	温度を変化させながら物質の質量変化、熱の出入り、膨張を測定する	結晶構造の変態温度や物質の熱分解温度から熱的な安定性の評価	数mgの試料が必要	ガラス、高分子材料
	昇温脱離 — 四重極型質量分析 (TD-QMS)	温度を上昇させながら試料から放出されるガスを検出する	物質のガス吸着、結晶水の脱離など	物質に依存する	セラミック、金属材料など
形態観察・マイクロ分析	走査電子顕微鏡法 (SEM)	一次電子線を走査し、二次電子、あるいは反射電子強度の二次元分布を観察。	試料の表面形状、試料の組成分布像、試料の凹凸強調像	分解能 0.7 ~ 0.3nm	固体、粉体
	電子プローブX線分光分析 (EPMA)	電子線照射により発生した特性X線の波長(エネルギー)およびその強度測定	試料の組成およびその面内分布(マッピング像)	0.1% ⁵ B ~ ⁹² U 分解能5 ~ 10eV (WDX) 150eV (EDX)	固体、粉体
	原子間力顕微鏡法 (AFM)	試料と探針間の原子間力を測定	nmオーダーの表面凹凸(絶縁物でも可)	0.01nm (垂直) 2 ~ 3nm (水平)	半導体基板、LSI層間膜、有機薄膜
	表面形状測定法	触針による表面形状測定	固体表面の段差、粗さ	0.03nm ~ 0.5nm (垂直)	蒸着薄膜の厚さ、ICの表面形態酸化膜のエッチングパターン

表3-2 解析方法一覧

	解析手法	測定方法	得られる情報	測定限界	測定対象例
表面分析	オージェ電子分光 (AES)	電子線照射により発生したオージェ電子のエネルギーおよびその強度測定	数nm以下の薄膜の組成、元素の深さ方向分析	0.1%	レーザーダイオード半導体試料、多層記録媒体の表面・界面解析、組成変化
	X線光電子分光 (XPS)	X線照射により固体表面から放出される光電子の運動エネルギーを測定	表面下数nm程度の深さ領域の元素組成、化学結合状態、およびそれらの深さ方向分析	0.1at%	半導体表面、磁性体表面、有機物表面、各種デバイス表面
	二次イオン質量分析 (SIMS)	固体試料にイオンを照射した際放出される二次イオンを測定	マススペクトル、微量不純物の濃度および深さ方向分布、元素の深さ方向分布	$10^{14} \sim 10^{16}$ atoms/cm ³	半導体試料中のドーパント濃度深さ方向分布、金属 / 半導体界面の元素分析
構造解析	透過型電子顕微鏡法 (TEM)	透過電子の回折現象を用い、電磁レンズで拡大する顕微鏡法	結晶構造、原子配列、結晶欠陥、結晶配向、磁区構造、組成分析、状態解析	点分解能 $\geq 0.19\text{nm}$ 試料厚数 $\sim 300\text{nm}$ 以下	半導体の秩序構造、ヘテロ界面、イオン注入の結晶欠陥、磁性薄膜、酸化物超伝導体
	反射高速電子回折 (RHEED)	表面すれすれに電子を入射させ、表面で回折した電子による回折図形を撮影する	極表面の結晶構造、結晶配向、結晶方位、ダメージ	表面深さ数nm以下、測定領域 ビーム径0.1mm \times 試料サイズ	半導体、金属薄膜、磁性材料 (薄膜バルク)
	X線回折	試料に照射したX線の回折角、回折強度を測定する	格子面間隔、結晶構造、結晶性、結晶配向、残留応力 (加工歪)	d/dにおいて 10^{-3}	粉末、多結晶膜、エピタキシャル膜、加工表面、付着物、磁性膜
	極点図測定	試料をさまざまな方向に傾けてX線の反射強度を調べ、結晶面の向きを調べる。	多結晶試料中の結晶粒の方向分布 (結晶配向)	角度分解能 $>2^\circ$	磁気ヘッド用合金膜、薄膜磁気媒体、塗布型テープ、LSI配線膜
	X線トポグラフィ	X線を照射し、回折現象を利用して結晶内および結晶表面の不完全性を乾板に記録する顕微鏡法	結晶内の格子欠陥 (転位、析出物など)の分布、格子定数の変化、格子面の傾き	分解能数nm d/d= $10^{-5} \sim 10^{-7}$, 0.1秒	半導体単結晶 (Si, GaAsなど)、磁性体結晶、光学結晶
	ラウエカメラ法	単結晶からの白色X線を撮影し、そのパターンの対称性を見る	結晶の面方位	角度分解能 $\sim 3^\circ$	フェライトヘッド、光学結晶、半導体、金属単結晶

3.3.8.1 ウェーハ表面の金属不純物分析

シリコンウェーハ表面のクリーン化技術は半導体製造において重要であり、金属不純物汚染があると酸化膜耐圧の低下、リーク電流の増大などを引き起こすことが知られています。そこで表面に存在する $10^8 \sim 10^9 \text{atoms/cm}^2$ の不純物量を高感度に分析する技術が必要です。

化学分析の手法では気相分解 / 原子吸光の技術が開発されてはじめて高感度の分析が可能となり、その後回収法の改良が加えられて現在に至っています。この回収法はフッ化水素酸を一度蒸留して、純度の高いフッ化水素酸に金属不純物を取り込みます。

しかし、現在ではフッ化水素酸の純度が向上しているため、これを直接使用しても問題ありません。そこで当社では少量の高純度フッ化水素酸を蒸気化することなく直接使用し、ウェーハ表面不純物回収を簡便に行なえるよう指示棒誘導法という独自の汚染金属の溶解、回収技術を開発しました。図3-5にその概略図を示します。

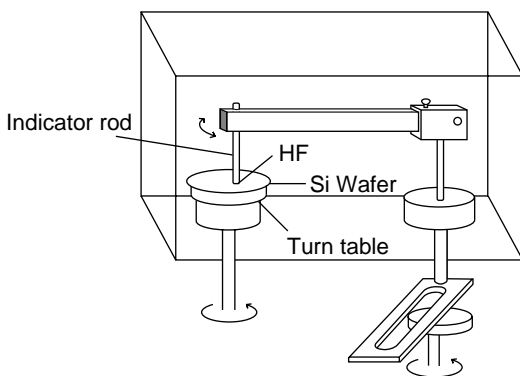


図3-5 指示棒誘導法概略図

汚染金属の溶解、回収方法は、まずシリコンウェーハをターンテーブル上に乗せ、その上に数ミリの隙間を空け、直径10mmの指示棒を設けます。この隙間に高純度フッ化水素酸100～200 μ l入れると表面張力でこの隙間に保持することができ、この状態でウェーハを回転させます。一方、指示棒はウェーハ上を往復させる機構となっており、これによりフッ化水素酸は螺旋状にウェーハ上を万遍なく移動し、表面自然酸化膜とともに金属不純物をフッ化水素酸に溶かし込むことができます。

この簡便な回収技術と、高輝度ランプを使用した高感度な原子吸光装置を組み合わせることにより 10^8atoms/cm^2 レベルの分析を行い、プロセスラインの管理を行っています。

洗浄後の8インチウェーハ表面の金属汚染を200 μ lの高純度フッ化水素酸で回収し、9元素の分析を行った分析の一例を示します。わずかにNa、Kのみが検出されましたが、ほかの元素はいずれも 10^8atoms/cm^2 台の検出限界以下でした。

洗浄ウェーハ表面の金属不純物分析 ($\times 10^{10} \text{atoms/cm}^2$)

Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Zn
<0.04	<0.06	<0.03	0.16	<0.04	<0.01	0.38	<0.07	<0.05