

故障解析技術TF: 未知を既知にする次世代テクノロジー革新の キー技術

二川 清 (STRJ委員:NECエレクトロニクス)

丹藤 安彦 (STRJ委員:富士通)

益子 洋治 (STRJ委員:ルネサステクノロジ)

メンバー 1/2

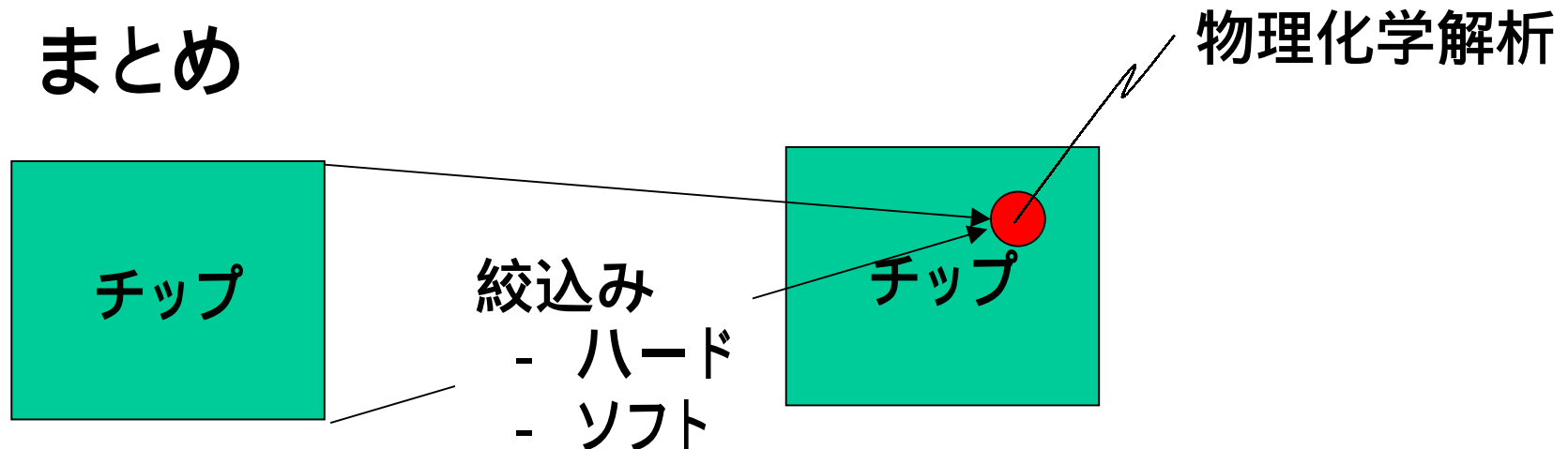
主査	二川 清	NECエレクトロニクス(株)
副主査	益子 洋治	(株)ルネサステクノロジ
委員	丹藤 安彦	富士通(株)
〃	今西 貞之	松下電器産業(株)
〃	吉田 英明	沖電気工業(株)
〃	利穂 武俊	三洋電機(株)
〃	朝比奈 秀夫	シャープ(株)
〃	福田 博文	ソニーセミコンダクタ九州(株)
〃	則松 研二	(株)東芝セミコンダクター社
〃	下地 則之	ローム(株)
〃	小川 真一	(株)半導体先端テクノロジーズ
〃	佐藤 康夫	(株)半導体理工学研究センター

メンバー 2/2

特別委員	沼川 幹夫	東芝ナノアナリシス(株)
〃	中島 蕃	NTTエレクトロニクス(株)
〃	足立 達哉	セイコーインスツルメンツ(株)
〃	三井 泰裕	(株)日立ハイテクノロジーズ
〃	二村 和孝	(株)日立ハイテクノロジーズ
〃	須賀三雄	日本電子
〃	寺田浩敏	浜松ホトニクス(株)

アウトライン

- イントロ (二川)
- ソフト・ハード インターフェース (丹藤)
- 絞込み技術 (二川)
- 物理化学解析技術 (益子)
- まとめ



故障解析TF発足の経緯と現在までの活動

- SIRIJ故障解析WG (2002/8-2002/12)
 - 「LSI故障解析技術開発強化の提言」(2003/1)
 - SIRIJ故障解析Pj準備委員会 (2003/2- 2003/ 5)
 - 「ULSI先端評価・解析技術開発の提案」(2003/5)
 - SIRIJ故障解析Pj準備委メンバーを中心としてJEITA・STRJ内に故障解析TFを新設し、今後も活動続けることを提案(2003/9)
 - = > 2003/10のSTRJ諮問委員会で正式に承認。
 - 2003/12 ~ 2004/2に3回の会合でロードマップに関して議論
 - 3つのサブワーキンググループ:
 - 絞込み
 - 物理化学解析
 - ソフト・ハードインターフェース
 - 今回の報告は活動開始報告。
- SIRIJ: 半導体産業研究所
JEITA: (社)電子情報技術産業協会
STRJ: 半導体技術ロードマップ専門委員会

故障解析TFで扱う「故障解析」の定義・範囲

- 対象物
 - 製造工程中の不良品：製品およびTEG(不良品)
(潜在不良(ボイドなど)を対象とするかは今後の議論)
 - スクリーニング、信頼性試験、実装、使用などにおいて故障した製品およびTEG(故障品)
 - (注)アナログ品は当面对象外とする。
- 解析の目的
 - チップ上の故障被疑箇所の絞込み
 - 故障診断(ソフト利用)を含むが、診断のアルゴリズムそのものは扱わない：ブラックボックスとしての利用
 - 故障被疑箇所の物理化学的解析による物理的原因解明
 - (注)チップ単位の良否判定は含まない

故障解析技術とその応用一覧:概要

()付きは開発途上のもの:2004年3月現在

故障解析技術	応用範囲					
	設計検証		故障個所絞込		物理化学解析	
	不良 解析	修理	断線/ ショート/ 高抵抗	接合/ ゲート リーク	構造	組成
光学顕微鏡	○					
光:静的						
光:動的			○			
電子ビーム			○			
イオンビーム			○			
Atom Probe	(○)				(○)	(○)
SPM						
物理化学処理						

故障解析技術とその応用一覧：詳細

()付きは開発途上のもの:2004年3月現在

故障解析技術		応用範囲					
		設計検証		故障個所絞込		物理化学解析	
		不良解析	修理	断線/ショート/高抵抗	接合/ゲート リーク	構造	組成
光学顕微鏡	金顕・(赤外)走査レ顕	○					
光:静的	PEM						
	OBIC/SCOBIC	○		○	○		
	L-SQUID	(○)		(○)			
	OBIRCH/熱電						
	液晶法						
	赤外熱顕微鏡						
光:動的	TREM			○			
	SDL						
	LVP			○			
	LTEM						
	LADA	(○)		(○)			
電子ビーム	EBT	○		○			
	SEM系			○			
	TEM系						
	AES	○					○
イオンビーム	FIB系			○			
	SIMS						
Atom Probe	レーザ励起タイプ	(○)				(○)	(○)
SPM	AFM/SCMなど						
物理化学処理	RIE						
	ウェットエッチ/研磨						
	レーザアブレーション						

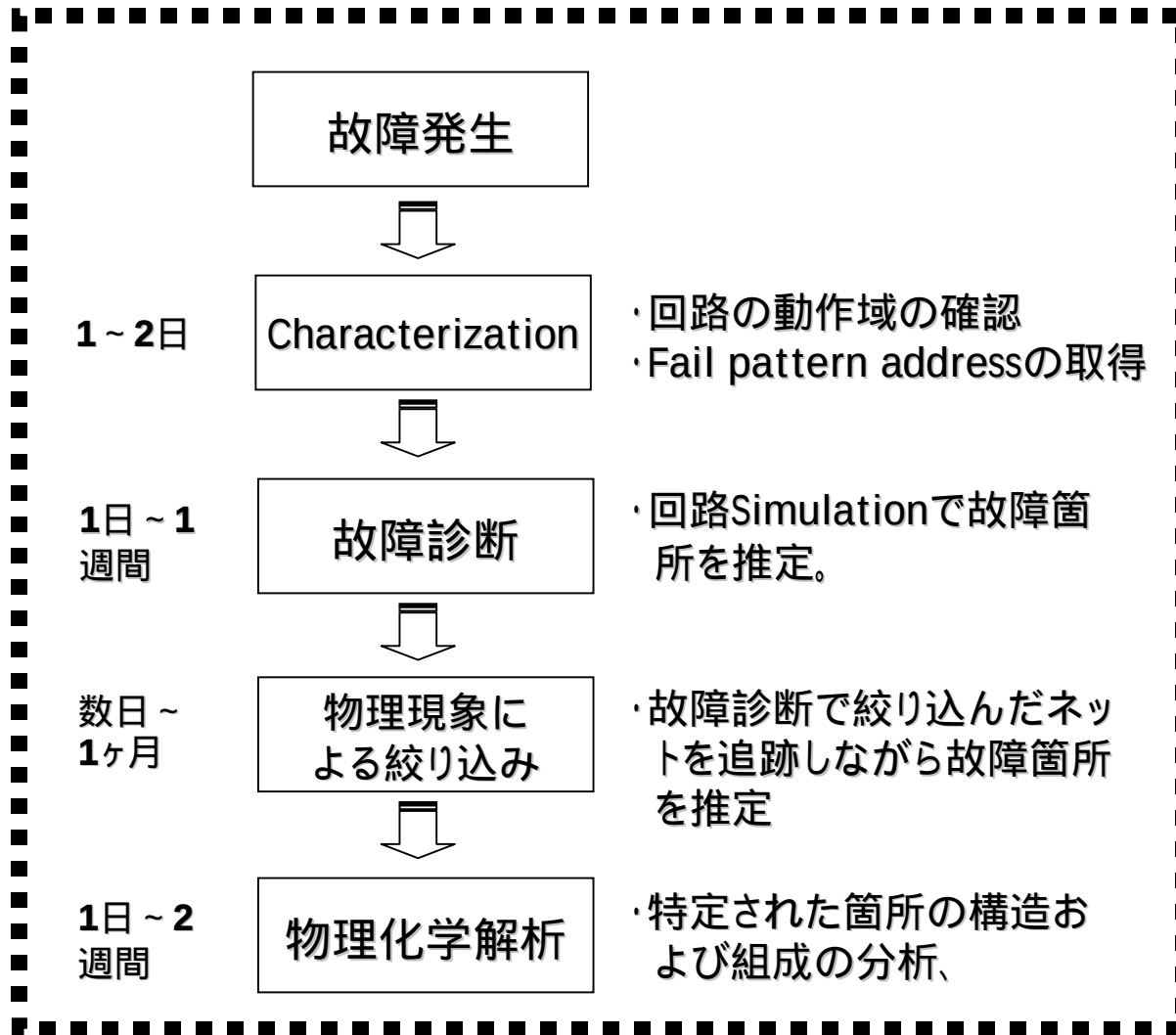
略語一覽

- PEM: Photo Emission Microscope
- OBIC: Optical Beam Induced Current
- SCOBIC: Single Contact OBIC
- L-SQUID: scanning Laser-SQUID microscope
- OBIRCH: Optical Beam Induced Resistance CHange
- 熱電: 熱電効果
- TREM: Time Resolved Emission Microscope
- SDL: Soft Defect Localization
- LVP: Laser Voltage Probing
- LTEM: Laser Terahertz Emission Microscope
- LADA: Laser Assisted Device Alteration
- EBT: Electron Beam Tester
- SEM: Scanning Electron Microscope
- TEM: Transmission Electron Microscope
- AES: Auger Electron Microscopy
- FIB: Focused Ion Beam
- SIMS: Scanning Electron Microscope
- SPM: Scanning Probe Microscope
- AFM: Atomic Force Microscope
- SCM: Scanning Capacitance Microscope
- RIE: Reactive Ion Etching

ハード・ソフト インターフェース SWG

丹藤 安彦
(STRJ委員:富士通)

故障解析の流れ



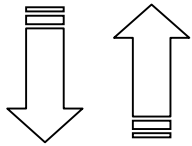
故障解析におけるInterfaceの問題を検討する為に、右図の様なフローをモデルケースとして考えました。

なお、左記のフロー中の一部は省略されることがあります。

検討の対象は故障診断以降とします。

故障解析におけるInterfaceの課題

故障診断

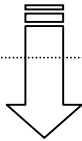


故障診断結果の取り込み

→(1)測定ポイントの座標 (2)電氣的な故障モードの推定結果 (3)Wave formの情報

故障診断結果の分解能が粗い。配線一本、Via一個まで絞り込む必要有り
絞り込み結果をFeedbackして再診断出来る仕組み作り

物理現象による絞り込み



設備の制約で異なるテストを使う場合がある。

→異なるテスト間のテストプログラム の可搬性

不良の再現に手間取る事とデバイス内部の信号を効率的に観測できない。

→試験系と解析系の違いを考慮し、短時間で繰り返し故障箇所を活性化する
為のテストベクタ発生 of の仕組みが必要。

故障箇所絞り込み結果の取り込み

→(1)測定ポイントの座標 (2)電氣的な故障モード

物理化学解析

物理解析装置間の連携

→解析サンプルの加工と観察における設備間の連携は異なるメーカー間
では不可能。(Ex. サンプルホルダー)

故障モデルへの解析結果のフィードバック

→解析結果を故障診断で使用している故障モデルへフィードバック

全体を統合するFrameworkの構築

Road Mapとして規定する項目

- 故障診断結果の分解能
 - 絞り込むネットの本数
 - 更に微細なレベル(配線、Via、Tr)への目標設定
- 故障再現技術
 - 試験環境と解析環境の違いの補正。
 - 温度制御 ~ $T_j > 100$?! → テスト設計時に回路毎の消費電力制御
 - 入力信号品質 ~ Timing/Noise etc...
 - 効率的な故障再現(解析用Vector発生)
 - 光を前提にTechnology nodeで有意な時間内で終わらせる為の指標設定。
 - 再実装技術が必要なデバイスの解析
 - デバイスの取り出しとハンドリング
 - 再実装
- CAD Navigation/Overlay
 - Technology nodeと共にStage精度の改善が必要。

将来必要な仕組みの提案

- テストプログラムの可搬性
 - 試験設備を変更して解析する場合に必要。
 - STIL(Standard Test Interface Language)では不足か?
- 故障解析のFramework
 - 故障解析の各フェーズで分断されているデータの流を統合し、故障解析業務の精度と効率化を図るシステムの必要性がある。
 - 測定ポイントの座標データ/電気的な故障モード(Open/Short) / 論理波形
 - 期待する機能
 - 測定ポイントまでの自動ナビゲーション
 - 測定結果と故障診断結果の比較検証
 - 期待する効果
 - 異なるメーカー製装置間で故障解析情報を共有化
 - 故障解析の効率改善
 - 試験設備と解析設備のHardwareとしてinterfaceの標準化も枠組みの一部とすべき。

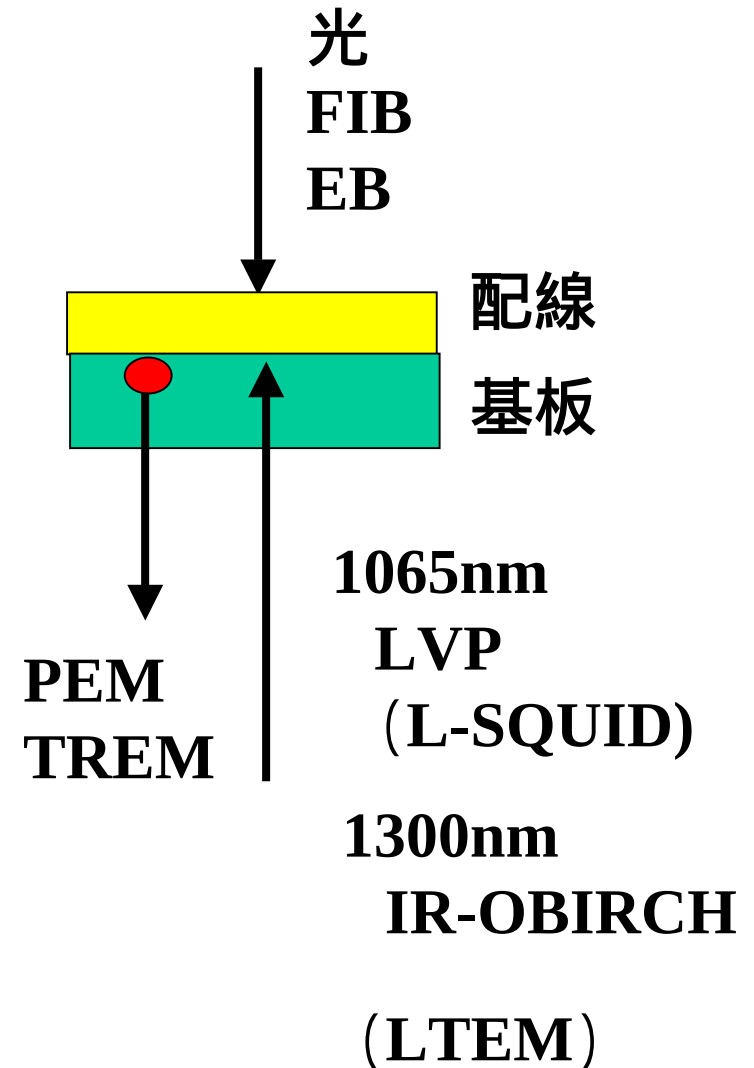
Hard-Soft Interfaceロードマップ

量産年		2003	2004	2007	2010	2013	2016	2018
Tech. Node*		(hp100)	hp90	hp65	hp45	hp32	hp22	(hp18)
配線層数**		9	10	11	12	12	14	14
最低電源電圧*5		0.9 (V)	0.9	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5
発光量(0.9vの時を1)		100%	107%	2.56%	25ppm			
故障診断の分解能		ネット		配線層		座標 (Segment, Via)		
故障 再現	冷却能力	T.B.D.						
	入力信号品質							
	再実装対応							
	解析時のサイクル時間 (現状を1とする)	100%	10%	2.5%	量子効率の高い信号検出方式開発必須			
CAD Navi.	Stageの精度(um) (*1)	<5.0	<5.0	<4.0	<2.5	<2.0	<1.5	<1.0
	Stageの位置再現性(um) (*1)	<5.0	<5.0	<4.0	<2.5	<2.0	<1.5	<1.0
	補正機能(*2)	SIL+Pattern Matching?			T.B.D.			

*1: 補正前 *2: Stage Driftは補正機能で修正されるとした。

絞込みSWG

二川 清
(STRJ委員:
NECエレクトロニクス)



故障解析絞込み技術ロードマップ

重要要因と手法の対応：総括表

量産年	2003	2004	2007	2010	2013	2016	2018
Tech. node*	(hp100)	hp90	hp65	hp45	hp32	hp22	(hp18)
配線層数**	9	10	11	12	12	14	14
最大IDDQ***	150mA		400mA		8 A	20 A	
最高周波数*4	10(Gb/s)	10	40	40	40	160	160
最低電源電圧*5	0.9 (V)	0.9	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5
光検出法							
光照射法							
電子照射法							
イオン照射法							
固体プローブ							

* ITRS2003より、以下同じ。hp=DRAM1/2 Pitch(nm)

** Interconnect pp.5-6, Tabel81a, 81b

*** Test and Test Equipment p.41 table35の表を元に大まかに割り当てた。

*4 入出力。Test and Test Equipment pp.20-21, table25a,25bより。

*5 Test and Test Equipment pp.24-25, table27a,27bより。

Work in Progress - Do not publish

STRJ WS: March 5, 2004, 故障解析技術TF

故障解析絞込み技術ロードマップ

重要要因と手法の対応：配線ピッチ

量産年		2003	2004	2007	2010	2013	2016	2018
配線ピッチ		(hp100)	hp90	hp65	hp45	hp32	hp22	(hp18)
光検出法	静	SIL*	SIL*	×	×	×	×	×
	動	SIL*	SIL*	×	×	×	×	×
光照射法	静	SIL*	SIL*	×	×	×	×	×
	動	SIL*	SIL*	×	×	×	×	×
電子照射法	静	○	○	○	○	○	○	○
	動	**	**	**	**	×	×	×
イオン照射法	静	○	○	○	○	○	○	○
	動							
固体プローブ		○	○			×	×	×

*配線部の分解能は間に絶縁膜があるため落ちる。SOIも同様。

**100nA, 30nmのSEM(リターディング技術、日立)。EBTとしての制約は未検討。

(注)寸法のみに着目しての○、
、×である。次ページ以降も同様：取り上げた要因のみ独立に着目。

故障解析絞込み技術ロードマップ

重要要因と手法の対応：配線層数

量産年		2003	2004	2007	2010	2013	2016	2018
配線層数		9	10	11	12	12	14	14
光検出法	静	○	○	○	○	○	○	○
	動	○	○	○	○	○	○	○
光照射法	静	*	*	*	*	*	*	*
	動	○	○	○	○	○	○	○
電子照射法	静	**	**	**	**	**	**	**
	動	**	**	**	**	**	**	**
イオン照射法	静	**	**	**	**	**	**	**
	動	**	**	**	**	**	**	**
固体プローブ		**	**	**	**	**	**	**

* 層数、ダミーメタルの影響と検出確率

**研磨、配線修正後の観測、パッド引出しの場合はアスペクト比の制限あり。

故障解析絞込み技術ロードマップ

重要要因と手法の対応法:IDDQ

量産年		2003	2004	2007	2010	2013	2016	2018
最大IDDQ		150mA		400mA		8 A	20 A	
光検出法	静	○	○	○	○	***	***	***
	動	○	○	○	○	***	***	***
光照射法	静	*	○ **	○ **	○ **	○ **		
	動							
電子照射法	静							
	動							
イオン照射法	静							
	動							
固体プローブ								

*OBIRCH法現状100mA、(検出電流精度は10nA)

** OBIRCH法2004年2Qには10A対応(Lock-in Amp使用)(検出電流精度は10nA)

***背景熱放射によりS/N大幅低下

故障解析絞込み技術ロードマップ

重要要因と手法の対応法：動作周波数

量産年		2003	2004	2007	2010	2013	2016	2018
最高周波数		10(Gb/s)	10	40	40	40	160	160
光検出法	静	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	動	*	*	×	×	×	×	×
光照射法	静	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	動							
電子照射法	静	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	動	**	**	**	**	**	**	**
イオン照射法	静	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	動							
固体プローブ				×	×	×	× ×	× ×

*現在最も高速のNbN SSPDでJitter18ps。1/5に分解必要とした場合を記した。

**サブpsのEBテストの報告有。但し、高速信号印加に関しては未検討。

故障解析絞込み技術ロードマップ

重要要因と手法の対応法：電源電圧

量産年		2003	2004	2007	2010	2013	2016	2018
最低電源電圧		0.9 (V)	0.9	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5
光検出法	静	○ *	○ *	*	× *	×	×	×
	動	○ **	○ **	**	**	×	×	×
光照射法	静							
	動							
電子照射法	静							
	動							
イオン照射法	静							
	動							
固体プローブ								

○ *MCTカメラ, InGaAsカメラ

○ **点検出: SSPD, InGaAs APD,
面検出: InP/InGaAs Photo Cathode

今後議論すべき他の観点など

1. PKGタイプ
2. TEM用試料の厚さと欠陥の種類の関係が重要
3. BISTによる故障部位活性化の困難
4. SOI (SILのNAに影響)
5. 材料の変化 (例: Low κ のレーザ耐熱)
6. SIP (System In Packages) などでの多層チップの解析前処理
7. 解析プロセスごとのボトルネック検討: 今後事例検討を行っていく。
8. 高電圧デバイスの系列

物理化学解析 S W G

益子 洋治
(STRJ委員:ルネサステクノロジ)

故障解析TF

— 物理化学SWG —

(範囲)

- ・故障の絞込みを受けて、故障メカニズムの解明までを実現。
これを可能とする情報の取得を目的とした解析技術

(技術を特徴づける要因)

- ・製造のコントロールを主眼とした技術ではなく、故障または不良の解析
- ・故障/不良チップに必ず含まれる原因(痕跡)からの情報読み取りを目的とした技術

(歩留まりを扱う場合のような確率の世界にはならない)

- ・非破壊である必要性はないが、試料が1個のみの場合も

物理化学分析・解析における評価項目分類

形状観察

(各寸法・構造のゆらぎからの不良、構造上での設計値からの局所的ずれによるランダム不良)

ー配線バリアメタルやオフセットスペーサー他の側壁カバレッジ、ゲート誘電体膜厚ゆらぎ、局所的膜厚異常、表面/側面ラフネス、ホール/開口不良、Via中のボイド他

極微量不純物分析

(トランジスタ特性不良、リーク、結晶欠陥)

ーS/D拡散層、ウェル、チャネル部の3D不純物(ポテンシャル)分布ー浅い接合、オーバーラップ、エクステンション横方向急峻性キャリア。高濃度層からの不純物の拡散。局所的ドーパント注入不良、汚染元素混入

結晶性評価

(SM, EM劣化、応力発生、バリア性劣化)

- 結晶構造、結晶方位・粒径分布、バリアメタル配向性

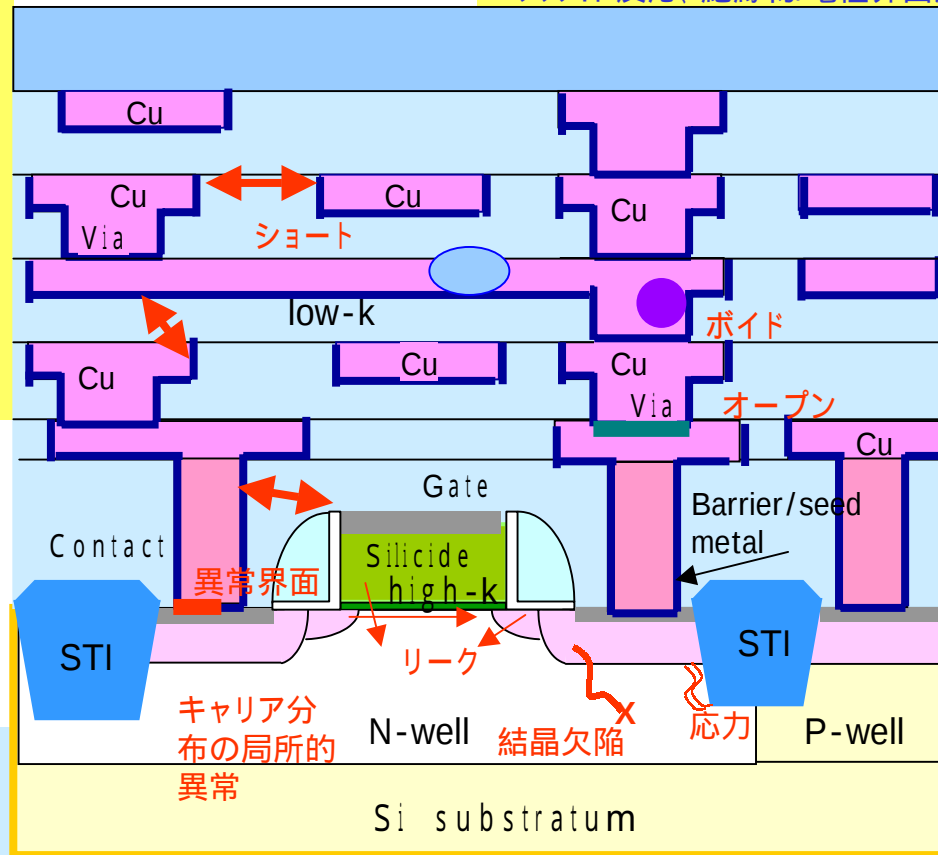
試料前処理ー測定部位の高精度抽出ーダメージレス前処理

材料組成分析

(薄膜残/生成物再付着によるオープン/ショート、抵抗増不良)ーコンタクト・ビアのアンダーエッチ等、レジスト残り、エッチング生成物、ハロゲン反応物、ゲート/基板界面構造、洗浄残留物、

(薄膜の組成変動による信頼性劣化)ーhigh-K(窒化SiO₂膜、High-k膜)、low-k材料、SiGe、TMR、カルコゲナイド材料、プロセスダメージ/層間膜中水素・水分分析

(界面反応による抵抗上昇、バリア性破壊、ショート等の特性劣化)ーシリサイド反応、絶縁物/電極界面反応、電極材料元素の拡散・反応



応力評価

(閾値変動、結晶欠陥誘起、膜剥離、抵抗値変動、ストレスマイグレーション、Cu配線応力誘起ボイド、歪みSi特性) - 配線残留応力、シリコンエリアの応力分布、層間膜応力

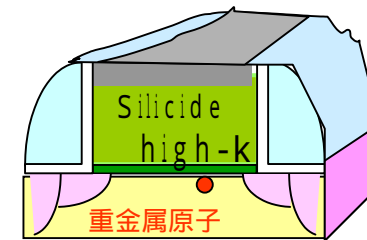
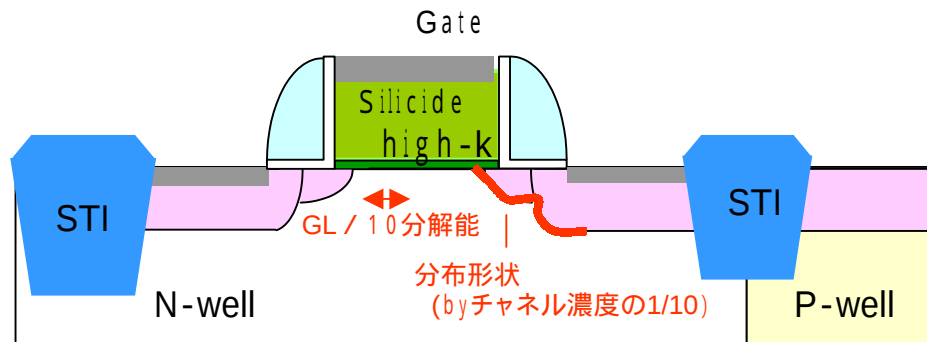
電気的評価

(トランジスタ特性抵抗変動・劣化、抵抗、リーク)ープロセスダメージ、界面準位変化、単体素子/局所エリアでの特性評価、= 物理解析の補完

物理・化学解析要求値 1 / 3

			2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
形状 観察	デバイス構造	最小パターン寸法 (nm)	0.65	0.53	0.45	0.4	0.35	0.32	0.28
	膜厚 / 界面	膜厚(nm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

極微量 元素 分析	ドーパント元素	検出感度	1.5E 17cm-3			2.0E17 cm-3		2.5E17 cm-3	
		空間分解能(nm)	4.5	3.7	3.2	2.8	2.5	2.2	
		3D	要	←	←	←	←	←	
	汚染不純物元素	検出感度	1atom/5E-17cm3		1atom/1.8E-17cm3		1atom/8.6E-18cm3		



物理・化学解析要求値 2 / 3

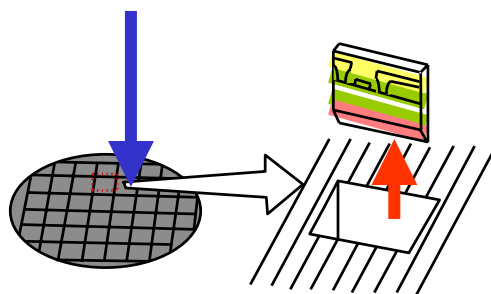
			2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
材料組成分析	薄膜組成分析	空間分解能(nm)	0.13	0.12	0.11	0.1	0.1	0.1	0.1
	残留 / 再生成付着薄膜	検出感度(膜厚)	2nm		1nm		0.5nm		0.3
		空間分解能(nm)	0.2		0.1				
	薄膜の膜質劣化	化学結合状態	要	←	←	←	←	←	←
		深さ方向分解能(nm)	0.625	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4	0.4
	界面反応	化学結合状態 / 物質構造	要	←	←	←	←	←	←
		平面分解能(nm)	32.5	26.5	22.5	20.0	17.5	16.0	14.0
深さ方向分解能(nm)		0.25	0.2	0.21	0.19	0.17	0.16	0.14	
等価酸化膜厚			等価酸化膜厚 / 2		横GLの 1/2		縦 シリサイド層の 1/10		

結晶性評価	薄膜多結晶	結晶構造 / 方位・粒径分布	要	←	←	←	←	←	←
		平面空間分解能(nm)	25	20	20	19	17	16	14
		感度膜厚(nm)	13	10	10	10	9	8	7
	シリサイド層厚(最小粒径 = 膜厚)			シリサイド層厚の1/2					

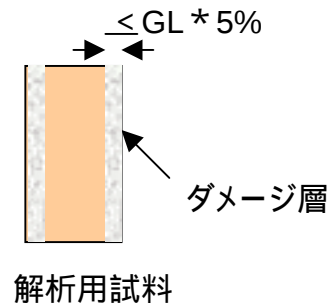
応力評価	シリコン領域	感度	100MPa	←	←	←			
		分解能(nm)	4.5	3.7	3.2	2.8	2.5	2.2	2
			Phys.GLの1/10						

物理・化学解析要求値 3 / 3

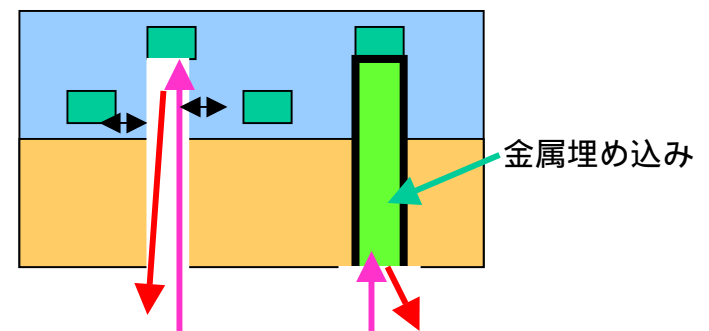
			2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
電氣的 評価	リークパス検出	絶縁膜電流リーク パス (pA) / ゲート	0.195		0.225		0.28		
		接合リークパス	100nA 50nA/10pA (CCD)						
	トランジスタ特性 抵抗値測定	単体分離測定	要	←	←	←	←	←	←
		探針分解能 (nm)	100	90	80	70	65	57	50
DRAM hp									
試料 前処理	解析対象部位 の抽出	抽出精度(nm)	60	50	40	—————▶ 35	—————▶		
		ダメージ層厚 max(nm)	2.25	1.85	1.6	1.4	1.25	1.1	1
	リバースエンジニア リング	剥離精度(nm)	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8
	チップ裏面 (ホール) 加工	開口精度 (nm)	30	26.75	23.75	21.25	19	16.75	15



解析用試料の抽出



解析用試料



チップ裏面からのアプローチ

物理・化学解析 技術

		2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
		hp90			hp65			
形状観察	デバイス構造	SEM			TEM			
	膜厚 / 界面	TEM/SPM						
	裏面パターン認識	IR-OM						
極微量元素分析	ドーパント元素	電子線フォロ グラフィー						
		SCM						
		Atom-probe (3D)						
	汚染不純物元素	TEM-EELS/EDX、Z-contrast						
薄膜組成分析 界面反応		TEM－EELS,EDX						
		EDX、AES、ESCA、SPM、イオンミ分析(RBS他)、NSOM分光						
結晶性評価	結晶構造	TEM						
	粒径・方位分布	TEM/EBSP						
応力評価		RAMAN、TEM、近接場RAMAN						
		X線、CBED						
電気的評価	絶縁膜電流リーク パス (pA)	IR-OBIRCH(電流変化量10pA、疑似信号により規格化された値)						
	接合リークパス	EM、OBIRCH、発熱(IR)検出						
	トランジスタ特性	単体分離測定(ハーフピッチ精度)						
	抵抗値測定	単体分離測定						
試料前処理	ダメージ層	FIB		ガスソースFIB				
	リバースエンジニア リング	レーザー						
	チップ裏面加工	EB加工						

Work in Progress - Do not publish

STRJ WS: March 5, 2004, 故障解析技術TF

故障の絞込み後の物理化学解析について

デバイス微細化

- 原子レベル分解能
- 試料加工技術の重要度増加
- 解析試料にセル毎、または複数セル
- 機械的応力の特性への影響が顕著化

3次元解析

3次元情報の完全性の維持保存
(解析データへの再アクセスのため)

機械的応力評価におけるデバイス構造
に対応した分解能
解析用試料加工による環境変化の防止要

まとめ

- 故障解析TFは3つのSWGに分かれて討議を開始した。
 - 絞込み
 - 物理化学解析
 - ソフト・ハード I/F
- 今後、1回/2ヶ月のペースで集合討議を行っていく。
- 半導体10社からの要望などは各社委員を通じて吸い上げ、討議に生かして行きたい。