
5. 半導体デバイスの故障解析

5.1 故障解析の必要性

故障解析は、故障品の調査を通じて故障に至ったメカニズムを明らかにし、設計・プロセスに対して迅速かつ正確なフィードバックを与えるために必要です。市場において、デバイスに要求される信頼性はますます高くなり、しかもデバイスの高集積化・大規模化も急速に進められているため、故障解析においても高度な技術が要求されます。

デバイスの信頼性を確保するためには、設計・プロセスの開発段階から信頼性を作り込むことが常識になっていますが、製造工程や市場での故障発生は避けられないため、迅速な故障解析を実施し、対策を施して、故障の発生が繰り返されることを防止しなければなりません。

半導体デバイスは、ウェハ・アセンブリプロセス数 100 を越える加工工程を有し、使用される材料部品も多種にわたります。さらにデバイスが使用される環境も多岐にわたるため、故障解析には設計・プロセスを始めとする幅広い知識が要求されます。

5.2 故障解析とは

故障判定基準に基いて、対象となるデバイスが機能を失ったと判断したときから故障解析が始まります。故障は、完全劣化から機能の減少に至るものまで非常に幅広いです。最近の電子機器システムは非常に複雑になり、単なる部品のみでの故障ばかりではなく、システム全体のマッチング不良による故障も多いです。故障解析では、これらの点に十分な配慮を払わなければ誤った結論を出して改善活動の方向を見誤ることになります。

故障解析とは、故障内容をよく吟味し故障メカニズムを明らかにするため、適切な電氣的・物理的・化学的解析技術を駆使し故障原因を解明することです。実際の故障解析では、解析作業に着手する前に故障発生当時の状況をできるだけ調べて故障内容を的確に把握することが必要です。特性値の変化内容、故障発生までの経過・使用された環境・ストレス条件・実装置上の問題点・人的ミスなどの分析が必要です。これらの調査を十分に行うことで、故障モード・故障メカニズムをある程度推定することが重要であり、これに基づいて最適な解析方法・手順を決定します。この分析が不十分であると、解析方法の選択を誤り貴重な解析試料を破壊するのみで原因不明に至ってしまう可能性があります。また、解析にあたっては故障品と良品を比較することも、問題の解決を早く見つける糸口になります。

故障解析の方法・手順は、前述したように故障の発生状況から決定されるが、一般的には図 5.1 に示すような手順で実施されます。故障した製品に対しては、まずパッケージの外観検査を行い、続いて電気特性を評価し故障モードを分類します。つぎに、故障モードに応じてパッケージ内部やチップ内部を解析した後、光学顕微鏡または電子顕微鏡 (SEM:Scanning Electron Microscope) を用いて故障した箇所を観察します (物理解析)。最後に、総合的な判断から故障メカニズムを確定し、対策を樹立します。

5. 半導体デバイスの故障解析

5.3 故障解析の実際

一般的な故障解析手順 (図 5.1) に基づいて、その詳細を説明します。

5.3.1 故障発生状況の調査

故障の発生状況に関して、次の項目を調査します。

- (1) ロットの確認 (生産時期・在庫期間 〈保管環境〉)
- (2) 故障の発生場所および時期 (発生工程・市場・使用場所など、発生日付)
- (3) 故障品の履歴 (ウェハ・アセンブリプロセスでの処理条件、納入時期、受入検査の成績および条件、部品実装または組み立て工程での条件、これまでの故障内容の調査)
- (4) 使用条件 (動作条件、熱的・機械的ストレス、使用条件 〈屋内外・温度・湿度・雰囲気〉、故障発生に至るまでの時間)
- (5) 不具合内容 (特性劣化・完全故障・間欠故障・故障率・ロット的特長)

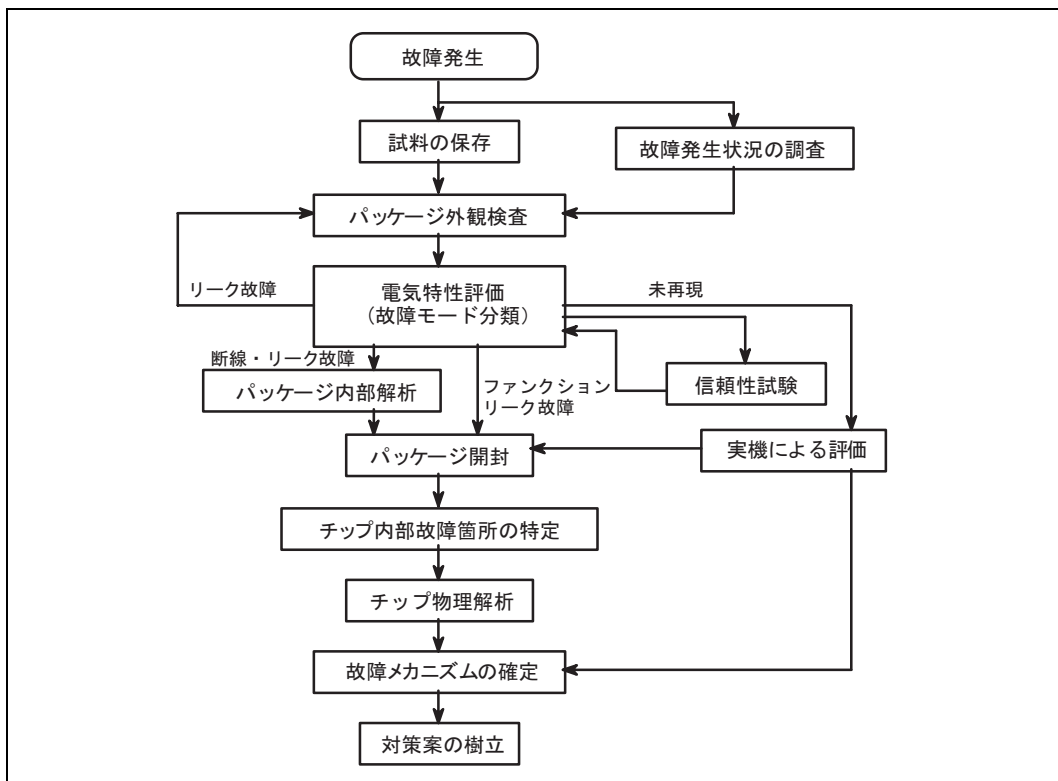


図 5.1 故障解析の手順

5.3.2 試料の保存

機械的破損・環境腐蝕などがある場合は、その状態が解析の開始時まで維持保存されていたか確認をする必要があるため、写真などで最初に外観を記録しておきます。試料の保存では、温度・湿度などの環境、電気的破壊の防止・機械的破損の進行防止などに注意する必要があります。微小な試料に対しては、取り扱い治具・固定具などを用います。

5.3.3 パッケージ外観検査

外部状態の目視観察は重要であり、以後の解析に有益な情報を与える場合が多いです。肉眼で全体を観察し、良品との相違をよく把握します。次に4~80倍程度の実体顕微鏡を用いて細部を観察します。実体顕微鏡観察では、さまざまな方向から照明角度を調節し、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50~2000倍に拡大し異常箇所の発見に努めます。さらに破面・異物付着・ウィスカ・変色・マイグレーションなどの詳細観察が必要な場合にはSEM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、電子線マイクロアナリシス(EPMA:Electron Probe Micro Analysis)を用います。

以下に外観検査のポイントを説明します。

(1) 塵・埃

金属やその酸化物、灰の付着は製鉄所や発電所など非常に過酷な環境下で使用されていた可能性を示し、特性劣化の一原因をなすこともあります。

(2) 汚染

水分・油脂分・はんだフラックス・各種スプレー(絶縁材料など)の残さによる汚れで接触不良・リーク不良を引き起こす場合があります。

(3) リードの変色

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食性向上のため、通常メッキされています。メッキの変色は、加熱による酸化や硫化などによる変色・素地の欠陥・不完全な前処理やメッキの欠陥などによって起こります。

(4) リードの応力腐蝕割れ

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合金の他、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。

(5) リードの機械的損傷

外部形状・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・衝撃破・長時間一定応力をかけて生じるクリープ破壊があります。また塑性変形なしにクラックが急激に成長する脆性破壊、塑性変形後、徐々に成長して起こる延性破壊があるので、損傷に至った過程を十分に吟味する必要があります。

5. 半導体デバイスの故障解析

クラック面や破断面に現れる波模様は機械的疲労によるものを現し、この破面が皿形やラチェット形の場合は、この箇所に応力が集中していることを示します。

(6) パッケージクラック

クラックは外部湿気の侵入の原因となります。ハーメチックシールのガラスクラックは見逃しやすく十分注意して観察する必要があります。微小なクラックに対しては、蛍光浸透液による検査が有効です。

(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。金属顕微鏡・EPMA などによる調査が有効です。

5.3.4 電気特性評価

(1) LSI テスタによる評価

設計評価用のテストプログラムなどを用いて、故障した試料の詳細な電気特性を評価します。図 5.1 に示したように、電気特性評価の結果に基づいて故障モードの分類・故障メカニズムの推定を行い、以降の解析方法を決定します。電気特性評価では、故障発生状況から推定した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、これに基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。

メモリ LSI では、この評価で詳細なチップ上の故障位置を特定できる場合もあり、電気特性の詳細な評価は極めて重要になっています。

(2) DC 特性評価

カーブトレーサ・微小電流計・オシロスコープなどを用いて、チップの DC 特性を調査する試験です。実際の LSI では、チップ内部の等価回路には記されていない寄生ダイオードなどが存在し、等価回路だけに起因して電流が流れるとは限らないため、良品チップの特性と比較しながら試験をすることが望まれます。

(3) 論理/故障シミュレーション解析

LSI テスタ、DC 特性評価などの試験により機能テストがフェイル判定された場合、機能テスト内容を分析することでチップ内部の故障モジュールを推定します。さらに電圧・温度・周波数などのテスト条件によるフェイル状況から故障モードを推定します。これらの情報を活用し、論理シミュレーションまたは故障シミュレーション環境を用いて故障箇所の論理機能部位を高精度に推定することを、一般的に故障診断と呼びます。故障診断によりチップ内部の 10 セルまたは 10 ネット程度に故障位置を推定することで、故障箇所同定精度を向上させます。故障診断には、故障シミュレータを用いた故障辞書法、経路追跡型診断法、ガイドドプローブ診断法、IDDQ テストを用いた診断法があります⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。IDDQ テストとは、完全な CMOS 構造では電源系に DC パスがなかったことを利用して、動作静止中の電流値を測定することでパス/フェイル判定する手法です。IEEE では Quiescent power supply current in MOS circuits と定義され、CMOS 発明以来の歴史的なテスト手法です。

故障診断を用いた故障解析フローを図 5.2 に示します。故障診断フローは、機能テスト不良と電流系(DC/IDDQ)

テスト不良に大別されます。機能テスト不良では、故障シミュレーションを用いた故障診断を実施し、故障箇所同様に EB テスティング/LVP/TRE 解析等の動作解析を実施します。電流系テスト不良では発光解析/OBIRCH 解析等の静的解析を実施します（これら故障箇所同定に関しては 5.3.6 項チップ内部故障箇所の特定を参照）。

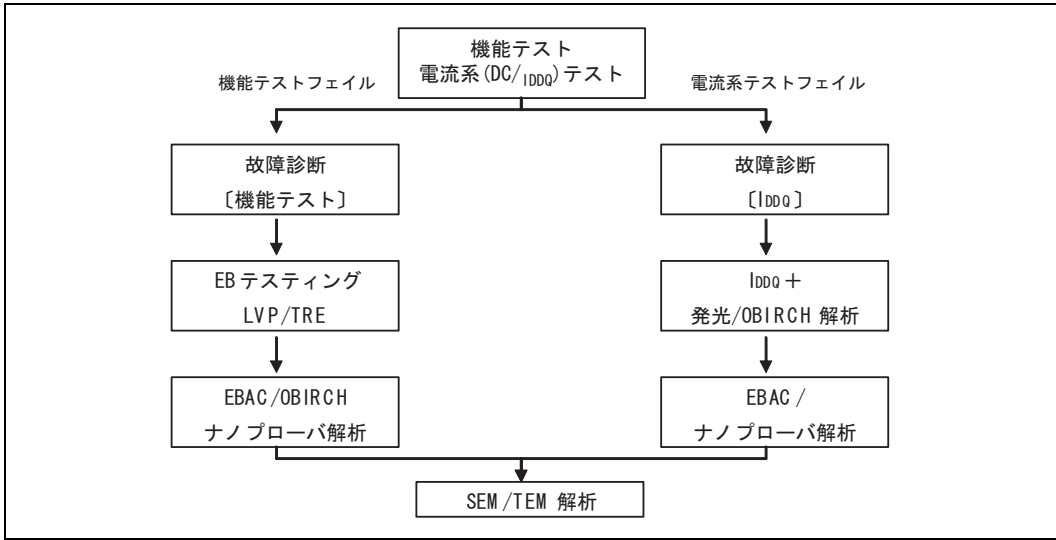


図 5.2 故障診断を用いた解析フロー

ルネサスで実施している機能テスト不良に用いる故障診断および電流系テスト (IDDQ テスト不良) に用いる故障診断の概要をそれぞれ図 5.3 および図 5.4 に示します。機能テスト不良は、不良案件ごとに論理解析/故障辞書作成などの手続きが必要であり、解析に時間を要します。しかし社外不良品など市場環境のシステムでしか誤動作しないような場合にはお客様のシステムの動作を再現させ不良箇所を突き止めるのに本手法は有効かつ必要なシステムです。IDDQ テスト不良は、あらかじめ故障診断に必要な故障辞書を作成しているため、故障診断の処理は高速になります。また論理機能的な解析も必要としません。IDDQ テスト不良はハード解析装置との相性も良く、機能テスト不良に比べ短時間に故障箇所を同定できる利点を有しています。

5. 半導体デバイスの故障解析

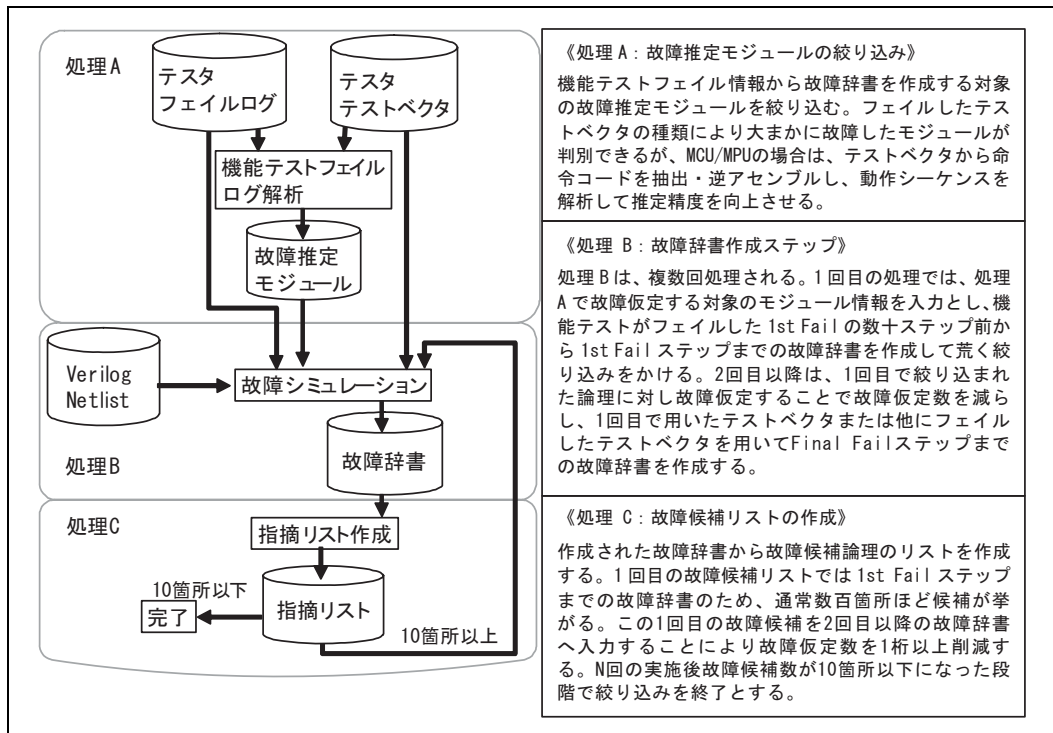


図 5.3 機能テスト不良故障診断フロー

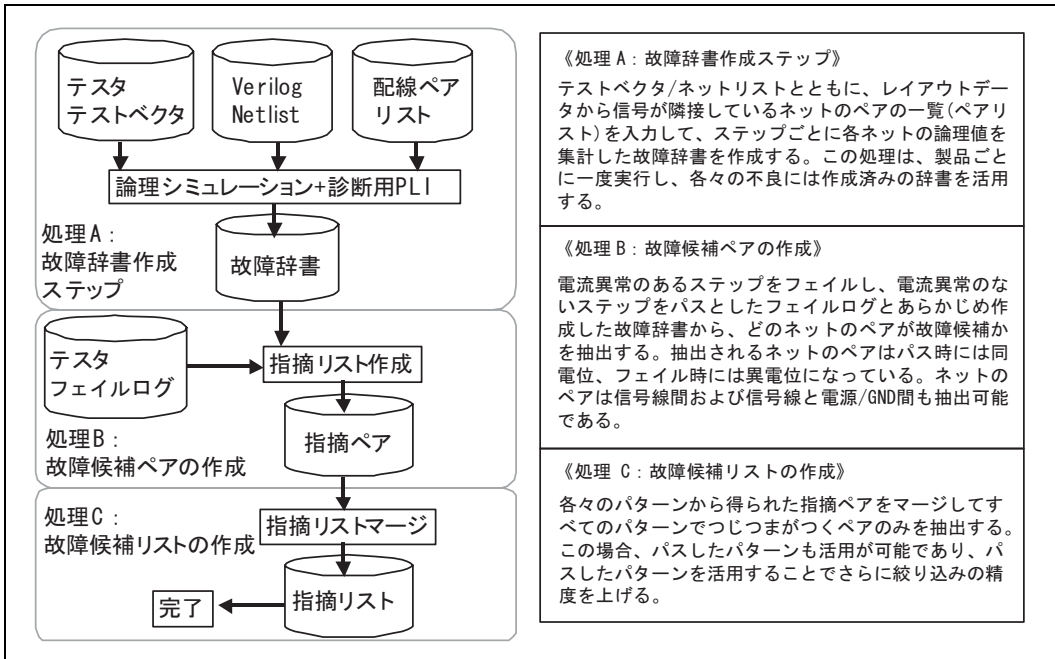


図 5.4 電流系テスト不良故障診断フロー

(4) 実装置による故障再現実験

上記の試験で良品と判断された場合、実装置での再現実験を行う必要があります。故障発生時の状況を各種試験においてシミュレーションしきれずに故障を再現できなかった場合と、デバイスの使用上に問題 (例えば、回路定数・ノイズなどによる誤動作) があって故障発生した場合とが考えられます。故障内容によっては、これらの試験を実施することにより、二次破壊を起こす可能性があるため、実施には十分な注意が必要です。

5.3.5 パッケージ内部解析

(1) 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手段として、X線透視・赤外線観察・超音波探査による方法があります。X線は材質・厚みにより透過度が異なるため（原子量が小さいと透過率が高い）透過X線の強度の差が像として得られ、パッケージ内部での異物の有無、ボンディングワイヤの断線およびループ異常、樹脂モールド内およびダイボンディング部でのボイド・剥離など、パッケージ内部の状態観察に適しています。（図 5.5）

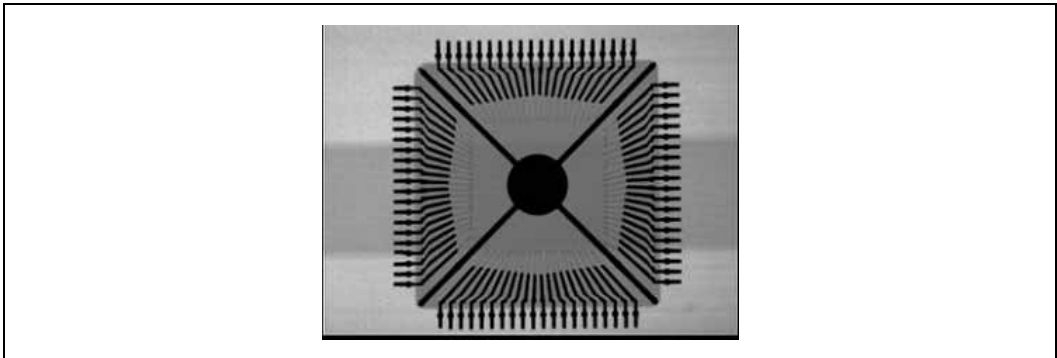


図 5.5 X線透視によるパッケージ内部の観察例

赤外線はシリコンを透過し、金属・樹脂に対して反射します。樹脂モールドされたデバイスでは、薬品を用いて樹脂を除去しチップ表面を観察した場合、薬品により不純物や配線などが除去され、故障原因の特定が困難な場合があります。パッケージを裏面から研磨し、シリコン面を露出させて赤外線を照射することで、ダメージを与えずにチップ表面の金属配線やボンディングパッド部の異常を観察することができます⁽⁵⁾。

超音波は、異種物質の境界面が存在すると反射波と透過波に分かれます。反射波は、異種物質の音響インピーダンスに依存して強度・位相が変化します（音響インピーダンスを大から小に変化すると位相が反転する）。

水中に樹脂モールドされたデバイスを置き、パッケージ表面に超音波を照射すると、パッケージ表面・チップ表面・リード表面から次々に反射波が返ってきますが、境界面に空気層が存在している箇所では反射強度および波形の位相が大きく変化します。これを利用してパッケージ内に生じたボイド・剥離・クラックの位置および発生の状況を知ることができます。（図 5.6）⁽⁶⁾。

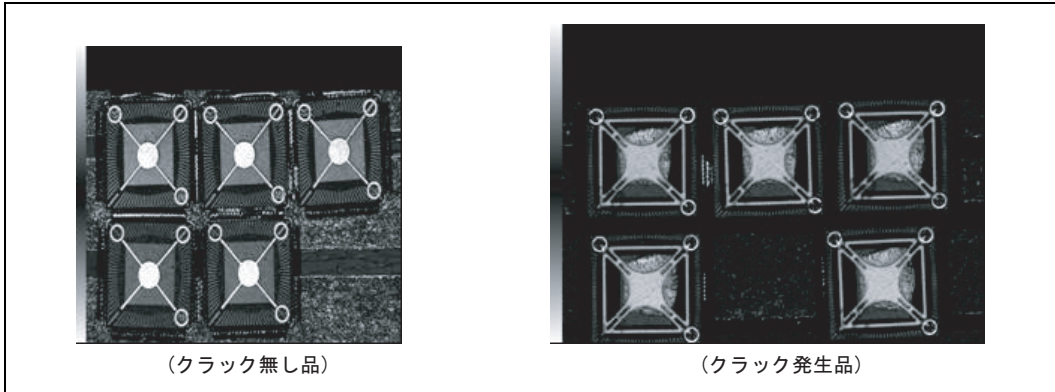


図 5.6 超音波探査によるパッケージ内部のクラック観察

(2) 封入ガス分析

キャンタイプ・セラミックタイプなどのパッケージで、チップ表面の汚染が故障原因に考えられる場合、パッケージ内に穴を開け封入ガスの成分・濃度を調査する必要があります。

(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、乾燥空気や窒素ガスを封入して外部と遮断されています。パッケージ内に水分が存在するとチップ表面の不純物イオンの動きを容易にし、デバイスの特性を劣化させ、Al配線の腐蝕を引き起こす要因になります。このため封入雰囲気の水分量は数百 ppm 以下に抑えられており、リーク量も極度に制限されます。一般的な気密性の調査方法として、トレーサガス（ヘリウム）によるファインリーク測定と、フロロカーボンによるグロスリーク測定があります。

10^{-8} から 10^{-9} atm・ml/s の範囲のファインリーク測定には、ヘリウムトレーサガスを使用したリーク検出器が用いられ、 10^{-9} atm・ml/s 以下のリークを読み取るのに十分な感度を持ちます。

比較的リーク量が多い 10^{-3} から 10^{-5} atm・ml/s の範囲では、フロロカーボンによるグロスリーク測定を用います。 10^{-5} atm・ml/s 以下の場合、減圧/加圧容器が必要です。

これらの方法で、パッケージの小さな割れ、ろう材やはんだの小さい“巣”、溶接フランジのピンホールなど、ハーメチックシール部の異常検出が可能です。

5.3.6 チップ内部の故障箇所の特定

(1) 概要

チップの故障解析では、まずフォールトアイソレーション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実施して故障の原因を確定します。

フォールトアイソレーションでは、電子ビームテストング・LVP・発光・発熱・OBIC・OBIRCH などの手法を用います。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、パッケージを分解

5. 半導体デバイスの故障解析

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。

チップの故障にはいくつかの種類があり、それらに対して適切なフォールトアイソレーション技術は異なります。出力の論理が期待値と異なるファンクション故障には、主に電子ビームテスト・LVPを用います。電源電流が増加するなどのリーク系故障には、主に発光解析・OBIRCH法などを用います。また最近では、上記の手法である程度、故障箇所を絞り込んだ後にダイレクトに微細回路部の電気特性を測定できるナノプローブ法などを用いることにより、さらに詳細な故障箇所の特定が可能となります。

(2) パッケージ開封方法

(a) キャンタイプ

キャンの上部周囲を小型旋盤で切り込み切断(パイブカットの要領で)するか、やすりで穴の開く寸前まで削り、金属用ハサミで切れる厚さにして、一部に小さい穴をあけ、はさみを挿入して切り取ります。いずれの場合も金属粉を内部に入れないようにするとともに、インナーリードおよびシリコンダイに傷を与えないよう十分留意しなければなりません。

(b) セラミックパッケージ

セラミックを薬品で溶解することは非常に困難であり、機械的に除くほかありません。ニッパ等でセラミック接合部や低融点ガラス接着部などの比較的破壊しやすい所から、内部に欠陥が入らないよう慎重に割ります。

(c) プラスチックパッケージ

溶剤で溶かす方法と、プラズマによる乾式の2つの方法があります。モールドタイプのプラスチックパッケージを溶剤で溶解させる場合には、発煙硝酸、最近では一部で発煙硫酸を用いることもあります。蒸気が発生するので必ずドラフトを使用し、廃液処理にも配慮しなければなりません。市販のパッケージオープナーを用いるか、もしくは、あらかじめドリルにより穴開けを行った後、発煙硝酸などを滴下してチップ領域のみに窓開けを行います。この場合、デバイスを電氣的に破壊させないように十分注意しなければなりません。プラズマによる乾式開封では、溶剤を用いる場合よりもチップ表面の状態が保たれるためエッチングに長時間を要します。

(3) チップコーティング膜の除去

使用材料は、シリコン樹脂とポリイミド樹脂に大別されます。シリコン樹脂は、ウレゾルプラス(商品名)、ポリイミド樹脂は PIQ エッチャント(商品名)で除去します。ポリイミド樹脂は、プラスチックパッケージの開封時に一般的に使用される発煙硝酸でも除去されるため、プラスチックモールドの場合はパッケージ溶解時に同時にほとんど除去されます。

(4) フォールトアイソレーション

(a) 機械的ブローピング

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あり、古くから広く用いられている手法です。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

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行われます。また、RIE (Reactive Ion Etching) を用いることで上層配線を残したまま層間絶縁膜の除去が可能になり、下層配線の測定も可能になります⁽⁸⁾。ただし、これら絶縁膜を除去する行為は、配線間容量を低減させるため故障を再現にし、解析できない状態を作り出すこともあります。このような可能性がある場合には、下層配線に接続させたタングステンパッドをチップ表面に形成し、このパッドに針を当てる方法を用います。この方法は、絶縁膜の局所エッチングと局所領域でのタングステン膜の堆積が可能な集束イオンビーム(FIB : Focused Ion Beam)を用いることで実現できます⁽⁹⁾。

(b) ナノ・プローバ解析

ナノ・プローバは先端径がサブミクロンのプローブを任意の電極や配線、コンタクトに当て、デバイス単体の電気特性を評価する技術です(図5.7)。この技術により、不良箇所をTEM観察レベルにまで絞り込めるため、不良原因を物理的に突き止めることが容易となりました。さらに不良箇所の電気特性がダイレクトに評価できるため、物理的な不良原因から不良症状に至るまでのメカニズム解析に重要な指針を与えます。適用対象は開発不良、量産不良だけでなく、お客様の側での不良に対しても解析の確実性が高くなるため、有効なものとなります。主要スペックを表5.1に示します。

この技術は日立製作所 中央研究所との共同開発により実用化したルネサスの独自技術です(2004年11月より日立ハイテクノロジーズが製品を販売開始)。本装置ではプローブ先端や試料表面を観察するためにSEMを用います。そのため、プローバ全体は真空チャンバ内に設置され、試料や探針を迅速に交換するための交換室を備えています。また、評価箇所をSEM像中で探し出すためのCADナビゲーションシステムも備えています(図5.8)。解析事例を図5.9に示します。SRAMは不良ビットが特定されても1ビットが6 MOSで構成されているためTEM観察は実施できません。この事例では不良ビット及び付近にある各MOSの特性から、あるコンタクト(C)が不良であることが特定され、不良コンタクトのTEM解析、プロセス対策が可能となりました⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

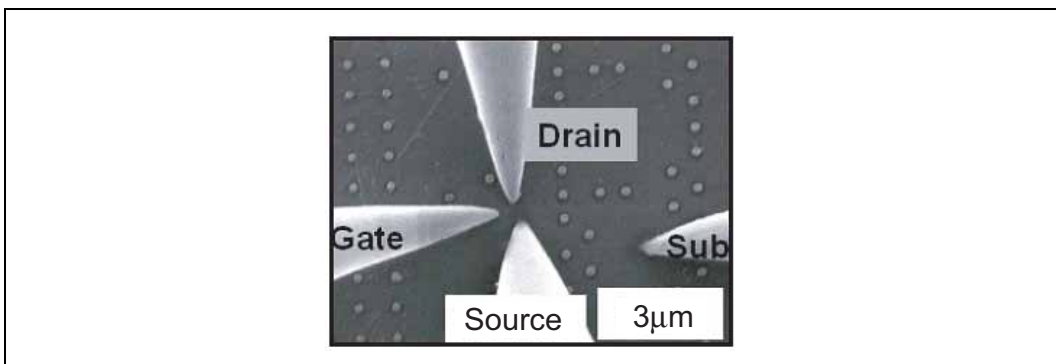


図 5.7 ナノ・プローバ測定時の SEM 像

5. 半導体デバイスの故障解析

表 5.1 ナノ・プローバの主要スペック

評価対象	全製品 (65nm~)
探針数	最大 6
電流検出下限	$< 10^{-14}$ A

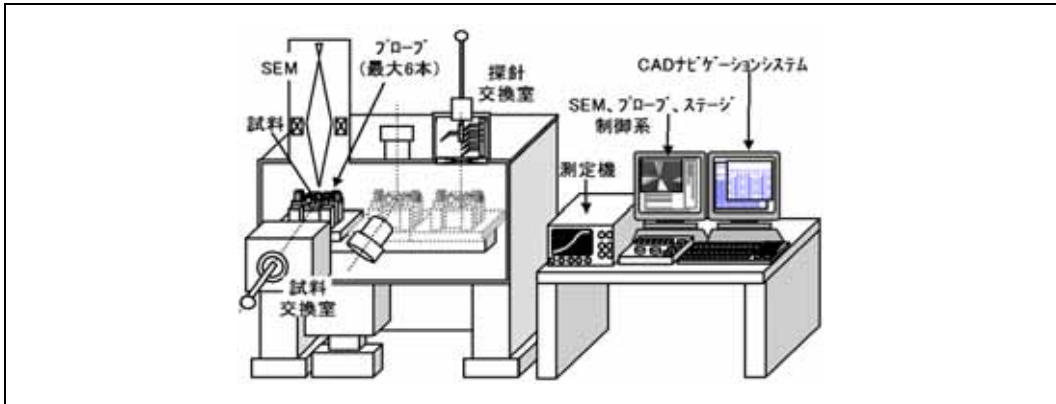


図 5.8 ナノ・プローバ装置 (開発元: ルネサス)

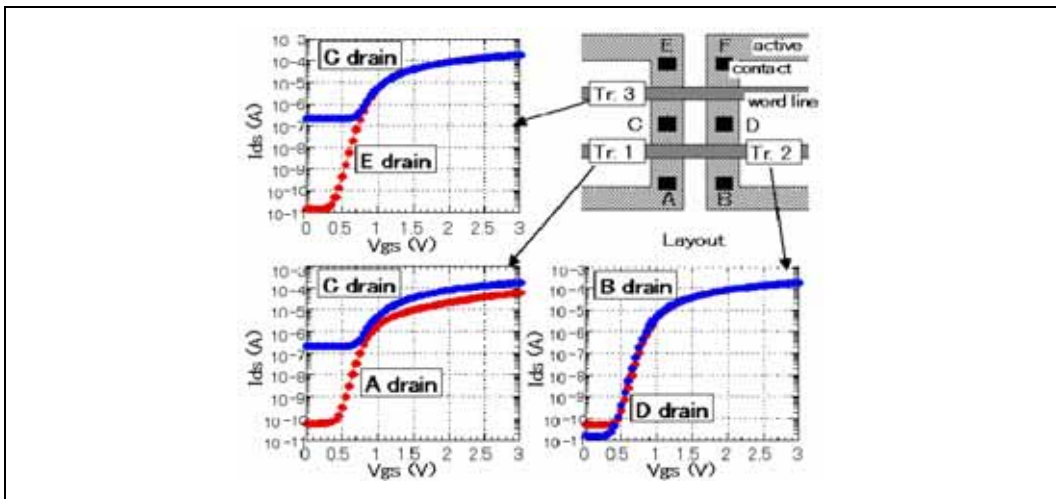


図 5.9 ナノ・プローバ測定例

(c) 電子ビームテスト

LSIテスト等によりデバイスを動作させた状態でチップ表面に約0.1 μ m径の電子ビーム(EB)を照射し、非接触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⁽¹⁴⁾ (図5.10)。従来の機械式プロービングに比べ操作が容易でかつ非接触であるため、無負荷・高インピーダンスで測定可能で、波形のタイム

ングなどを高精度で測定することができます(周波数帯域~7GHz)。

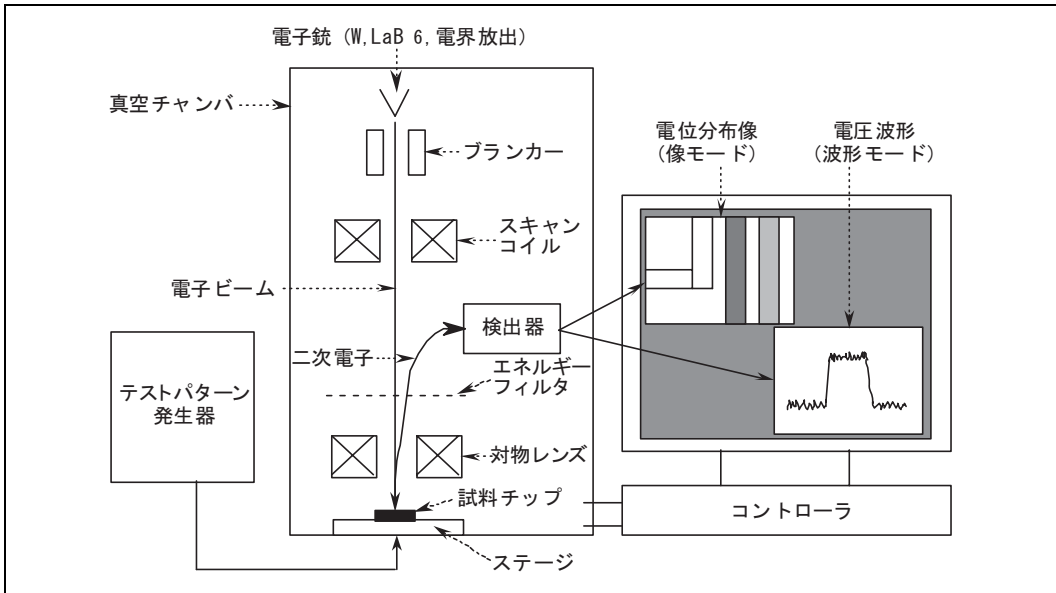


図 5.10 EB テスタ概要図

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二次電子が、プラス電位からエネルギーの低い二次電子が発生し、エネルギー分析するとマイナス電位からの二次電子がプラス電位より多く検出されるため、図5.11に示すようなコントラスト差が生じ配線上の電位分布を知ることができます。また、パルス化した電子ビームを配線上に照射し、照射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、サンプリングオシロスコープの原理と同様に図5.12のような電圧(タイミング)波形が得られます。電子ビームテスト(EBT)で得られる情報は波形などの論理・タイミング情報であるため、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⁽¹⁵⁾や、実測した波形と論理シミュレーション波形とを比較する手法⁽¹⁶⁾などを用いて配線(ノード)をトレースし、故障箇所を絞り込みます。また近年、大規模ロジックデバイスに対応するため、レイアウトやネット情報とリンクしたCADナビゲーションツール(図5.13)の活用や、多層配線デバイスに対応するためのFIB(集束イオンビーム)加工による下層配線の露出・パッド出しが必須となります。さらにチップ裏面の加工技術(機械研磨、レーザー、FIBなど)の開発とともに、裏面からの測定アプローチも検討されています⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

5. 半導体デバイスの故障解析

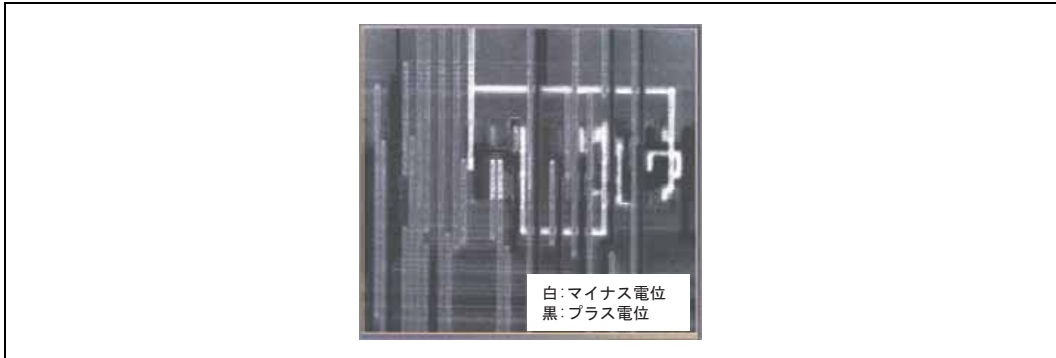


図 5.11 EBT 電位分

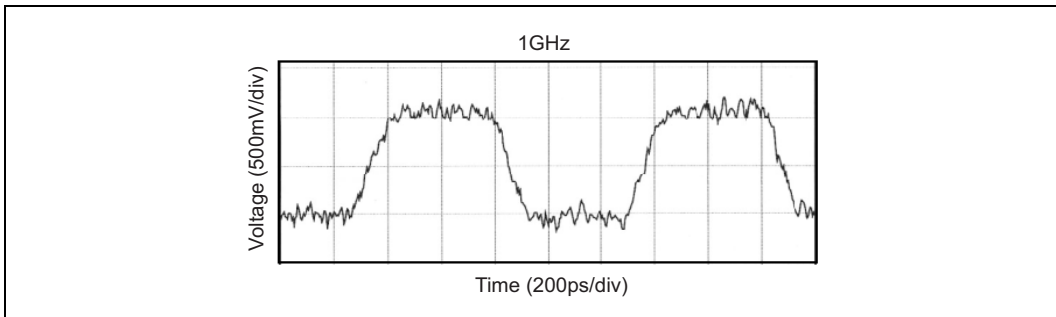


図 5.12 EBT 電圧波形

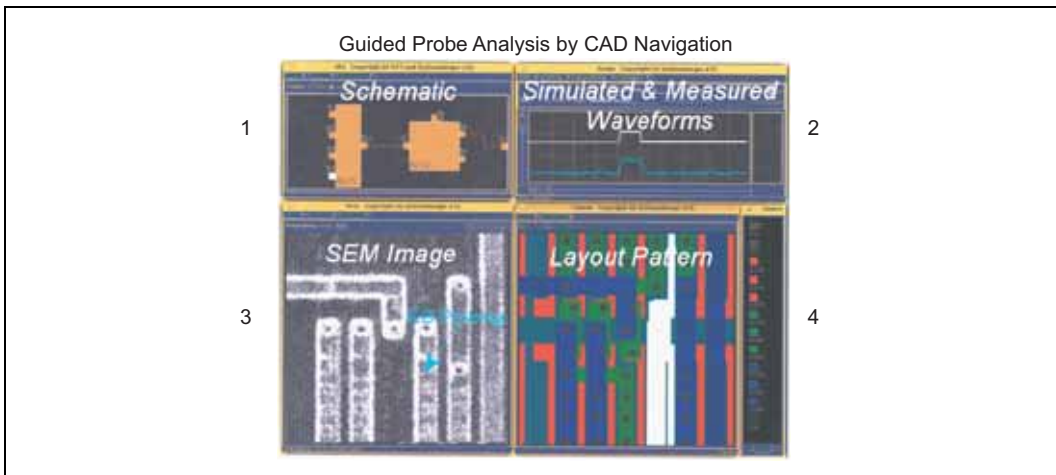


図 5.13 CAD ナビゲーションツール

(d) レーザボルテージプロービング/時間分解発光解析

電子ビームテスト(EBT)では波形測定できないFlip Chipデバイスや多層配線デバイスに対して、チップ裏面から光学的にチップの内部回路の電位波形やタイミングを測定する方法です。EBT同様LSIテスト等によりデバイスを動作させた状態で、無負荷・高インピーダンス測定が可能です。波形のタイミングなどを高精度で測定することができます(周波数帯域~9GHz)。

- レーザボルテージプロービング(LVP)

チップ裏面に約100 μm 厚に鏡面研磨した後、0.5~0.7 μm 径のパルス化した近赤外レーザービーム(波長1064nm)をSi基板裏面から透過させ、動作トランジスタ拡散層(ドレイン)に照射することにより反射光を検出します(図5.14)。PN接合に電界がかかっている場合はバンドギャップが縮退し、入射レーザーの吸収率が上がり反射光強度が小さくなります(Franz-Keldysh効果)。さらにPN接合での電位差によるキャリア密度の変化から反射光に位相差が生じます。この位相差とFranz-Keldysh効果による反射光強度変化を時間軸に対して検出することで、非接触でチップ内部のトランジスタ拡散層における電位波形を測定できます⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。パターン観察およびプロービングはレーザー走査像(図5.15)を用いますが、EBTと同様に得られる情報は波形などの論理・タイミング情報(図5.16)になるため、故障箇所を特定するには期待値情報との比較が必要です。レイアウトやネット情報とリンクしたCADナビゲーションツールを活用して、トランジスタをトレースすることにより故障箇所を絞り込みます。

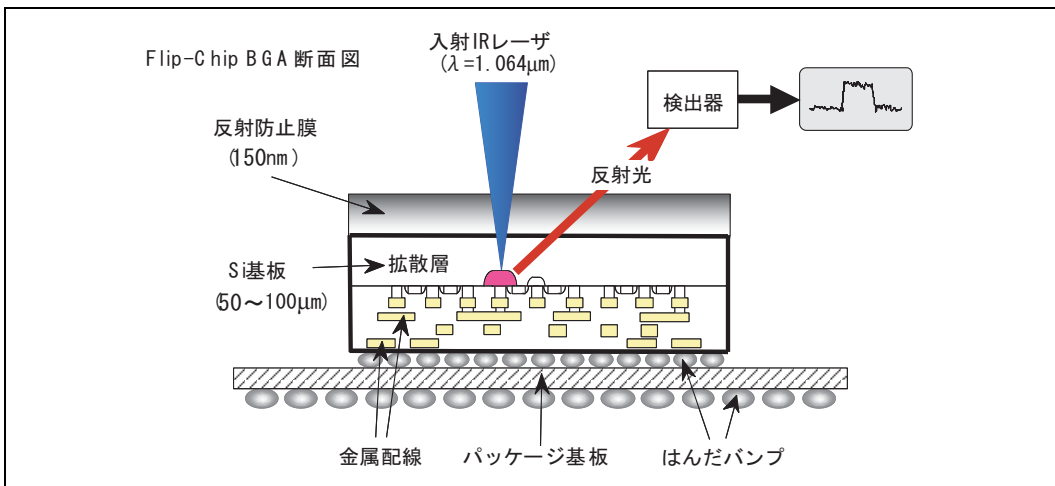


図 5.14 LVP 原理

5. 半導体デバイスの故障解析

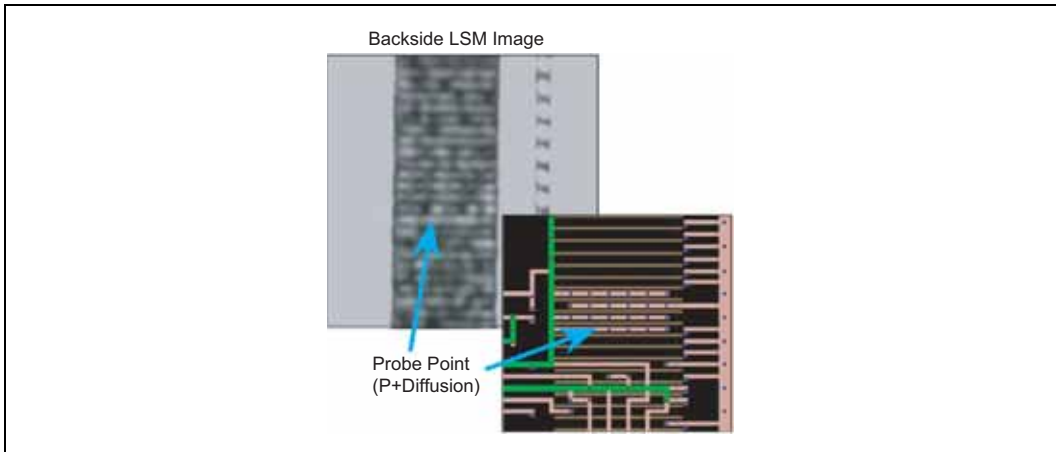


図 5.15 レーザ走査像/レイアウト

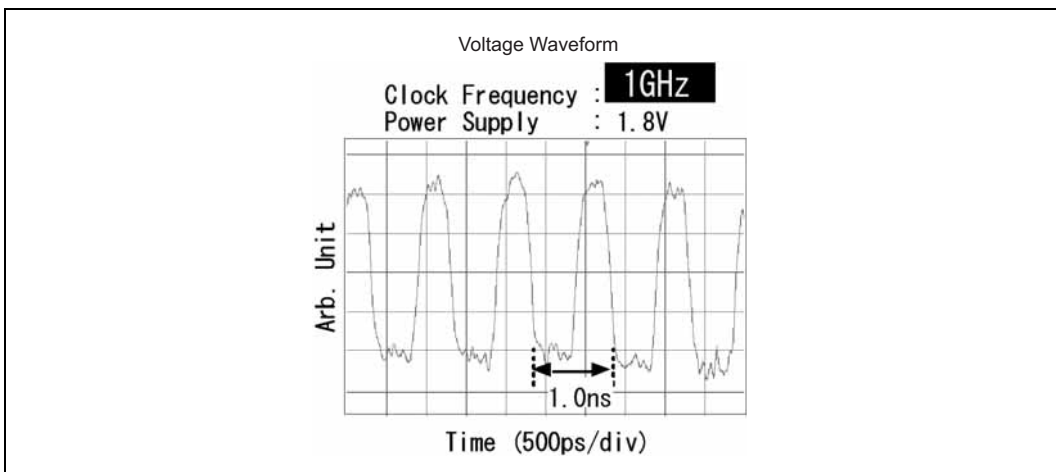


図 5.16 LVP 電位

- 時間分解発光解析(TRE)

チップ裏面を約100 μm 厚に鏡面研磨した後、Si基板裏面からトランジスタのスイッチング時(遷移状態)に発生する微弱な近赤外の発光現象をpsオーダーで捉え、動作タイミングを測定する方法です⁽²¹⁾ (図5.17)。チップ裏面から漏れ出るわずかなフォトン量子効率約60%の超高感度時間分解赤外カメラで捉え、さらにSIL(固浸レンズ、NA=2.45)の集光効果により感度向上および空間分解能向上を図っています⁽²²⁾ (図5.18)。得られる情報はEBTやLVPのような信号波形そのものではなく、時間軸に対するスイッチング時の発光強度であり、これが動作トランジスタのタイミング情報となります。EBTやLVPと同様に、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あり、レイアウトやネット情報とリンクしたCADナビゲーションツ-

ルを活用し、トランジスタをトレースすることにより故障箇所を絞り込みます。

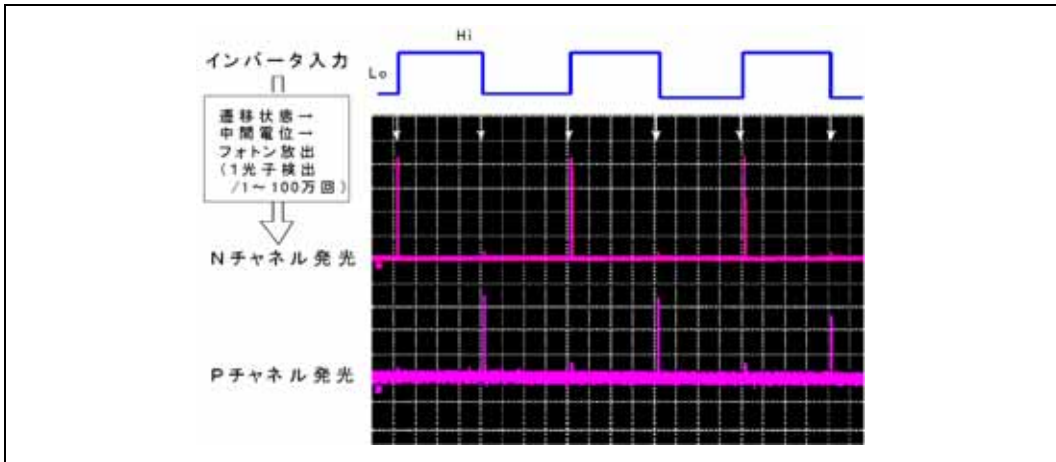


図 5.17 Nch/Pch トランジスタでの TRE 波形

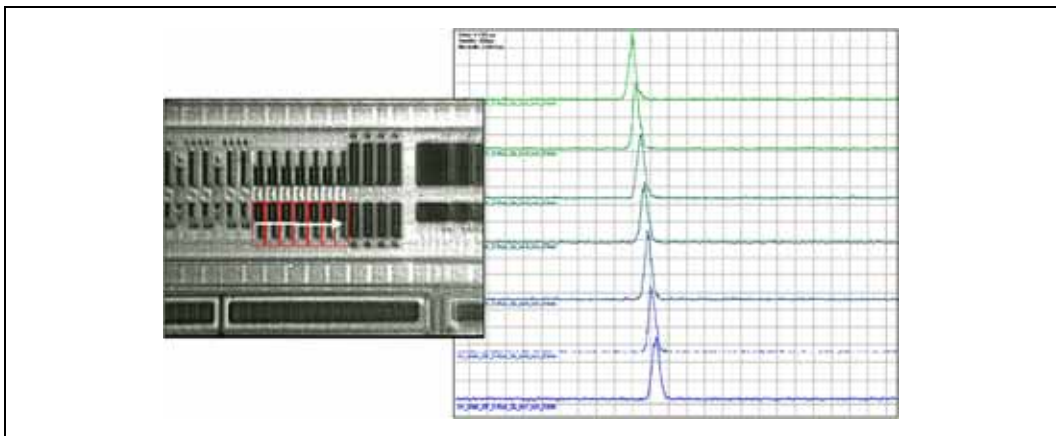


図 5.18 SIL を用いたインバータチェーン TRE 波形測定

(e) 発光解析

電流リークに伴って発生する極微弱な光を検出し、その位置と強度を二次元的な像として捉えることで故障箇所を特定する技術です。光の検出には、フォトンカウンティング（光子数計測）が可能な高感度検出器が使用され、発光像とパターン像（光学反射像）を合成させることによりチップ上の発光位置の特定を可能にしています（図5.19）。電流リークに伴うSi中の発光現象としては、トランジスタのチャネルリーク、PN接合リークなどの際に発生する高電界下でのホットキャリア生成による発光や、CMOSのラッチアップ現象のようにPN接合に順方向電流が流れた際に発生するキャリア再結合による発光があります。また、絶

5. 半導体デバイスの故障解析

縁膜中では高電界下でのマイクロプラズマ生成に起因した発光が知られており、ゲート絶縁膜リークやメタル配線間のマイクロショートなどの際の発光がそれにあたります。これらの発光はリーク箇所での電界に応じた連続光であり、通常、可視域から近赤外域に延びるブロードなスペクトル分布を有します（キャリア再結合による発光については、波長 $1\mu\text{m}$ 近傍（SiのEg相当）に急峻なピークを持つ波長分布となります）⁽²³⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。最近では、メタル配線の多層化に伴いチップ上面からの光検出は困難になってきています。このため、Si基板を透過する近赤外光（波長 $1\mu\text{m}$ 以上）に高感度を有する検出器の開発により、チップ裏面からの発光検出が普及し始めています。ウェハレベルでの発光検出の自動化により、故障箇所のウェハマッピングが可能になり、歩留まり向上解析においても重要な手段となります（図5.20）⁽²⁷⁾。

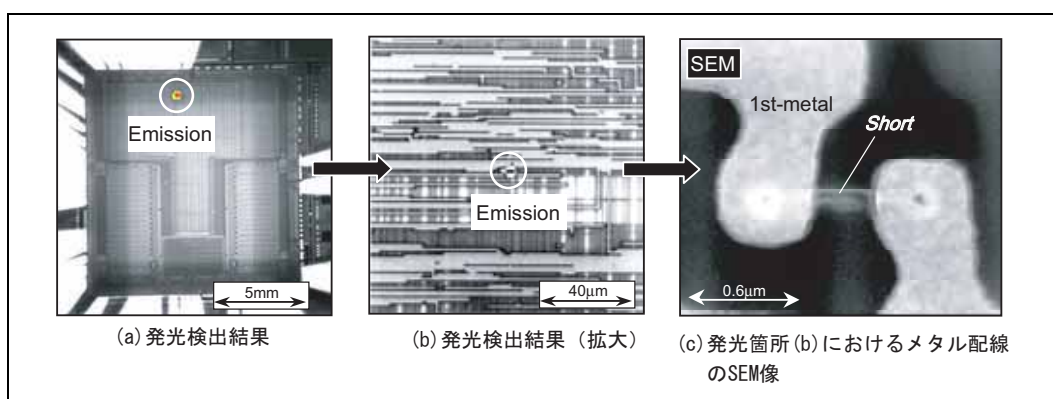


図 5.19 リーク故障における発光検出および物理解析例

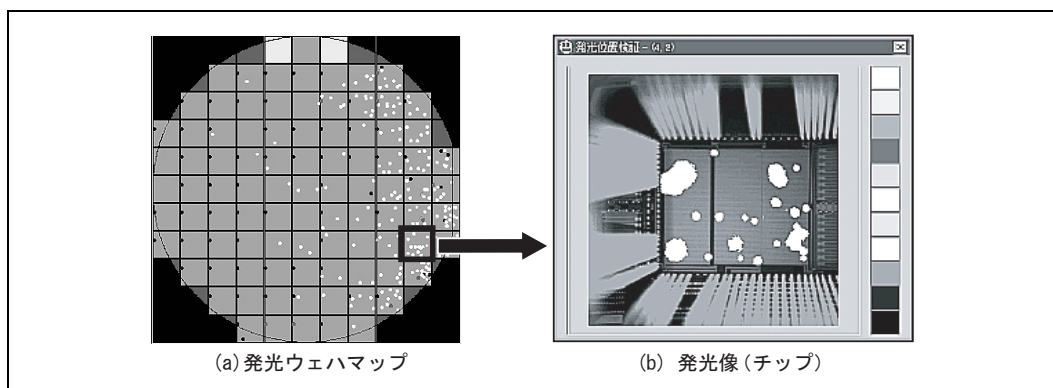


図 5.20 発光箇所検出結果の分布表示例

発光解析は、主に待機時電源電流（スタンバイリーク）等の静的な電流リーク故障の解析に使用されています。デバイスの動作テストと連携させることにより、機能故障の位置を特定することにも有効です。チップ内部の論理状態は、クロック信号に同期してテストベクタが更新されるたびに変わります。電源電流 I_{dd} は、内部の論理状態が切り替わる瞬間に増加しますが、スイッチ動作間の論理が固定されている状態では電流はほとんど流れません(CMOS回路の場合)。しかしながら、故障箇所が活性化される電位状態になった場合には I_{dd} は増加します。この動作途中の静的状態における電流 I_{ddq} (静止電源電流)を観測し、異常が観測されたベクタでクロックを止め、内部論理を保持した状態で発光を検出することにより故障箇所を特定することが可能となります⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。ロジックデバイスの故障箇所を特定する技術としては、前述のテスト結果に基づくソフト的な診断手法（5.3.4(3)項）や電子ビームテスト（5.3.6(4)(C)項）による内部電位波形を観測することによるアプローチがありますが、この I_{ddq} を利用した発光解析手法は、簡便でかつ多重故障や可観測性に対する制限がないといった特長があります。

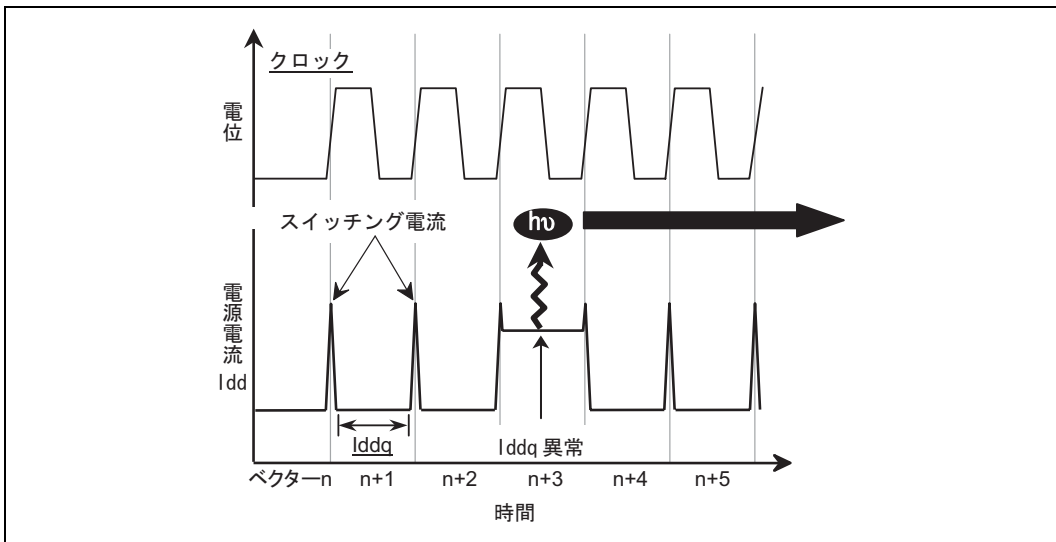


図 5.21 I_{ddq} の観測による発光観測ベクタの抽出

5. 半導体デバイスの故障解析



図 5.22 Iddq+発光解析によるロジック故障箇所検出例

(f) 発熱解析

チップ表面のリークによる発熱箇所を特定する手法で、液晶・赤外線放射温度計を用いた方法があります。液晶は、温度が上昇し相転移温度に達すると光学的性質が復屈折性から等方性に変化します。この変化は偏光顕微鏡により観察できます。チップ表面に液晶を塗布後、チップに電圧を印加すると異常箇所が発熱し、ホットスポット(黒点)として観察されます⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。赤外線放射温度計は、チップ表面から放出される赤外線(長波: 3~5µm)を検出することで、異常発熱箇所を検出する装置です(図5.23)。従来、実装基板の異常箇所の検出によく用いられていましたが、最近では空間分解能及び検出感度の向上により、チップ上のリーク箇所の検出やアルミ配線TEG(Test Element Group)の温度分布測定⁽²⁷⁾などに用いられるようになりました。

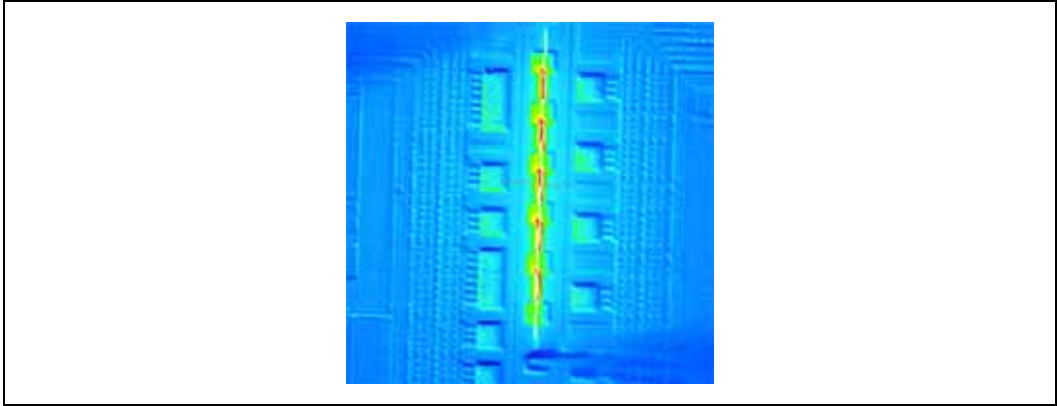


図 5.23 赤外線放射温度計による温度分布の観察

(g) レーザ顕微鏡による解析

レーザ光をデバイスに照射した際に起こる電流の変化を像に変換することにより故障箇所を特定する技術です。レーザ照射がもたらす物理現象としては光励起による効果と熱的な効果があり、両者を使い分けることにより異なる故障モードの検出が可能です。光励起による起電流を利用する方法は、OBIC解析(Optical Beam Induced Current)として知られ、起電流がSi基板中の結晶欠陥や内部電界の影響を受けることを利用してPN接合リークやゲート酸化膜リーク箇所の同定等に利用されてきました(図5.24)。OBIC解析では光起電流の微小な変化を捉えることにより異常箇所を可視化するため、発光解析のようにリーク箇所に電界を印加する必要がない反面、電源電流の変動を伴う動作状態での解析は不可能であること、解析対象がSi基板表面近傍に限定されること等の制限があります。一方、レーザ照射による熱的な効果を利用する方法は、メタル配線やビアの故障箇所(高抵抗箇所)を特定する手段として近年確立され、普及しています。最も一般的な手法は、レーザ照射時の発熱による電気抵抗の変化が故障箇所異なることを利用する“OBIRCH法”(Optical Beam Induced Resistance Change)があります⁽³³⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾。ポイド等の高抵抗箇所ではレーザ照射された際の温度上昇の程度が他に比べて大きくなるため、電気抵抗の変化(増加)も大きくなります。この抵抗の変化を観測電流の変化として捉え、ビーム走査と同期させて輝度変換することにより、故障箇所を画像として捉えることが可能となります。この方法では、故障箇所に電流を印加する必要がありますが、逆に電流が流れる配線を可視化することが可能であるため、リーク電流経路(故障ノード)の特定手段としても利用できます(図5.25)。また、レーザ照射時の発熱による熱電効果に基づく極微弱な起電流を直接検出することにより、故障箇所を可視化する方法も同様に活用されています⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾。これらのレーザビームを加熱源として利用する方法では、OBICに対して極微弱な電流変化を検出するため、光起電流の影響を受けない波長 $1.3\mu\text{m}$ 程度のレーザを使用します。また、前項の発光解析の場合と同様に、メタル配線の多層化に伴いチップ上面からの解析は困難になっており、近赤外レーザ(波長 $1\mu\text{m}$ 以上)を用いたチップ裏面からの解析が一般的になってきています⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。

5. 半導体デバイスの故障解析

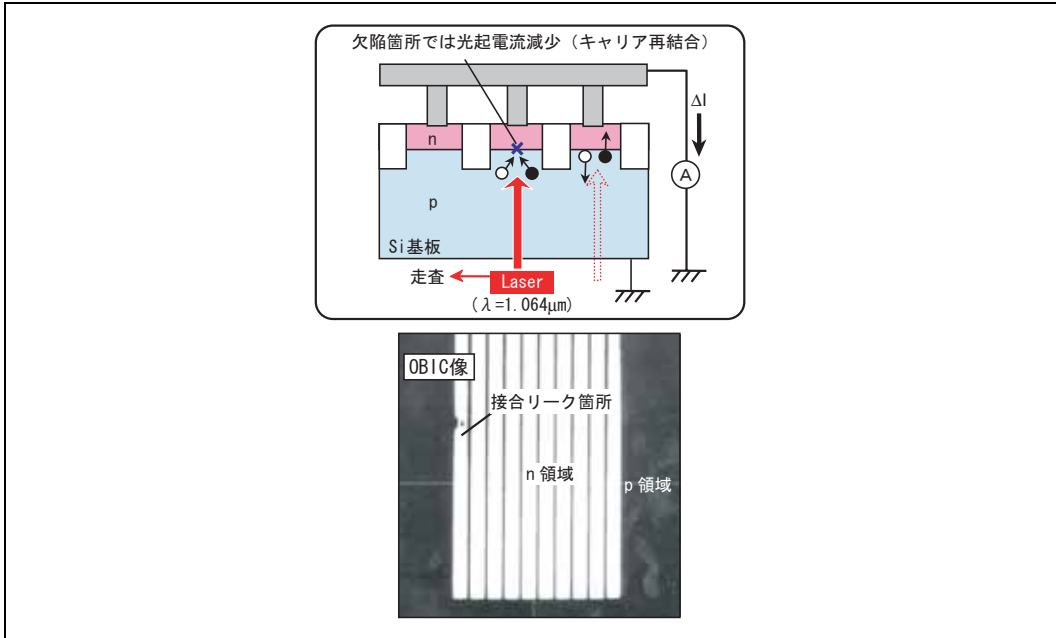


図 5.24 裏面 OBIC 解析例 (PN 接合リーク)

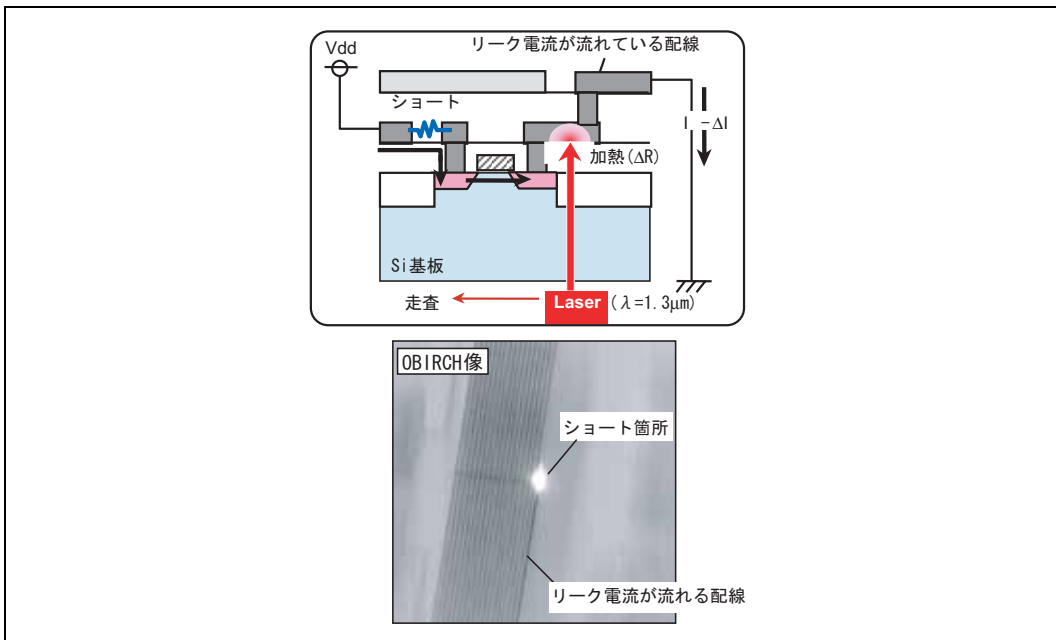


図 5.25 裏面 OBIRCH 解析例 (リーク経路検出)

5.3.7 チップ物理解析

(1) 概要

物理解析は、チップに種々の加工処理を実施しながら特定した故障位置を観察・分析し、故障を引き起こした物理的な原因を明らかにするための解析で、設計・プロセスにフィードバックをするための最終的な情報を提供します。

故障原因となる物理的な異常は、チップの最表面から下層の位置に存在する可能性があり、このような場合には、表面の絶縁膜や金属配線などを除去しなければなりません。この作業は、光学顕微鏡やSEMで状態を観察しながら実施されます。また状況に応じて、FIBなどでチップの断面を観察する必要もでてきます。さらに、故障箇所に変色や異物の付着などが発見された場合は、組成分析を行い、その発生メカニズムを明らかにします。

(2) 形状解析

(a) 除膜

除膜では、被除去膜とその下層膜との選択比、除去する膜の膜厚とエッチング速度との関係を考慮しながら、チップ上層膜から順次エッチングをします。確認には、光学顕微鏡または必要に応じてSEMを用います。チップを構成する代表的な成膜と、エッチング方法を表5.2に示します。また、近年、微細化、多層化されたLSIで主流のCMPプロセスを採用した先端LSIでは、化学的、物理的なエッチング方法よりも研磨法による除膜が一般的になってきています。

表 5.2 代表的な成膜とそのエッチング方法

	膜の種類	エッチング方法
パッシベーション膜	SiN	H ₃ PO ₄ ・プラズマ処理
	SiO ₂	HF・プラズマ処理
配線	Al	HCl/H ₂ O ₂ 混合液
	Ti/TiN	H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂ 混合液
	Poly-Si	KOH 水溶液・プラズマ処理
絶縁膜	SiO ₂ ・BPSG・TEOS などの酸化膜	HF・プラズマ処理

(b) 表面観察 (光学顕微鏡・SEM・EBSP・SPM)

表面観察は物理解析の基本であるとともに、種々の故障メカニズムを解明する上で極めて重要な手段です。一般的に、光学顕微鏡やSEMが用いられています。

- 光学顕微鏡

簡便な観察手段として古くから用いられており、SEMでは観察不可能なマクロな視野での観察(シミ状の汚染物など)、およびSEM観察前の前処理状態の確認に用いられ、現在でも物理的な解析において有効なツールです。

- SEM (Scanning Electron Microscope)

試料表面に電子ビームを照射したときに試料表面から放出される2次電子を検出し、この検出した2次電子の数を輝度変換して画像化する電子顕微鏡です。2次電子の数は、原子番号の大きさに伴って増加し、また試

5. 半導体デバイスの故障解析

料表面の凹凸の影響を受けて変化するため、試料表面の形状を観察することが可能になります。光学顕微鏡に比べ焦点深度が深く、最高のもので約0.5nmの空間分解能を持ちます。

- EBSP (Electron Backscatter Diffraction Pattern)

SEMの応用技術であり、結晶格子面での反射電子増の回折パターン（菊池線）を解析することで結晶方位を観測する手法です。近年SEM装置の改善とCPUの発達によって、簡便に測定データが解析可能となったもので、メタル配線のグレイン観察に有効であり、エレクトロマイグレーションの評価解析などに使われています。

- SPM (Scanning Probe Microscope)

先端を細くしたプローブ（プローブ）でサンプル表面を走査して情報を得る評価方法を総称を言います。SPMの中でもよく知られているものが以下に示すSTMとAFMですが、その他にもプローブとサンプル間の容量を測定して容量マッピングを行うSCM（Scanning Capacitance Microscope）や、プローブとサンプル間に流れる電流を測定して抵抗マッピングを行うSSRM（Scanning Spread Resistance Microscope）など、さまざまなアプリケーションが出てきています。これらの技術を使ってSi基板の不純物の拡散領域を可視化したり、ゲート酸化膜の破壊箇所や高抵抗viaを特定するなど、形状評価としてのツールだけにとどまらず、SPMのあらゆる評価への可能性が期待されています。

- 走査型トンネル顕微鏡 (STM : Scanning Tunneling Microscope)

STMはサンプル表面に接近させたプローブ先端とサンプル間に流れるトンネル電流が一定になるようにプローブ先端を上下に動かしながら走査させ、そのプローブの上下動によりサンプル表面の凹凸形状を観察する手法です。分解能は高くなりますが（垂直方向：0.001nm,水平方向：0.1nm）、評価サンプルは原理的に導電性のサンプルのみとなります。

- 原子間力顕微鏡 (AFM : Atomic Force Microscope)

AFMはサンプル表面に接近させたプローブ先端とサンプル間に働く原子間力によるプローブの上下動を検出して、サンプル表面の凹凸形状を観察する手法です。分解能は多少STMに劣りますが（垂直方向：0.01nm,水平方向：0.1nm）、絶縁体でも測定できる利点があります。

(c) 断面観察 (FIB・SEM・TEM)

金属配線・トランジスタ・コンタクト・ワイヤボンディングなどの状態観察や、チップ内部に異物が存在する場合における異物の付着工程の調査などに用いられます。断面観察には、研磨・劈開・FIB(Focused Ion Beam)・透過電子顕微鏡 (TEM : Transmission Electron Microscope) を用いた手法があります。

(i) 研磨

試料がハンドリングできる程度の大きさの場合、そのままカッティングし研磨できますが、ほとんどの場合、試料はこれより小さいために、樹脂に埋め込むか適当な治具に固定する必要があります。垂直研磨は観察部が小さいために、角度研磨が有効な場合が多いです。研磨は、最終的な仕上がり状態が得られる情報に大きく影響するため、最終の処理には細心の注意を払わなければなりません。最初に粗研磨で目的箇所の近傍まで研磨し、除々に研磨材の粒子を小さくするとともに研磨方向を90°ずつ回転させながら、前の研磨痕がなくなるように進めていきます。このとき、研磨傷・研磨だれなどが生じないように十分注意

します。研磨だれは、適当なエッチングを施すことで除去できる場合もあります。従来、半導体デバイスの故障解析においては、ワイヤボンディング箇所等の断面観察などに用いられてきましたが、最近では、研磨装置、研磨材などの進歩により、LSIチップ内部の観察にも十分耐えうる解析前処理になってきています。

(ii) へき開

金属配線・pn接合・トランジスタなどの微細構造を観察する場合には、チップをダイヤモンドカッタ等でへき開する方法が有効です。観察したい位置を精度よく選ぶことはできませんが、へき開後にプラズマエッチング・化学エッチングによる処理をすることで、トランジスタ構造などの輪郭を明瞭にすることができます。

(iii) FIB

細く絞ったイオンビームをチップ表面に照射し、スパッタリング作用を生じさせることで、チップ表面の指定領域をエッチングする機能を持ちます。さらに、イオンビームを試料表面に照射すると二次電子が放出されるため、SEMと同様に像観察も可能です。この2つの機能を用いることで、チップ上の指定した微小領域を加工し断面を露出させることができます⁽⁴³⁾。像観察によりエッチング状態を確認しながら加工を進めることができるため、チップ上の断面観察したい位置をサブミクロン以下の精度で容易に選択することができます。FIBで加工した後の断面観察には、FIBに比べ空間分解能が高いSEMが一般に用いられます(図5.26)。

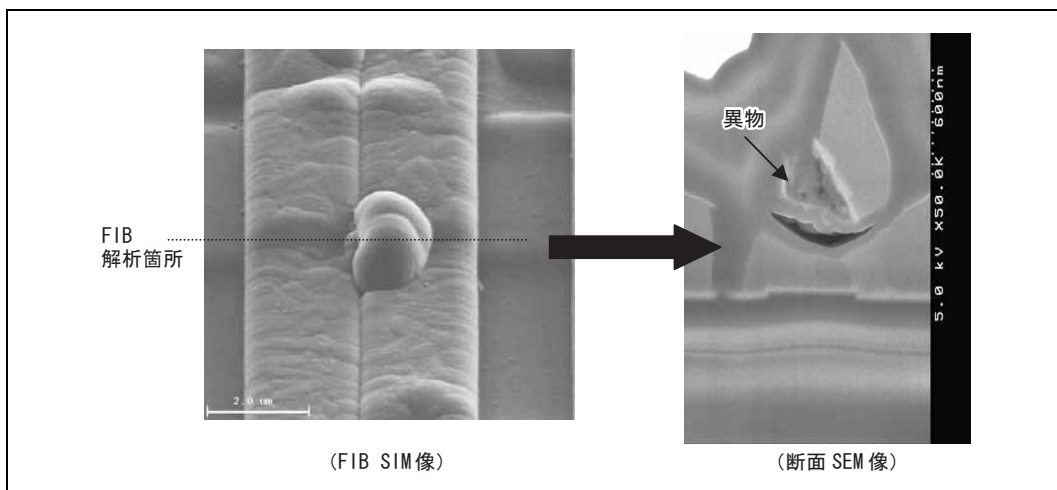


図 5.26 FIB 加工後のチップ断面を SEM で観察

(iv) TEM

TEMは、高電圧で加速した電子ビームを試料に照射し、この試料を透過した電子を検出することで像観察を行う電子顕微鏡です。空間分解能が非常に高いですが(通常200keVで0.2nm)、チップ断面を観察するためには、観察したい部分をチップの垂直方向に0.1μm以下の薄膜に加工する必要があります。この加工にはFIBが用いられ、観察したい位置を高い精度で選択することができます⁽⁴⁴⁾。前述のFIB加工→SEM観察による方法に比べ高い空間分解能が得られます。

5. 半導体デバイスの故障解析

(d) 観察のポイント

(i) 過大電圧・電流による断線・短絡・リーク

外部からの異常電圧・電流により、メタル配線または多結晶シリコン抵抗の溶融が見られます。電流が大きい場合には、内部リードが溶融していることもあります。さらには、pn接合(バイポーラの場合エミッターコレクタ間など)に異常合金が観察される場合もあります。酸化膜が絶縁破壊され、メタル電極間が短絡状態になっていることもあります。

(ii) 内部リードの断線

X線透視・パッケージ開封後の顕微鏡観察により調査します。ボンディング部から剥離している場合は、剥離部の合金状態、ボンディング部の位置ずれの有無などを調査します。AuとAlは高温で種々のAu-Al金属間化合物を形成します。Auの拡散速度がAlより遅いため、二つの層を通る質量移動により境界が移動し、空孔が生じる(Hartley-kirkendall効果)結果、ボンディング部の強度劣化・抵抗増加・剥離が生じることがあります。

(iii) Al配線の腐蝕

外部からの湿気の侵入、リン酸(パッシベーション膜からの遊離P2O5)や塩素イオン・プロセスでの化学処理の不備、異種金属の接触による電池作用および電界などにより、Alが腐蝕し断線に至ります。断線箇所はAlが完全に溶出していることが多く、隣接するAl配線間で短絡する場合があります。腐蝕したAl配線は黒く変色していることが多く、チップ表面の光学顕微鏡観察により容易に判断できます。この故障モードは、樹脂溶解時のエッチング時間・温度・液の種類によって、Al腐蝕を進行させることがあるので注意を要します。したがって、樹脂の溶解にはプラズマによる乾式エッチングを用いる場合があります。

(iv) チップクラック

シリコンチップにクラックが生じ、開放・短絡・リーク不良となるものは熱ストレスによる場合が多いです。チップ表面を横切る不規則な[線条]が発生するため、倍率を上げて観察しないと見逃すこともあります。クラックがパッシベーション膜にとどまっている場合があるため、パッシベーション膜を除去して調べる必要もあります。赤外線顕微鏡を用いるとクラック部の歪みが顕著になるため、通常顕微鏡よりも観察しやすくなります。

(v) マスク合わせ不良

拡散・コンタクトホール・メタル配線などが異常にずれているものは、種々の故障を引き起こします。故障と結びつけるためには、pn接合・コンタクトホール・配線など、それぞれ領域の位置関係を詳細に調べなければなりません。

(vi) コンタクト不良

コンタクトホールのステップ部での断線、オーミック不良、ウェハプロセス異常によりコンタクト部に高抵抗層が生成されたことによるコンタクト抵抗の増加、あるいはコンタクト開口不良などがあります。これらのコンタクト不良の調査には、FIBによる断面観察が有効です。

(vii) 異物付着

チップ表面および内部に異物が付着し、故障の原因となります。異物が存在する層を調査し、異物の成分を同定することで異物の付着工程、および発生原因の推定が可能になります。異物が存在する層は、FIB

による断面観察で明確になります。異物の同定には、EPMAまたはSAM (Scanning Auger Microscopy)による分析が有効です。しかし、解析中の不注意により異物が付着する場合がありますので、注意を要します。

(viii) 静電破壊不良

MOSのゲート酸化膜は非常に薄いため、絶縁耐量は小さくなります。人体、あるいは検査装置から出る異常パルスがデバイスの耐静電エネルギーを上回ることで破壊に至ります。現象として、入力電流の増加・ V_{th} の変化が生じます。バイポーラでは一般に接合の劣化を引き起こし、接合の一部が局部的に溶解します。さらにリーク電流の増加、耐圧劣化、hFEの低下、雑音の増加などを生じます。破壊箇所のアルミ配線が黒く変色した場合は、光学顕微鏡で容易に解析できますが、破壊箇所の特定には発光解析やOBICが有効です。

(xi) エレクトロ/ストレスマイグレーション

Al配線に電流や応力のストレスが印加されると、ヒロックやボイドが発生することがあります。ヒロックはAl配線間の層内/層間ショート、ボイドは配線抵抗の増加や断線を引き起こします。断線箇所は電子ビームテストにより容易に特定できます。さらに、レーザ照射熱によるAl配線の抵抗変化や熱起電力の変化を検出する手法を用いて、ボイドや断線の位置を特定することもできます⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

(x) 接合不良

酸化膜分離や異常な合金成長によるストレス・汚染・シリコン基板の結晶欠陥などにより生じます。状況に応じてチップ表面、もしくは断面から接合部を観察します。接合部露出後、Wright-Etchingなどを施すことで観察が容易になります。

(xi) 酸化膜破壊

LSIを構成するトランジスタ、キャパシタ部において、強い電界ストレスが印加された時に酸化膜破壊が生じます。ストレスの要因は、ESDなどの外部ノイズ、設計に起因するもの、ウェハプロセスでの欠陥、経時劣化などさまざまなものが考えられます。不良の症状としてはリーク系の故障のため、発光解析、OBIC(OBIRCH)、などが有効です。

(3) 不純物・組成分析

半導体チップの不純物・組成分析には、試料に電子・X線・イオンなどを照射することで試料表面から2次的に放出される電子・X線・イオンなどの量子を検出し、分光する手法を用います。

(a) EPMA (Electron Probe Micro Analysis)

数KeV-数十KeVのエネルギーの電子ビームを固体試料の表面に照射すると、図5.27に示すようなさまざまな量子が放出されます。これらの量子のうち特性X線を検出する手法がEPMAで、ボロン(B)からウラン(U)までの元素を分析できます。最小分析領域は一般的にサブミクロン、分析深さは $1\mu\text{m}$ ~ $数\mu\text{m}$ で、 $0.1\text{wt}\%$ ~ $0.01\text{wt}\%$ 以上の元素を定性・定量分析することが可能です。

固体試料に電子ビーム(一次電子)を照射すると、試料における原子核の周りの電子が一次電子の衝突で追い出され空孔が生じます。この空孔が生じた状態から安定状態に戻るために外殻電子が空孔に移動し(図5.28)、移動前後のエネルギーの差が外部に放出されます。このエネルギー放出の1つの過程が特性X線の発生です。この波長またはエネルギーが元素固有であるため、これらを測定することで試料表面の元素を固

5. 半導体デバイスの故障解析

定することができます。EPMAは、一般的にSEMと一体になっており、個体表面の分析手段としては最も簡便な手法です。

(b) SAM (Scanning Auger Microscopy)

エネルギー放出のもう1つの過程で固体試料に電子ビームを照射することにより、図5.28で示した状態から生じるものがオージェ電子です。オージェ電子は、空孔に移動する電子と同じ軌道にある電子がエネルギーを得て外に飛び出したもので、特性X線と同様にそのエネルギーを測定することで元素の同定ができます。オージェ電子の運動エネルギーは比較的小さいため、図5.27に示すように最表面から2~3nmまでの深さからのみ検出されます。また、表面層からの情報を検出しているため、試料内部での電子ビームの広がり
の影響をほとんど受けず、最小分析領域は30nmと小さくなります。表面分析法の中で最も極表面に敏感な分析手法であるため、チップ表面の汚染などの調査に有効です。また、スパッタエッチングの併用による深さ方向の分析も可能です。

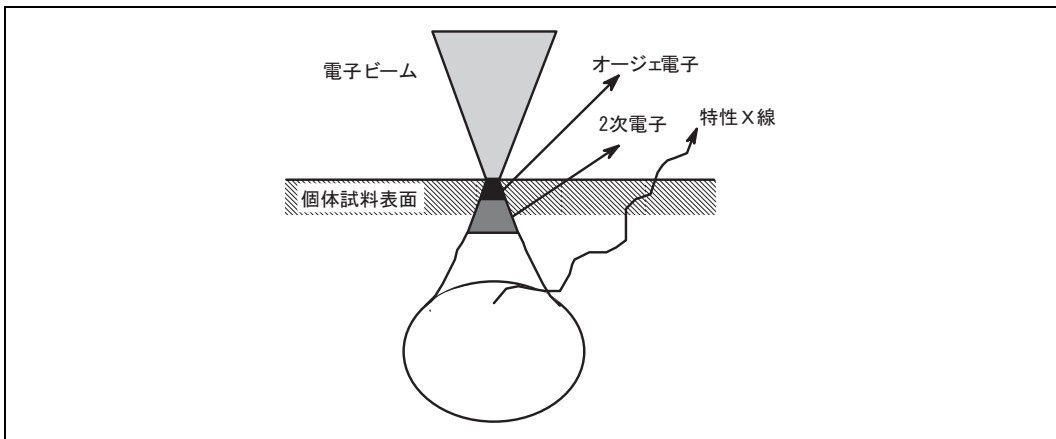


図 5.27 電子ビームの照射により固体試料表面から放出される量子

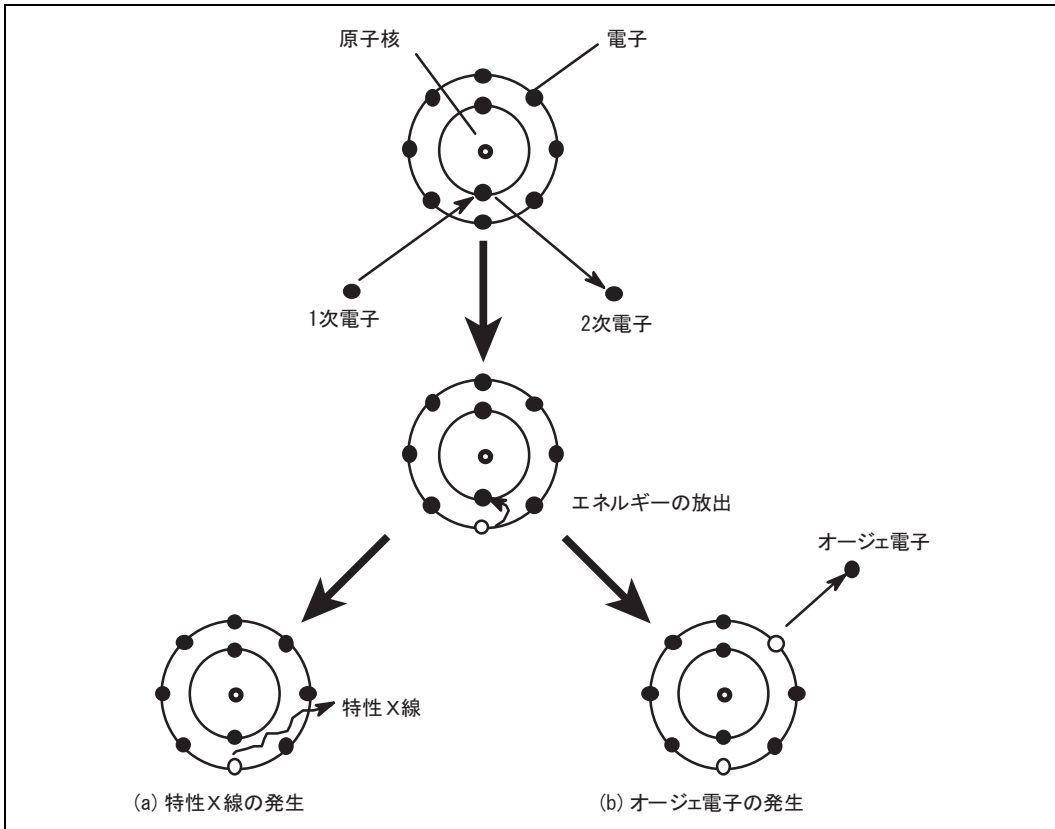


図 5.28 特性X線・オージェ電子の発生メカニズム

(c) XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy)

X線を固体試料の表面に照射することにより発生する光電子の運動エネルギーを測定する方法で、試料の表面にある電子の結合エネルギーが求められます。この電子の結合エネルギーは元素固有であるため、構成元素を同定できます。X線は電子ビームのように細かく絞れないため、最小分析領域は $10\mu\text{m}$ と比較的大きいが、結合エネルギーの微妙な変化から原子の化学結合の状態を推定できる特長があります。SAMと同様にスパッタエッチングを併用して深さ方向の分析も可能です。

(d) SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy)

イオンビームを固体の表面に照射することにより外部に放出される2次イオンを検出し、質量分析計で分光することにより元素分析を行う方法です。イオンビームは細かく絞れないため最小分析領域は数 μm だが、SAM・EPMAでは分析できない水素・ヘリウムを含む全元素に対してppbオーダで高感度な分析ができます。またイオンビームによるスパッタ現象を伴うため、深さ方向の分析も可能です。表面分析法の中で最も高感度な分析手法である、チップ表面の汚染分析や、シリコン基板中に拡散された深さ方向の不純物分布の評価などに用いられます。

5.3.8 故障メカニズムの確定

種々の故障解析手法で検出された異常をデバイスの故障原因と確定するには、慎重な検討が必要であり、電気特性との関係などのメカニズムを矛盾することなく説明できなければなりません。なぜならば、検出された異常がすべて異常に結びつくとは限らず、誤った結論は改善に結びつかない誤った対策を導くからです。

半導体デバイスは、ますます高集積化・大規模化が進み回路システムも複雑化してきているため、故障内容も複雑になり、原因の発見も困難になってきています。このため、故障メカニズムの解明のためには、故障を検証するためのシミュレーションや過去の解析事例を蓄積したデータベースなどを活用するとともに、開発段階でテスト(解析)容易化設計を施し、故障メカニズムの解明を容易化することも必要になってきています。

5.3.9 付録 (解析手法一覧)

(1) 故障解析手法一覧

分類	手法(設備)	説明	用途
パッケージの外観検査	<ul style="list-style-type: none"> 目視観察 実体顕微鏡観察/光学顕微鏡観察 SEM 観察 EPMA 	<ul style="list-style-type: none"> 電子ビーム照射による 2 次電子検出 電子ビーム照射により発生する特性 X 線の波長・エネルギーを分析 	<ul style="list-style-type: none"> 外観チェック リード間の汚染分析・金属マイグレーションなどの元素分析
	電気特性評価	<ul style="list-style-type: none"> 機能特性評価(LSI テスタ) DC 特性評価(カーブトレーサなど) 論理シミュレーション 	<ul style="list-style-type: none"> ファンクション、DC 特性評価、内部論理解析
パッケージの内部解析	<ul style="list-style-type: none"> X 線透視 赤外線観察(赤外線顕微鏡) 超音波探査(超音波探傷機) ファインリーク測定 グロスリーク測定 	<ul style="list-style-type: none"> 透過 X 線の観察 チップ表面から反射赤外線を観察 超音波を入射し反射波を検出 ヘリウムトレーサガスを使用 フロロカーボンを使用 	<ul style="list-style-type: none"> ボンディングワイヤの形状観察 ボンディングパッドの観察 ボイド・剥離・クラックの調査 キャン/セラミックパッケージの気密性評価
	チップ内部の故障箇所の特 定	<ul style="list-style-type: none"> モールド窓開け(オープナ) プラズマエッチング RIE FIB 加工 ナノブローバ解析 電子ビームテスト LVP TRF 発光解析(エミッション顕微鏡) 発熱解析(液晶・赤外線放射温度計) OBIC/OBIRCH EBAC 	<ul style="list-style-type: none"> チップ上面のみの樹脂を溶解 プラズマによる化学反応 上層アルミをマスクに異方性エッチングし層間絶縁膜を除去 イオンビーム照射によるスパッタ加工、W(CO₆)ガス併用による W 形成 サブミクロンブローブを用いた LSI 内部回路の電気特性評価 電子ビーム照射により発生する 2 次電子のエネルギーを分析 パルスレーザー照射による反射光を検出(裏面解析 Flip-Chip 解析に有効) Tr のスイッチング時に発生する微弱光をピコ秒オーダーで検出し動作タイミングを解析(裏面解析に有効) 微弱な発光を検出 発熱の検出 光ビーム照射による光励起電流、熱的効果を利用した抵抗(電流)変化を検出 電子ビーム照射により発生する吸収電流を検出、画像化(断線不良に有効)
チップの物理的な解析、形状、状態の観察	<ul style="list-style-type: none"> 光学顕微鏡観察 SEM 観察 EBSP 研磨 FIB 加工 TEM 	<ul style="list-style-type: none"> 電子ビーム照射による 2 次電子を検出 結晶格子面での反射電子増の回折パターン解析することで結晶方位を観測 イオンビーム照射によるスパッタエッチング加工 電子ビーム照射により試料を透過した電子を検出 	<ul style="list-style-type: none"> 表面観察 断面観察
	元素分析	<ul style="list-style-type: none"> EPMA SAM XPS SIMS 	<ul style="list-style-type: none"> 電子ビーム照射により発生する特性 X 線の波長・エネルギーを分析 電子ビーム照射により発生するオージェ電子のエネルギーを分析 X 線照射により発生する光電子のエネルギーを分析 イオンビーム照射により発生する 2 次イオンの質量を分析

5. 半導体デバイスの故障解析

(2) 故障解析手法一覧

名称	プローブ粒子	観測粒子	原理方法
エレクトロンプローブマイクロ分析法 (EPMA) Electron Probe Micro Analysis	電子 数十 kV	X線	走査による表面トポグラフィ、 特性X線観測による元素分布
走査電子顕微鏡法 (SEM) Scanning Electron Microscopy	電子 数十 kV	2次電子	走査による表面トポグラフィ、 EBIC、ストロボスコピック法
透過電子顕微鏡法 (TEM) Transmission Electron Microscopy	電子 ~200V	電子	レプリカ法による表面トポグラフィの拡大観察、 回折像による結晶性の評価
オージェ電子分光法 (AES) Auger Electron Spectroscopy	電子 数 100~数千 kV	オージェ電子	オージェ電子のエネルギー測定による元素同定
走査形オージェ電子プローブ法 (SAM) Scanning Auger Microprobe	電子 1kV~10kV	オージェ電子	オージェ電子のエネルギー測定による元素同定
反射高速電子線回折 (RHEED) Reflection High Energy Electron Diffraction	電子 数十 kV	散乱電子	表面薄層原子による散乱・斜入出射
2次イオン質量分析法 (SIMS) Secondary Ion Mass Spectroscopy	イオン 数 100~20kV	2次イオン	スパッタイオンの質量分析
ラザフォード後方散乱法 (RBS) Rutherford Back Scattering	イオン He ⁺ , H ⁺ (~MV)	後方散乱イオン	後方散乱イオンの強度・エネルギー分布
X線光電子分光法 (XPS) X-ray Photoelectron Spectroscopy	特性X線	光電子	光電子のエネルギー測定による殻準位決定
紫外光電子分光法 (UPS) Ultra Violet Photoelectron Spectroscopy	紫外線	光電子	光電子のエネルギー測定による浅い準位決定
蛍光X線分光法 (XRFS) X-Ray Fluorescence Spectroscopy	X線	X線	X線を照射し光電効果による発生する固有X線を 分光測定
走査型超音波顕微鏡法 (SAM) Scanning Acoustic Microscopy	超音波	超音波	超音波を伝播させ、物質の弾性的性質を利用
赤外吸収分光法 (IR) Infrared Spectroscopy	赤外線	反射赤外 スペクトル	表面反射時における赤外吸収スペクトルを測定
陰極線ルミネセンス法 (CL) Cathode-ray Luminescence	電子	光スペクトル	電子衝突、バンド励起による発光スペクトル
集束イオンビーム法 (FIB) Focused Ion Beam	イオン ~50kV	2次電子	イオンビームによるスパッタリング現象を利用

5. 半導体デバイスの故障解析

得られる情報	感度	分析面積	情報力深さ	特長
表面トポグラフ、元素分布、 分析可能元素 B~U	100~1000ppm 10 ² ML*	10 ⁻³ ~ 0.3mm φ	~1μm	定量補正の確立、重元素に対し感度が高い。μm 以下の分解能は原理的に不可。
表面トポグラフ、結晶欠陥、 キャリアライフタイム、 動作状態での素子の信号伝搬	2次電子: ~ 0.6nm	10 ⁻³ ~ 0.3mm φ	~1μm	バルク試料表面を高分解能で観察できる。起電流像等の多様な情報が得られる。
表面トポグラフィー特性、 結晶性評価、内部構造	格子像: ~ 0.14nm 粒子像: ~0.2nm		数μm	試料は薄膜でなければならない。結晶欠陥にシャープなコントラストを与える。高分解能。
表面元素同定、深さ分布	10 ³ ML* 0.01~0.1%	30~1mm φ	数 nm	軽元素に感度高い。質量感度大、重元素のスペクトルが複雑で同定は難しい。イオンスパッタとの組み合わせで局所領域の深さ組成分布が得られる。
表面元素同定、深さ分布、 3次元元素分布	0.1~1%	5×10 ⁻⁴ ~ 0.1mm φ	数 nm	軽元素に感度高い。質量感度大、重元素のスペクトルが複雑で同定は難しい。イオンスパッタとの組み合わせで局所領域の深さ組成分布が得られる。
表面原子・吸着原子の対称性、 原子間隔	10 ² ML*	0.5~ 5mm ²	数 nm~ 数 10nm	表面の構造、表面の化合物組成情報。
元素同定、表面元素分布、 トポグラフ、分析可能元素 H~U	10 ⁵ ML* ppb~ppm	10 ⁻³ ~ 1mm φ	ML* ~数 ML*	元素の表面分布、深さ分布測定が容易。全元素に適用可能だが、2次イオンの生成率が元素によって大きく異なる欠点がある。(>10 ³)
元素同定、定量、深さ分布	10 ¹⁷ ~10 ¹⁴ atom/cc	~1mm φ	~1μm 深さ精度 ~15nm	元素の定性・定量・深さ分布測定を非破壊で行える。2次分布測定は不可。装置が巨大になる。
元素同定、化学シフト	2×10 ⁻³ ML*	100μm ² ~0.3mm ²	5~2nm	化学シフト測定による結合状態、化合物の測定可。感度はあまりよくない。非破壊。
バンド構造、振動レベル	2~10 ⁻³ ML*	~0.1mm ²	ML*~3nm	バンド構造の情報が得られる。元素分析は不可。表面状態に敏感。
元素同定・定量 分析可能元素 F~	重元素 5ppm 軽元素 500ppm		数 10mm	定性分析・定量分析が非破壊で迅速に行える。
結晶欠陥 多層構造の解析			数 10mm	非破壊で断面構造がわかる。
表面分子構造 結合状態	10 ⁻³ ~10 ⁻⁷ g	数 mm~ 数 10mm φ	~1μm	表面吸着物の化学種、配向の測定。
エネルギーバンド構造、 構造による波長変化	~ppm	0.1~1.0 μm φ	~1μm	発光物質や個体プラズマ光の測定のみ適用可。
断面構造	2次電子: ~5nm			局所指定領域の断面観察。

【注】 * ML: Mono Layer

5. 半導体デバイスの故障解析

参考文献

- (1) 石山敏夫、重田一樹、“経路追跡による故障診断手法の単一故障への適用”、LSIテストシンポジウム(2000)
- (2) I. Yamazaki, H. Yamanaka, T. Ikeda, M. Takakura, Y. Sato: An Approach to Improve the Resolution of Defect-Based Diagnosis, Proc. 10th Asian Test Symposium, pp. 123-128 (2001.11)
- (3) 石村貴志,真田克,中前幸治,藤岡弘, “故障シミュレーションを利用した組み合わせ回路のEBテスト故障追跡アルゴリズム” LSIテストシンポジウム, pp80-85(1998)
- (4) 真田克, 植平和正, “IDDQ利用による回路ブロック内Trおよび配線の短絡対の特定” LSIテストシンポジウム,pp195-200(2003)
- (5) 内角哲人他 “機能テストフェイル情報を用いた故障診断手法” LSIテストシンポジウム pp.259-264 (2004)
- (6) S.H.Lewis: “Infrared Microscopy as Applied to Failure Analysis of P-DIP Devices” , IEEE 24th Annual Proc. Rel. Phys. Symp., pp.99-101(1986).
- (7) 野中寿夫、沖川進: “超音波探査映像システムの開発”、信学技報、R86-68, pp.31-36(1987).
- (8) S.Morris and E.J.Widener: “Anisotropic Etching for Failure Analysis Applications” , Proc. of the 15th Internat.Symp. for Testing and Failure Analysis, ASM Internat., pp.161-166(1989).
- (9) Y.Mashiko, H.Morimoto, H.Koyama, S.Kawazu, T.Kaito and T.Adachi: “A New VLSI Diagnosis Technique: Focused Ion Beam Assisted Multilevel Circuit Probing” , IEEE 25th Annual Proc. Rel. Phys. Symp., pp.111-117(1987).
- (10) Y. Mitsui, F. Yano, Y. Nakamura, K. Kimoto, T. Hasegawa, S. Kimura and K. Asayama, Ext. Abst. IEDM, p.329 (1998).
- (11) 矢野史子、柳田博史、水野貴之、荒川史子、小川吉文、寺田尚平、朝山匡一郎、LSIテストシンポジウム/2003会議録、p 273、(2003).
- (12) 柳田博史、水野貴之、矢野史子、朝山匡一郎、羽崎栄市、揚村寿英、三井康裕、山田理、LSIテストシンポジウム/2004会議録、p 359、(2004).
- (13) 水野貴之、柳田博史、矢野史子、朝山匡一郎、LSIテストシンポジウム/2004会議録、p 363、(2004).
- (14) 裏克己、藤岡弘:“電子ビームテストハンドブック”、電子ビーム研究第7巻、日本学術振興会 第132委員会第98回研究会資料(1987).
- (15) T.Nakamura, Y.Hanagama, K.Nikawa, T.Tsujide, K.Morohashi and K.Kanai:“Novel Electron-Beam Image-Based LSI Fault Technique without Using CAD Database: Development and Its Application to Actual Devices”, Proc. Int. Symp. Testing and Failure Analysis(ISTFA), pp.49-54(1992).
- (16) A.C.Novel:“IDA:A tool for Computer-Aided Failure Analysis”, IEEE Proc. Internat. Test Conf.(ITC), pp.848-853(1992).
- (17) Peter Ullmann, et al.:”A New Robust Backside Flip-Chip Probing Methodology”, Proc. Int. Symp. Testing and Failure Analysis(ISTFA)(1996)
- (18) E.Yoshida, et al.:“Direct Detecting of Dynamic Floating Body Effects in SOI Circuits by Backside Electron Beam Testing”, Internat. Electron Devices Meeting(IEDM) Tech. Dig., pp.567-570(1998).

- (19) Mario Paniccia, et al.: "Novel Optical Probing Technique for Flip Chip Packaged Microprocessors", IEEE Proc. Internat. Test Conf.(ITC), pp.740-747(1998)
- (20) 吉田映二他: "裏面プロービング技術の検討", LSIテストニングシンポジウム/2000会議録, pp.94-99(2000).
- (21) J.C. Tsang, J.A. Kash: "Picosecond Hot Electron Light Emission from Submicron Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Circuits", Applied Phys. Lett., 70, 889(1997).
- (22) 川鍋伸二他: "時間分解発光解析の評価と解析事例", LSIテストニングシンポジウム/2004会議録, pp.315-320(2004).
- (23) 小守純子、三橋順一、畑中正宏、坪内夏朗、"発光観察によるホットキャリア効果の解析"、電子情報通信学会、SDM90-38、pp.15-18、1990.
- (24) Toriumi, "Experimental Study of Hot Carriers in Small Size Si-MOSFETs", Solid-State Electronics, Vol.32, No.12, 1989, pp.1519-1525.
- (25) S.Tam and C.Hu,"Hot-Electron-Induced Photon and Photo-carrier Generation in Silicon MOS FETs", IEEE Trans.Electron devices, vol.ED-31 (1984) pp.1264-1273.
- (26) H.Ishizuka, M.Tanaka, H.Konishi, and H.Ishida, "Advanced Method of Failure Analysis using Photon Spectrum of Emission Microscopy", Proc. Int.Symp.Testing and Failure Analysis (ISTFA),pp.13-19, 1990.
- (27) 吉田岳司、小山徹、小守純子、益子洋治、小野山歩、"高感度裏面エミッション検出によるウエハレベル故障分布解析"、LSIテストニングシンポジウム 2002会議録、pp.137-142,2002.
- (28) 真田 克、藤岡 弘、"IDDQ異常現象を用いたロジックLSIのキラーク陥の検出による歩留り向上"、LSIテストニングシンポジウム 1998会議録、pp.208-213,1998.
- (29) M.Sanada, and H.Fujioka, "Yield Enhancement for Logic LSI by Killer Defect Diagnosis Technique Using Abnormal IDDQ Phenomenon", Proc. International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM), pp.265-268, 1998.
- (30) 平山伸樹、二川清、中桐勝、斉藤直明: "液晶塗布故障解析装置の開発と解析例"、第16回日科技連信頼性・保全性シンポジウム発表報文集, pp.409-412(1986).
- (31) 星野直樹: "半導体デバイスにおけるESD故障の解析手法および解析事例"、RCJ 第1回EOS/ESDシンポジウム予稿集, pp.21-26(1991).
- (32) S.Kondo and H.Kaneko: "High-Resolution Temperature Measurement of Void Dynamics Induced by Electromigration in Aluminum Metallization" ,Jpn. J. Appl. Phys. Vol.67, pp.1606-1608(1995).
- (33) K. Nikawa and S. Tozaki, "Novel OBIC Observation Method for Detecting defects in Al Stripes Under Current Stressing, "Proc.Int.Symp.Testing and Failure Anal.(ISTFA),pp.303-310,1993.
- (34) K. Nikawa, C. Matsumoto and S. Inoue, "Novel method for void detection in Al stripes by means of laser beam heating and detection of changes in electrical resistance", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.34, Part1, No.5, pp.2260-2265, 1995.
- (35) 内藤健作、浅谷紀夫、宮川高志、"OBIRCH解析のメモリデバイスへの適応"LSIテストニングシンポジウム, pp219-223(2003)
- (36) 小山徹、益子洋治、関根正広、小山浩、"熱起電力を利用したOBIC解析技術,"日本学術振興会第132委員会第125回研究会資料 (LSIテストニングシンポジウム), 1995, pp.221-226.

- (37) T.Koyama, Y.Mashiko, M.Sekine, H.Koyama and K.Horie, "New non-bias optical beam induced current (NB-OBIC) technique for evaluation of Al interconnects," in Proc. Int. Rel. Phys. Symp. (IRPS), 1995, pp.228-233.
- (38) T.Koyama, K.Sonoda, J.Komori, and Y.Mashiko, "Detection of defects in metal interconnects by nonbias-optical beam induced current technique", Journal of Applied Physics, Vol.86, No.11, 1 December 1999, pp.5949-5956
- (39) T. Ishii, K. Azamawari and K. Miyamoto, "Study of Dynamic Test Technique from Bottom Side of LSI Chip using the Infrared-OBIC Method,"The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers of Japan (IEICE), R91-34, p.29, 1991.
- (40) T.Koyama, M.Umeno, J.Komori, and Y.Mashiko, "Evaluation of silicide morphology by near infrared laser optical beam induced current (IR-OBIC) technique," Japan Journal of Applied Physics, Vol.40, Part 1, No.11, pp.6446-6452 (2001).
- (41) K. Nikawa and S. Inoue, "LSI Failure Analysis Using Focused Laser Beam Heating", Microelectron. Reliab., Vol.37, No.12, pp.1841-1847, 1997.
- (42) E.I.Cole Jr., P.Tangyonyong, and D.L. Barton, "Backside Localization of Open and Shorted IC Interconnections", Proc. Int. Rel. Phys. Symp. (IRPS), 1998, 129-136.
- (43) K.Nikawa, K.Nasu, M.Murase, T.Kaito and T.Adachi: "New Application of Focused Ion Beam Technique to Failure Analysis and Process Monitoring of VLSI" , IEEE 27th Annual Proc. Rel. Phys. Symp., pp.43-52(1989).
- (44) R.J.Young, E.C.G.Kirk, D.A.Williams and H.Ahmed: "Fabrication of Planar and Cross-Sectional TEM Specimens Using A Focused Ion Beam" , Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.199, Materials Research Society, pp.205-216(1990).