

高信頼性システムのためのLSIプロセス診断による評価

矢部 一博
岡 克己

田中 大起
久保山 智司

野田 克史
松田 純夫

菅沼 貞雄

宇宙機システムでは高い信頼性が保証された宇宙用部品の使用が前提であるが、近年、宇宙用部品の供給が難しくなり、民生用部品からの選別、転用技術が重要な課題となっている。

宇宙以外にも航空、自動車、電力、通信のライフライン等の高い信頼性が要求されるシステムでのデバイス故障は大きな損失につながるだけでなく、国民生活に影響を及ぼす問題にもなり得る。そのため、このようなシステムにLSIデバイスを使用するユーザにとっては、高い信頼性を有するデバイスの選別が大きな課題である。

しかし、信頼性試験でデバイス进行评估するには、莫大な数のサンプルと時間を必要とするうえ、信頼性の向上した現在のデバイスでは一般的な条件による信頼性試験でのデバイス選別は実質的には不可能に近い状態である。また、過酷な条件による信頼性試験ではデバイスの摩耗が伴うため、高い信頼性が要求されるシステム向けに新たなデバイスの選別法が必要である。

従来からデバイスの評価として信頼性試験と平行し良品解析を行い、総合的な品質の評価を実施することが行われてきたが^{1) 2)}、この良品解析の概念はMIL規格の示すところのDPA (Destructive Physical Analysis) に基づくもので、信頼性上裏付けのある解析方法と言えるが、この手法と規格では、主にアッセンブリプロセスの不具合に起因した欠陥や不具合構造を見いだすものである。また、進歩の激しい分野に関わらず近年では規格の更新が行われておらず、ウェハプロセスに対しては、最新の規格でも数十μmのデザインルールに相当するもので、微細化、多層化の進んだ最新のLSIの評価法としては適切とは言えない。

そこで、我々は新たにLSIのウェハプロセスに着目しウェハプロセスの不具合に起因して発生する構造異常、内在欠陥の有無からデバイスプロセスの信頼性を評価する“LSIプロセス診断システム”を開発し、高信頼性システム向けのデバイス選別、評価

に適用している³⁾。

LSIプロセス診断システム

LSIプロセス診断システムは、電氣的に良品であるデバイスについて内部構造を詳細に観察し、将来、故障の要因となりうるデバイス内部の不具合要素の有無や構造のばらつき等から故障に至る危険性を推測するもので、信頼性の向上した現在のデバイスを選別するための有望な手法と考えている。

開発したLSIプロセス診断システムはデバイスのウェハプロセス状態を評価するための5つの検査項目とその観察技術、観察手順、それにより得られたデータを54の評価項目とその診断基準に照らして診断、採点を行い、ランク付けすることによりデバイスの選別を行うためのシステムである。また、検査により取得した大量のデータを効率的に診断、管理、運用可能とするためのデータベースシステムも用意されている。

(1) LSIプロセス診断の検査項目

LSIプロセス診断の検査項目は表1に示すとおり5項目である。各検査項目とも一般的な良品解析メニューであるが、デバイスプロセスを評価するにあたり、各検査項目での検査条件、検査ポイントが定義されている。

プロセス診断は微細構造の検査を行うため、たとえば

表1 プロセス診断の5つの検査項目

No.	検査項目	観察装置	検査対象	検出される欠陥要因
1	表面観察	OM	パッシベーション メタライゼーション	変色、クラック、ボイド、異物の存在など
2	PV膜除去観察	SEM	メタライゼーション (トップ)	ボイド、異物、マスク不良 構造要因
3	エッチバック観察	OM/SEM	層間絶縁膜 メタライゼーション	(配線幅、配線ピッチ、ゲートサイズ他)
4	断面SEM観察	SEM	積層構造 配線、ゲート電極、コンタクト等	ボイド、異物、カバレッジ 構造要因 (膜厚、ゲート長、 コンタクト径他)
5	断面TEM観察	TEM	積層構造、組成 ゲート酸化膜、コンタクトなど	ボイド、異物、転位、構造要因 (ゲート酸化膜厚他)

検査条件のサンプリング法等が異なった場合、異なった結果が得られてしまう可能性もあり、検査条件、検査ポイント等が定義されていることは定量的な診断を行う上で重要なポイントである。

これらの条件設定は過去に行ってきた故障解析、構造解析のノウハウの蓄積によるところが大きいが、さらに約100品種のデバイスについてプロセス診断を試行し決定している。このような検査条件は主にデバイスの設計ルールにより大きく変化するが、現在のところ0.18 μm ルールのデバイスまで対応可能である。

(2) LSIプロセス診断の解析手順

LSIプロセス診断の解析手順であるが、積層構造、設計ルールの不明なデバイスについても適正に検査可能となるように、図1に示す解析手順に従い進められる。

検査手順の特徴として回路情報を取得するための断面予備調査とエッチバック予備調査が挙げられる。断面予備調査により層構造、膜厚等の条件を取得後、その情報を元に予備エッチバック調査を行い、エッチバック条件の取得とチップ内部の回路ブロック情報を抽出する。

多くのデバイスが多数の回路ブロックにより構成されており、ブロックごとに、ゲート長、最小配線幅などが異なることも普通である。通常、設計ルール値で構成された最小構造部の回路がウェアプロセス上のウイークポイントと考えられることから、確実に最小構造部の回路

断面を検査するためにも予備調査を行うなど解析手順が規定されていることは重要なポイントである。

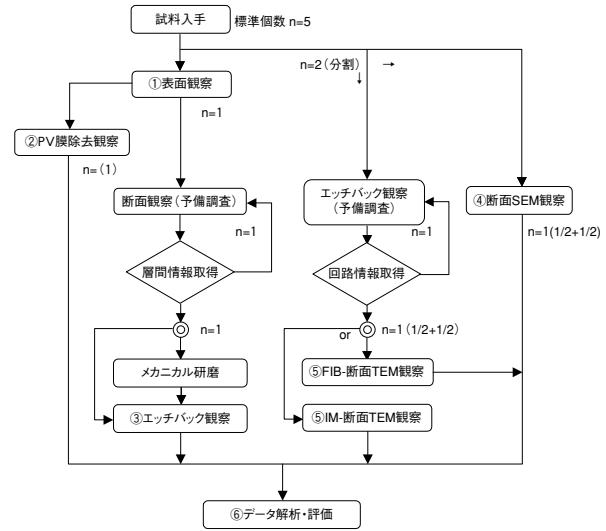


図1 LSIプロセス診断の検査手順

TIPS【略語解説】

- MIL規格：米国軍用規格
- OM：光学顕微鏡
- SEM：走査形電子顕微鏡
- TEM：透過形電子顕微鏡

表2 プロセス診断の評価項目（一部）

欠陥項目 No.	工程名	欠陥項目	欠陥項目 No.	工程名	欠陥項目
1	ウエハ	結晶欠陥、ピンホール、クラック、スリップ	21	電極・配線形成 I	ボイド、傷
2	ウエハ	形状異常、エッチング不良（パズ・ピーク）	22	電極・配線形成 I	異物混入、汚染
3	ウエハ	異物混入	23	電極・配線形成 I	オーバーエッチング（層間絶縁膜）
4	ウエハ	拡散異常、アライメント不良	24	電極・配線形成 II	接続部のカバレッジ（テーパー接続）
5	ゲート形成（酸化膜）	真性欠陥、結晶性欠陥、ピンホール、厚さ不良	25	電極・配線形成 II	アライメント（マスク合わせ）の不整合
6	ゲート形成（酸化膜）	異物混入	26	電極・配線形成 II	層間接続部（アスペクト比）
7	ゲート形成（酸化膜）	ゲート酸化膜下層Si中の結晶欠陥（深さ方向）	27	電極・配線形成 II	層間接続部（開口比）
8	ゲート形成（電極）	ゲート長の不一致	28	電極・配線形成 II	層間接続部不良（層構造間わず）
9	ゲート形成（電極）	形状異常、ボイド、エッチング不良（オーバーハング）	29	電極・配線形成 II	コンタクト下層Siの結晶欠陥
10	ゲート形成（電極）	異物混入	30	電極・配線形成 II	コンタクト部のSiノジュール（Al単層）
11	ゲート形成（電極）	アライメント（マスク合わせ）の不整合	31	電極・配線形成 II	アロイスバイク（Al単層）
12	層間絶縁膜形成	異物混入	32	電極・配線形成 II	ボイド、埋込不良（プラグ接続）
13	層間絶縁膜形成	平坦性異常、厚さ不良、カバレッジ不良	33	電極・配線形成 II	形状異常
14	層間絶縁膜形成	ボイド	34	電極・配線形成 II	異物混入、汚染（プラグ接続）
15	層間絶縁膜形成	構造異常	35	保護膜形成	膜厚異常（有機保護膜を除く）
16	電極・配線形成 I	全体的な膜厚異常	36	保護膜形成	形状異常
17	電極・配線形成 I	形状異常、エッチング不良	37	保護膜形成	クラック、欠け、割れ、剥離
18	電極・配線形成 I	Al結晶粒径（グレイン）異常 [Al単層の場合]	38	保護膜形成	ピンホール、ボイド
19	電極・配線形成 I	配線段差部の断線（断切れ）	39	保護膜形成	形成不良
20	電極・配線形成 I	ヒロック	40	保護膜形成	異物混入、汚染

また、プロセス診断の検査に必要な最低試料数は5サンプルであるが、これは全検査項目の調査を行うための最低必要数である。対象試料数が少ないがプロセス診断検査は手間の掛かる破壊検査であるため、大量の検査は望めない。また、ウェアプロセスでの構造欠陥はロット単位、ライン単位で発生している事が多く、検査の主目的がデバイスのランク付けであることから少数の抜き取り検査法を採用している。

LSIプロセス診断の評価項目

5項目の検査により得られたデータは表2に示す54のプロセス診断評価項目と各項目ごとに設けられた詳細な解説書による診断基準に従い、診断と採点が行われる。評価項目には各工程別に具体的な欠陥が記述され、検査により検出された不具合構造と照合することにより定量的な評価、採点が可能となっている。

プロセス診断のポイントとなるこの診断基準は、我々独自の基準であるが、我々が過去に行ったデバイスの故障解析事例、良品解析事例等約5000件および各種文献例等から導きだしている。

また、この評価項目の検査とともに、デバイスの設計ルールを特定するためのデバイス構造の詳細な測定も同時に行っている。

(1) 検出欠陥の分類と減点区分

検出された欠陥は欠陥の種類、位置、大きさによりデバイス故障を引き起こす危険性が異なるため、表3のような減点区分により採点を行っている。この減点区分についても我々独自の基準であるが、評価項目と同様に我々が過去に行ったデバイスの故障解析事例、良品解析事例等約5000件および各種文献例等から導きだしている。

表3 検出欠陥の分類と減点区分

分類	欠陥の厳しさ	状態	減点区分				備考
			A	B	C	D	
I	重度欠陥	致命的	-1000	-	-	0	故障を誘発する可能性大
II	中度欠陥	限定的	-300	-200	-100	0	故障を誘発する可能性中
III	軽度欠陥	保留	-30	-20	-10	0	故障を誘発する可能性小
IV	分類せず		-	-	-	0	-

(2) デバイスのランク付け

評価対象のデバイスは、5つの検査項目による54項目の評価と採点の結果、表4に示す6段階のランク付けと判定結果が示される。デバイスのランク付けは持ち点1000点からの減点法により決定され、減点区分に規定された欠

表4 デバイスのランク付け

採点分類	採点ランク	判定
Excellent	1000	合格
Very good	751~999	
Good	501~750	
Passing	251~500	
Below averaging	1~250	留意
Failure	0	不合格

陥の種類、検出部位、大きさごとに減点が加算されることにより決定される。約100品種のデバイスについてLSIプロセス診断を試行し得られた採点結果の分布を図2に示す。

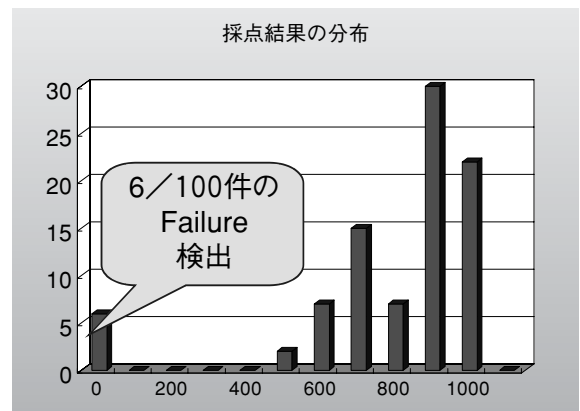


図2 採点結果の分布

この図はLSIプロセス診断用に構築されたデータベースシステムにより診断結果を得点分布により抽出したものであるが約100件中6件の不合格が検出される結果となっている。

LSIプロセス診断システムでは、このような得点分布や配線幅等のデバイス構造値がデータベースシステムにより、メーカー別、設計ルール別など、任意の切り口で抽出可能となっている。

LSIプロセス診断データベースシステム

LSIプロセス診断は54項目の評価を行うため、大量の診断データが発生する。この診断データを効率的に処理し、有効に活用していくためにLSIプロセス診断データベースシステムを構築している。LSIプロセス診断データベースシステムは汎用性を考慮してパソコン上で運用可能とするためにMicrosoftのAccessで構築し、プロセス診断向けにカスタマイズされている。実際のプロセス診断データベースの様子を図3に示す。



図3 LSIプロセス診断データベースシステム

大量のプロセス診断データはデータベースシステムに入力されることにより比較、解析可能な利用価値の高いデータとして蓄積されていきLSIプロセス診断システムの質を高めていくことができる。

データベースシステムの活用例として表5に示す項目等でのデータ抽出が可能であり、メーカーごとの採点結果でデータ抽出を行うことにより独自の採点基準によるものであるが、各メカ、各プロセスルールの実力傾向が推定可能である。

表5 プロセス診断データの抽出例

選択項目	分類	選択可能範囲
メーカー	メーカーごとに絞り込み	個別
型名	個別選択	個別
品種	ロジック、メモリなど	9種目
設計ルール	0.6~0.18 μ m	4段階
診断結果	採点結果をランク分け	7段階
診断項目	欠陥項目ごと	54項目

また、デバイスの構造値として重要なゲート長、各配線幅、コンタクト径、コンタクト部アスペクト比、カバレッジ等、詳細な測定値も入力されており、任意の切り

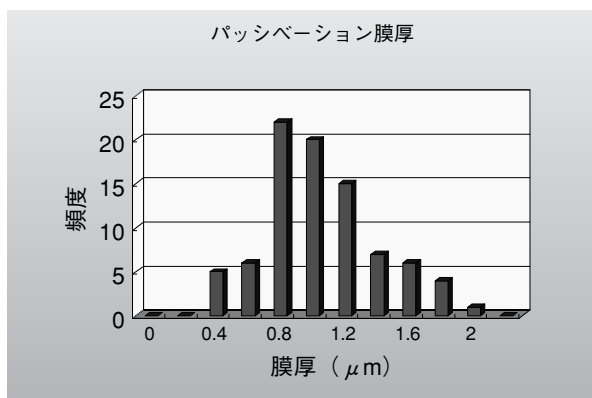


図4 デバイスの構造値の抽出例

口で抽出、表示可能となっている。図4に表示例としてパッシベーション膜厚を示す。このようなデータ分析により対象デバイスの膜厚値、カバレッジ値などのデバイス構造に離散性が無いか確認可能となっている

LSIプロセス診断の実例

(1) 検出された不具合構造例

図5はエッチバック検査により検出された層間膜中の異物であるが比較的太い配線のエッジ部で検出されたものである。

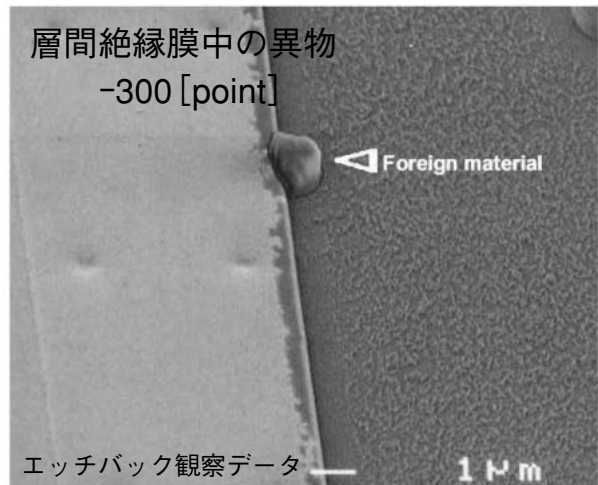


図5 エッチバック検査により検出された欠陥

このような異物は検出位置やサイズ等によりデバイスへの影響が大きく異なるがコンタクト等の重要部位では致命的な欠陥となるため図のようなデバイスへの影響が少ない部位での検出も重くとらえ、中度欠陥と分類し、-300点の減点対象となる。

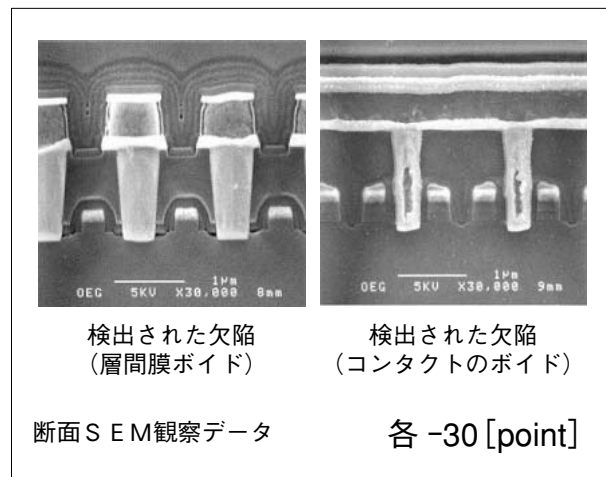


図6 断面SEM検査により検出された欠陥

図6は断面SEM検査により検出されたWプラグ中のボイドや層間膜中のボイド欠陥である。このような欠陥は多くのデバイス（データベース検索の結果70%が該当）で見られるが、直接故障にいたる可能性は低く、軽度欠陥と分類され、-30点の減点対象となる。

図7は断面TEM検査により検出されたSi基板中の結晶欠陥であるが、欠陥サイズがセルサイズより大きくチャンネル近傍であることから故障に至る可能性が高く、重度欠陥と分類され、-1000点の減点対象となる。この場合、ランク付けはFailureとなるが、欠陥検出位置がメモリーデバイスのセルブロックであるため、未使用ブロックとして処理されている可能性もあり、判定には注意が必要である。

(2) 診断結果の実例

LSIプロセス診断結果の実例を表6に示す。この表はプロセス診断と信頼性試験との相互検証実験を行うため、過去に行ったLSIプロセス診断で不合格となったA、B2品種について新たに各2ロットの別ロットサンプルを入手し、プロセス診断を行った結果である。

診断の結果A、B2品種とも新たに各1ロットの不合格が検出された。この診断結果は2品種の製造プロセス品質に何らかの問題がある可能性を示唆するものと考えている。

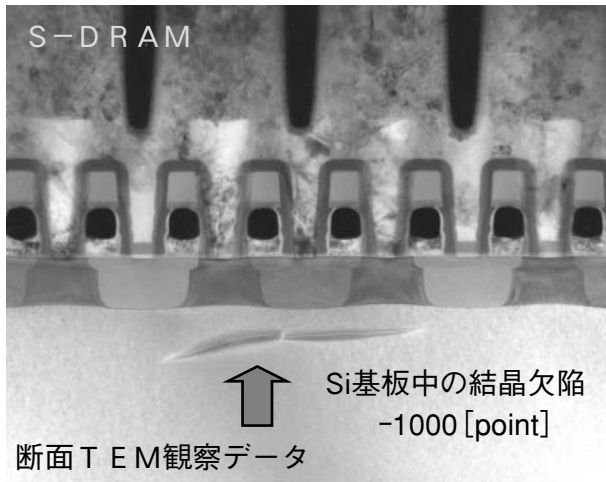


図7 断面TEM検査により検出された欠陥

LSIプロセス診断と信頼性試験との相互検証

LSIプロセス診断法によるデバイス選別の妥当性については信頼性試験との相互検証を行っている⁴⁾。

表6 LSIプロセス診断結果例

欠陥項目No.	欠陥項目ID	観察・評価項目	対象試料						欠陥内容
			試料No.1			試料No.2			
			A	1	2	B	3	4	
1	B101	ウエハ(基板-素子分離)-結晶欠陥,ピンホール,クラック,スリップ	0	-1000	0	0	0	0	Si基板内の結晶欠陥
2	B102	ウエハ(基板-素子分離)-形状異常,エッチング不良(ハース-ビーク)	-100	-100	-100	0	0	0	STI構造の形状異常
7	B203	ゲート形成-ゲート酸化膜下層Si中の結晶欠陥(深さ方向)	-30	-30	-30	-30	-30	-30	ゲートエッジ部付近の残留転位
14	B303	層間絶縁膜形成-ボイド	0	-30	0	0	0	-60	(1) M1の側面 (2) M1, M2の側面
21	B406	電極-配線形成(配線)-ボイド,傷	0	0	0	0	-100	0	M2に1箇所
25	B502	電極-配線形成(接続)-アライメント(マスク合わせ)の不整合	0	-300	0	0	0	0	M1-M2間プラグ位置の不整合
29	B506	電極-配線形成(接続)-コンタクト下層Siの結晶欠陥	-20	-30	-30	-20	-30	-30	コンタクト下部の結晶欠陥
32	B509	電極-配線形成(層間接続)-ボイド,埋込不良[プラグ接続の場合]	-30	-30	-30	-1000	-30	-1000	(1) Si基板コンタクト部 (2) コンタクト接続界面
43	B703	メモリセル部-メモリセル部の結晶欠陥	0	0	0	0	-30	-30	メモリセル部の結晶欠陥
47	B707	メモリセル部-コンタクトのボイド,埋込不良	-1000	-30	-30	0	-30	-30	pory-Siコンタクトの接続不良
総合判定	減点		-1100	-1550	-220	-1050	-250	-1180	
	採点結果		0	0	780	0	750	0	
	ランク		FA	FA	VG	FA	GD	FA	

表6の2品種各3ロットについて高温動作試験2000時間と熱衝撃試験1000サイクルを実施した。その結果、1品種1ロットについて2/15(個)のファンクショナル不良発生が確認された。表7に信頼性試験条件を示す。ファンクショナル不良発生が認められた品種(No.2不揮発性メモリ)は図8のWプラグの接続不良として不合格となっている。信頼性試験後のプロセス診断結果(図9)でも同様の接続不良が多く検出され、接続不良状態も加速傾向にある。

表7 信頼性試験条件

対象品種	試験略号	試験条件	測定時点[時間]	試験個数	
				分類	個数
No.1	HTB	Ta=125°Cダイナミック動作試験初期及び定時でDC, FCT, AC, MGを観測し故障判定	初期 168,300,500,1000,2000	既存(A)	15
				新規(1)	20
				新規(2)	20
No.2	HTB	Ta=125°Cダイナミック動作試験初期及び定時でDC, FCT, AC, MGを観測し故障判定	初期 168,300,500,1000,2000	既存(B)	15
				新規(3)	20
				新規(4)	20
	T/C	Ta=-55°C⇔125°C熱衝撃試験初期及び定時でDC, FCT, AC, MGを観測し故障判定	初期 50,100,240,500,1000(サイクル)	既存(A)	8
				新規(1)	24
				新規(2)	25

また、不良モード(消去時間不良)の状態からもWプラグの接続不良による故障と判断される。信頼性試験により故障にいたらなかったNo.2の他ロット品についても断面SEM検査によりプラグの傾きが検出されており、W

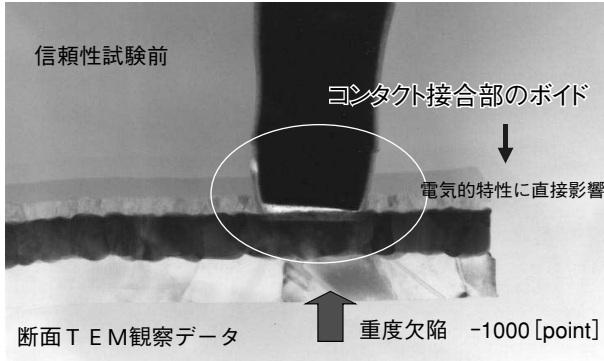


図8 No.2-B Wプラグの接続不良

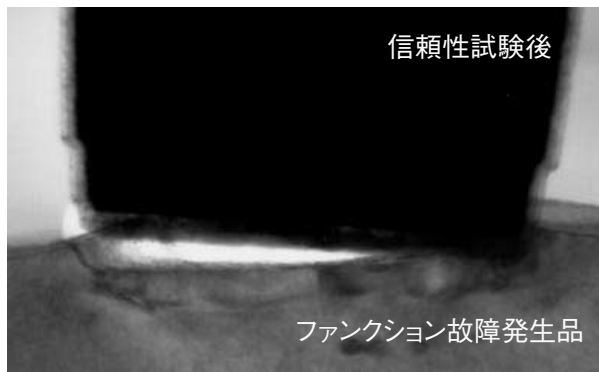


図9 No.2-1 Wプラグの接続不良

プラグの接続不良は製品プロセス上の問題であることが予想される。

No.1については表6での事前検査で検出された不具合がロット間で異なり、信頼性試験後の検査では不具合が検出されない等、製品ロット間で品質のばらつきが認められる。これは製品品質上問題であるが、信頼性試験では不良が発生せず。試験条件で不具合要素を加速する事ができなかったものとする。

通常の信頼性試験では1000時間の試験時間が標準であり、このような不具合構造を内在したデバイスは信頼性試験をパスして市場に流通しているのが現状である。

このようなデバイスをシステムに採用する危険を防ぐためにも高信頼性システムに採用するデバイスの選別にあたってはLSIプロセス診断法によるデバイス選別が有効であると考えている。

まとめ

LSIプロセス診断法はウェハプロセス主体の評価であるため、従来の信頼性試験、アセンブリプロセス主体のDPAと組み合わせることでより完全な高信頼性システムのための信頼性評価システムが構築できるものとする。

また、良品を解析するプロセス診断法は故障してから進める故障解析とは異なり、直ちに始められ、時間と費用のかかる信頼性試験結果を待たずにプロジェクトの早い時点での欠陥の排除が可能である。また、プロセス診断を事前に実施することで、より完全で効果的な信頼性試験を計画することも可能である。

プロセス診断により診断されたデータはデータベース化され体系的に利用可能な状態で追加していく事ができ、ユーザサイドでのウェハプロセス情報の蓄積が可能となる。

このことはユーザとサプライヤのPDCA (Plan do check action) を加速することになり、より良い製品開発や競争力のUPにつながるものと期待されている。◆◆

参考文献

- 1) 今井 他：電子情報通信学会，信学技報，R97-8，1997年9月
- 2) 吉田：第13回日科技連信頼性・保全シンポジウム
- 3) 今井 他：電子通信情報学会 総合大会，sc-11-2，1998年3月
- 4) 矢部 他：第14回RCJ信頼性シンポジウム，2004年11月

筆者紹介

- 矢部一博：Kazuhiro Yabe. 沖エンジニアリング株式会社 信頼性技術事業部
 田中大起：Daiki Tanaka. 沖エンジニアリング株式会社 信頼性技術事業部
 野田克史：Katsufumi Noda. 沖エンジニアリング株式会社 信頼性技術事業部
 菅沼貞雄：Sadao Suganuma. 沖エンジニアリング株式会社 信頼性技術事業部
 岡克己：Katsumi Oka. 宇宙航空研究開発機構
 久保山智司：Satoshi Kuboyama. 宇宙航空研究開発機構
 松田純夫：Sumio Matsuda. 宇宙航空研究開発機構

本報告文は財団法人 日本科学技術連盟のご了解により日本科学技術連盟主催の第34回 信頼性・保全性シンポジウム発表報文集から修正し転載させていただきました。