

## 15. 計測

---

次世代技術としてパターンの微細化を進めたり、新材料・新プロセスを導入するためには、計測技術の進歩が不可欠の要件である。計測技術を用いることに依り、あらゆる製造段階において、歩留の改善を加速できる。また、装置の改良、試作ラインや新しい生産ラインの立上げ、および生産ラインでの歩留向上が可能になる。さらに、プロセス装置やプロセスの特性をより正確に把握できるようになることから、製造コストの削減や新製品を売出すまでの時間の短縮が可能になる。

計測に携わっている人々は、ロードマップの要求時期に間に合わせるため、研究・開発・装置試作での協力関係をもっと密にしなければならない。

パターン寸法 (feature size) の縮小に因って、2014 年の 35 nm 技術ノードでは、顕微鏡観察と膜厚測定が最大の課題となるであろう。

測定技術を CIM (computer integrated manufacturing: コンピュータ統合製造) やデータ管理システムに組み込むことに拠って、情報に基づいたプロセス制御が可能になる。計測の形態は、ロードマップの目標を達成するために、オフラインからインラインやその場計測へと、徐々に移って行くであろう。さらに、今後 10 年の間には、MEMS (micro-electromechanical systems) の進歩が、新しい種類のセンサやテスト構造を生み出すものと思われる。オフライン、インライン、そしてその場計測を使い分けることによって、APC (advanced process control: より進んだプロセス制御) や歩留の垂直立上げが可能になるであろう。

製造プロセスを安定化するためには、装置が安定でなければならない。どんな装置も、装置間差が無く、他の同種装置と同じ性能を発揮することが理想である。妥当な COO (cost of ownership) を維持しながら最大の生産性を得るためには、装置を上手に設計するだけでなく、装置に適切な計測手段を組み込むことが必要である。

### 15-1 スコープ

1999 年の計測ロードマップにおいて検討された項目は、顕微鏡観察、パターン寸法 (critical dimension: CD) と重ね合わせ精度、膜厚と膜の厚さ方向/薄層の深さ方向の分布、材料と汚染解析、ドーパントプロファイル、プロセス制御のためのその場計測用センサ (in-situ sensors、インシチュ・センサ)、標準試料/標準物質 (reference materials、訳者注: 寸法・形状に係わる reference materials を標準試料、その他に係わるものを標準物質とした)、物理測定と電気測定との相関、そしてパッケージング (封止技術) である。これらの項目は、‘統計限界に直面しているプロセス’の計測、顕微鏡観察、リソグラフィ、FEP、配線、材料と汚染の評価・解析、標準試料/標準物質、計測データの統合、そしてパッケージング用計測と題して、以降の各節で述べられる。

計測技術および標準 (訳者注: 国家的あるいは国際的な規格および標準試料/標準物質) の研究機関、標準の推進組織、計測装置メーカ、および大学において計測に携わる人達は、計測方法の標準化・改良および標準試料/標準物質の製作を推進するために、今後も引き続き協力して行くべきである。

自動操作における測定能力の評価指標であり、統計的プロセス制御 (statistical process control、SPC) に使用される測定の精密さ対プロセス許容度比 (P/T, precision to tolerance ratio) は、測定の精密さすなわち計測装置の測定ばらつきを、プロセス仕様値と関連づけるものである。

測定装置起因の測定ばらつきは、当該プロセスで処理された試料ではなく、標準試料/標準物質を用いて求められることが多い。したがって、公称測定精度 (measurement tool precision information) は、必ずしもプロセスウェーハ (product wafers、製品ウェーハ、生産ウェーハ) を測定する際の測定装置起因ばらつきを反映するものにはならない。装置感度が不十分なため、‘小さいけれども許容できないプロセス変動’を見逃すことも有り得る。

計測装置の分解能 (resolution capability, 訳者注:顕微鏡の分解能 resolving power を含め、より広い意味で用いられている) を統計的プロセス制御に使用できるように表現するため、測定の基準が必要である。分解能の種類は、厚さの測定には厚さ方向の空間分解能が要る、表面汚染金属のレベル測定には原子パーセントの違いを弁別するための検出分解能が要ると云ったように、対象プロセスに依存する。したがって、測定の基準を項目毎に定めることが、必要となるかも知れない。また、測定の基準を定め、プロセスの変動し易さと計測装置の変動し易さを切り分けられるようにすることは、非常に重要なことである。

測定の精密さ対プロセスの変動し易さの比 (measurement precision-to-process variability) の逆数は、信号対雑音比あるいは弁別比 (discrimination ratio) と称されることもある。

ウェーハメーカ、プロセス装置メーカ、試作ライン、および新しい生産ラインの夫々で、測定への要求内容および必要時期が異なる。試作ラインでは、短期間で立ち上げるために、試作開始前にプロセス装置やプロセス評価を進めなければならない。しかし、プロセスの完成度が高くなるにつれて、その必要性が減少して行く計測もある。デバイス寸法が縮小して行くのに伴ない、‘インラインで採られた重要な電気性能データに直接結びつく計測データ’を提供して行くことが、物理計測の課題となる。

## 健全な産業基盤 (infrastructure) の必要性

計測装置メーカが合理的な価格で計測装置、センサ、コントローラ、および標準試料/標準物質を供給しようとするならば、健全な産業基盤が必要となる。MEMS のような新技術が研究・開発を経て製品化されるためには、新規の研究・開発が必要となる。多くの計測装置メーカは小企業であり、先端的な用途向けに新しい装置を開発するだけの費用を負担できない。当初に売れるのは、プロセス装置およびプロセスの開発用だけである。開発した装置を量産用として半導体メーカに数多く売れるようになるまで、それから数年の間、持ち堪えなければならない。現在の経営基盤では、このように投資の回収が遅くては経営して行けない。新技術の基礎実験から装置試作・製品化を経て販売台数が増えるまで、計測装置メーカが必要とする投資資金を供給することが必要である。

## 15-2 大チャレンジ

2005 年までの計測技術に対するニーズは、新材料・新プロセスに関わるものが多い。したがって、今後の計測ニーズを全て洗い出すことは難しい。パターン寸法の縮小、しきい値電圧やリーク電流のようなデバイスパラメータのより精密な制御、そして新しい配線材料は、物理計測技術に大きな課題を与える。所望のデバイス・スケージングを成し遂げるためには、原子距離単位での特性測定ができねばならない。表 81 に、計測の 10 大課題を示す。

100 nm ノード/2005 年以前の 5 大チャレンジ	問題の内容
工場および会社規模でのその場/インライン計測データの統合;頑丈なセンサ (robust sensors、訳者注:測定精度に余裕があり、環境の変動などに強いセンサ) およびプロセスコントローラの開発;センサの追加統合が可能なデータ管理	プロセスコントローラおよびデータ管理の標準規格が必要である。大量な生データを歩留向上に有用な情報に転換することが必要である。トレンチのエッチング終点検出センサ、イオン種/イオンエネルギー/ドーズ量(電流)のモニタ、および RTA 処理時のウェーハ温度センサの開発が必要である。
シリコンウェーハ (starting materials) を対象とした微粒子/酸素/金属など不純物の所要感度での検出、およびウェーハ周辺部の検査不能領域の削減。	現行のままでは、ロードマップの目標レベルを達成できない。極微小粒子の検出とサイズ分類が必要である。シリコン内部あるいは SOI シリコン層内の微量金属の検出が必要である。
低誘電率 (low k) 層間膜材料の誘電率を、基準周波数の 5 倍から 10 倍の周波数で測定すること。	計測装置/計測手法/テスト構造の実用化と、それ等を‘クロック高調波/表皮効果/クロストーク/材料の異方性を左右する低誘電率層間膜材料’に適用することが必要である。
ダマシンのような高アスペクト比技術を制御するための計測技術。	プロセス制御に必要とされる新しいニーズが不明確である。例えば、新しい低誘電率材で作られたトレンチ構造の 3 次元 (CD と深さ) 測定が必要であろう。
複雑な積層材料の測定。	界面層/配線バリアや低誘電率層のような薄膜と、新しい高誘電率 (high k) ゲート/容量絶縁膜との積層構造について、その標準試料/標準物質と標準的な測定方法、および界面層の特性評価が必要である。バリア層についても同様である。
ウェーハおよびマスクのパターン寸法測定/重ね合わせ精度測定/欠陥検出/解析に使用する非破壊の生産用顕微鏡観察技術。	表面帯電およびコンタミネーションは像障害の原因となる。寸法測定ではパターン側壁の形状を考慮しなければならない。ダマシンプロセスにおけるトレンチ構造の寸法測定が必要である。
極めて薄いゲート/容量絶縁膜のような新材料の信頼性をテストするための標準的な電気試験法。	ゲート/容量用の新高誘電率絶縁材料の疲労メカニズムが解明されていない。
統計変動が顕在化する 70 nm 以ノード以降でのプロセス制御。	自然現象としてのゆらぎが計測を制限する領域では、プロセスを制御することが困難となろう。例えば、低ドーズのイオン注入、薄いゲート絶縁膜、および極微細構造でのエッジラフネスである。
ドーパントプロファイルの 3 次元計測。	活性領域の大きさがドーパントの原子間距離に近づくことに起因して、プロセスシミュレーションおよび計測が複雑化する。ドーパント元素の濃度を、所要空間分解能で測定することが不可能である。
電気特性と SPC とを一对一で突き合わせられるようにするため、生産用としてインラインで使用可能なトランジスタプロセスの物理計測。	ゲート絶縁膜/CD/ドーパントのドーズ量・プロファイルを対象とした一連の物理計測を、70 nm ノード以降のデザインルールに十分適用できるように、充実させることが必要である。

表 81 計測における大チャレンジ

### 15-3 技術的要求

計測装置に対する主な目標到達レベルを表 82-85 に示す。顕微鏡観察の分解能は、パターン寸法測定装置からの要求であり、幅が異なるラインを見分けるために必要となる。2次元および3次元のドーパントプロファイル観測に必要なとされる空間分解能は、モデリング&シミュレーションから出された要求である。2次元ドーパントプロファイルについての要求に応えることは難しい、少々空間分解能が悪くても、観測可能な方法があれば、有用な情報が得られるだろう。あらゆる計測について、測定の正確さを保証するために、適当な標準試料/標準物質が必要となる。

年 技術ノート	1999 180 nm	2000	2001	2002 130 nm	2003	2004	2005 100 nm	牽引役
DRAM ½ ピッチ	180	165	150	130	120	110	100	D½
MPU ゲート長	140	120	100	85	80	70	65	M Gate
顕微鏡観察								
インライン、非破壊顕微鏡観察 の分解能 (nm) for P/T=0.1	1.4	1.2	1.0	0.85	0.8	0.7	0.65	M Gate
最大アスペクト比/直径 (nm) (DRAM コンタクトホール) [A]	6.3 200	6.7 175	7.1 160	7.5 140	8.0 130	8.5 120	9 110	D½
物質および汚染の評価・解析								
実微粒子の検出感度 (nm) [B]	90	82	75	65	60	55	50	M Gate
組成分析可能な最小の微 粒子サイズ* (nm)	48	40	33	28	27	23	22	M Gate
表面汚染金属の限界仕様: Ca, Co, Cu, Cr, Fe, K, Mo, Mn, Na, Ni の総量 (atoms/cm <sup>2</sup> )	≤9×10 <sup>9</sup>	≤7×10 <sup>9</sup>	≤6×10 <sup>9</sup>	≤4.4×10 <sup>9</sup>	≤3.4×10 <sup>9</sup>	≤2.9×10 <sup>9</sup>	≤2.5×10 <sup>9</sup>	M Gate
表面汚染金属の検出限界: Ca, Co, Cu, Cr, Fe, K, Mo, Mn, Na, Ni の各元素 (atoms/cm <sup>2</sup> ) 信号対雑音比 3:1	≤9×10 <sup>8</sup>	≤7×10 <sup>8</sup>	≤6×10 <sup>8</sup>	≤4.4×10 <sup>8</sup>	≤3.4×10 <sup>8</sup>	≤2.9×10 <sup>8</sup>	≤2.5×10 <sup>8</sup>	M Gate

表 82a 計測の技術的要求—短期

年 技術ノード	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm	牽引役
DRAM ½ ピッチ	70	50	35	D½
MPU ゲート長	45	32	22	M Gate
顕微鏡観察				
インライン、非破壊顕微鏡観察の分解能 (nm) for P/T=0.1	0.45	0.32	0.22	M Gate
最大アスペクト比 / 直径 (nm) (DRAM コンタクトホール) [A]	10.5 80	12 60	13.5 45	D½
物質および汚染の評価・解析				
実微粒子の検出感度 (nm) [B]	35	25	17	M Gate
組成分析可能な最小の微粒子サイズ (nm)	15	10	7	M Gate
表面汚染金属の限界仕様: Ca, Co, Cu, Cr, Fe, K, Mo, Mn, Na, Ni の総量 (atoms/cm <sup>2</sup> )	≤ 2.1×10 <sup>9</sup>	≤ 1.8×10 <sup>9</sup>	≤ 1.7×10 <sup>9</sup>	M Gate
表面汚染金属の検出限界: Ca, Co, Cu, Cr, Fe, K, Mo, Ni, Na, Ni の各元素 (atoms/cm <sup>2</sup> ) 信号対雑音比 3:1	≤ 2.1×10 <sup>8</sup>	≤ 1.8×10 <sup>8</sup>	≤ 1.7×10 <sup>8</sup>	M Gate

表 82b 計測の技術的要求—長期

[A] デュアルダマシンプロセスの場合には、金属とビアホールのアスペクト比が付加される。

[B] この値は表面のマイクロラフネスや組成に依存する。

### 15-3-1 統計限界に直面するプロセスの計測

デバイスの寸法縮小がこのまま進むと、素子を構成する原子の大きさが無視できなくなり、パターン寸法の統計変動として顕在化する。例えば、長さ50 nmのゲートでは、ゲート端に在るシリコン原子の大きさが、ゲート長の約0.6%に当たる。多層のゲート絶縁膜では、各層の厚さが僅か数原子層に過ぎず、統計変動の影響がもっと顕著に現れるかも知れない。十分に均一なバリア層厚さ/トンネル電流密度/誘電率特性を得るためには、これらの統計変動を考慮した素子構造設計が必要となる。先進的な多層絶縁膜の特性を理解するためには、今後も計測技術を進歩させて行くことが必要である。

配線技術は、半導体基板中に侵入させてはならないCuのような導電材や低誘電率 (low k) の層間絶縁材を用いることで、進歩している。バリア層については、プロセスやプロセスモデルからすると、'僅か数原子層程度の厚さで、ピンホールの無い膜'を形成することが要求される。計測としては、極薄バリア層の品質・信頼性を保証できるように、技術開発を進めなければならない。

半導体素子内に在るドーパント原子や真性欠陥の位置は、必ずばらつくものであり、トランジスタの輸送特性を変動させることになる。空乏層内でのドーパント原子や真性欠陥の局所的密度・位置の統計変動は、トランジスタ特性を大きくばらつかせる。これらの統計変動を吸収し得るように、デバイス

設計での革新が求められる。これまで用いられてきた決定論的(連続的)なモデル技術を補足できるように、確率的なモデルを考えることが必要となる。計測には、2次元および3次元のドーパントプロファイルを観測できるようにすることが、切に求められている。

使用材料や素子構造に現れるこれらの統計変動は、測定の不確かさ (measurement uncertainty、測定値のばらつきを表すもの) とは無関係であり、測定量の全不確かさ (total uncertainty) に二次的に加えられるものである。さらに、回路およびプロセスは、その方法は未だ具体的ではないが、統計変動を考慮して設計されねばならない。計測と直接的な関係がない基本的物理現象のために、ロードマップの中で挙げられた次世代デバイスに係わるパラメータの多くについては、所要の測定精度を満足できないように思われる。

### 15-3-2 顕微鏡観察 (microscopy)

顕微鏡観察は、核となるプロセス技術の多くに用いられている。顕微鏡は、典型的には、遠視野光線 (far field light、訳者注:回折可能な領域内での光線)、電子ビーム、あるいは走査メカニカルプローブ (scanned probe) を利用している。インライン計測における顕微鏡応用としては、欠陥/微粒子の検出、欠陥レビュー(欠陥像のインライン観察)/自動欠陥分類とともに、CDや重ね合わせ精度の測定が挙げられる。プロセスウェーハの付加価値が高いため、高速・非破壊・インラインで測定したいとの要求が増大している。パターン寸法測定に加えて、形状計測がインライン化されるべきである。

走査型電子顕微鏡観察 (SEM) は、断面加工試料の観測/微粒子および欠陥の解析/欠陥像のインライン観察/CD の測定に、オフライン (at-line、訳者注:米国では工場内でのオフライン計測を at-line と云い、offline はウェーハを工場外に持ち出して行うオフライン計測を意味する) およびインラインの像観察法として用いられている。100 nm 技術ノード以降も、CD 測定や欠陥レビュー(および試作ラインでの欠陥検出)に有効利用して行くためには、改良が必要である。十分な解像度を保ちながら、試料表面の帯電/コンタミネーション/照射損傷に因る像質の劣化を防ぐためには、超低エネルギー (<250 eV) 電子ビームのような新しいインライン SEM の技術が必要となる。球面収差を低減して SEM の分解能を上げようとする、実用にならないほど焦点深度が浅くなってしまふ;したがって、像形成方式に依らない(得られた像が収差や回折の影響を受けない)ホログラフィのような方法が好ましい。

試料帯電の影響や信号処理系の働きを考慮できるように、信号発生・処理のモデルを改善することが必要である。CD 測定の精度を向上するためには、対象試料と得られた信号波形との関係を良く理解することが必要である。試料損傷は、ビームの直接衝突に因る試料内原子の電離やゲート構造上での帯電に因って惹起されるものであるが、荷電粒子ビームを用いる全ての顕微鏡にとって、それらの適用限界を決める基本的要因となる。

100 nm 技術ノード以降のコンタクト/ビアのホール、トランジスタのゲート、配線あるいはダマシンのトレンチでは、側壁の 3 次元的形状を計測することが必要であり、現行の顕微鏡観察法や試料作製法を更に進歩させることが望まれる。FIB を用いた断面加工/リフトアウト(訳者注: FIB を用いてウェーハから TEM 試料を作製し TEM 試料台に装填すること)は、TEM あるいは STEM での像観察を行うために、有用であることが実証されている。また、側壁形状を 3 次元観測するための方法として、

反射型の電子線ホログラフィが提案されている。

走査プローブ顕微鏡観察 (SPM) は、CD-SEM の寸法測定値を校正するために使用されるかも知れない。鋭いプローブを用いた SPM は、被測定試料が導電性であるか否かに影響されることなく、3次元形状を測定することができる。しかし、プローブがほっそりし過ぎて曲ったりすると、計測精度が悪くなる。したがって、鋭部の形状とアスペクト比は、プローブ材質と走査時に受ける力を考慮して決めなければならない。カーボンナノチューブ (nanotube、訳者注: nm 程度の径で薄い壁の円筒) のような非常に硬いプローブ材料が、この問題の解となる。

遠視野顕微鏡観察 (far-field optical microscopy、訳者注: 回折光を利用した顕微鏡すなわち通常の光学顕微鏡での観察) の解像度は、その限界が光の波長で決まる。この限界を打破するため、DUV の光源や近視野顕微鏡観察法 (near-field microscopy、訳者注: 光が波としての性質を發揮できない極微小な領域すなわちエバネッセント場を利用した顕微鏡での観察) が開発されつつある。欠陥を自動で分類できるように、ソフトウェアの改良が必要である。光学顕微鏡は、マルチチップモジュールのハンダバンプのような大きなパターン形状検査に、今後も引き続いて使われて行くであろう。

欠陥検出に関しては、各技術とも極限的な問題を抱えている。欠陥は、歩留り低下の恐れがある全ての物理的・電気的あるいはパラメータ的な異常 (deviation) として、定義される。現行の SEM や SPM の欠陥検出速度は、光学顕微鏡で見えない小さな欠陥を検査工程で効果的に検出するためには、余りにも遅すぎる。アレー型 (訳者注: 複数の SPM を並列に配置した) SPM を用いれば、高速走査はできるが、プローブ先端の均一性/特性/耐久性に係わる問題が在る。アレー型 SPM 技術は、比較的なだらかな傾斜を有する表面、したがって表面平坦度の評価に有用であると思われる。アレー型 SPM は、並べる SPM の数を増やすこと、および多様な操作モード (additional operational modes、訳者注: コンタクトモード AFM、AC モード AFM、STM など) を開発することが課題である。高スループットを得る方法として、アレー型マイクロカラム SEM (訳者注: 超小型鏡筒を複数配列した SEM) が提案され、単鏡筒のマイクロカラム SEM ではその動作が確認された。静電および磁界レンズの設計限界に挑む研究が必要である。

### 15-3-3 リソグラフィにおける計測

リソグラフィ技術の進歩に合わせて測定の精密さ/再現性 (訳者注: 精密さと再現性は殆ど同義語である) を向上することは、物理計測技術に課せられた命題であるが、要求到達レベルを達成できていない。光リソグラフィが今後使われ続けるにしても、次世代リソグラフィ技術 (NGL: next generation lithography) が使われるようになるにしても、ウェーハおよびマスク計測に対する新しい要求が出てくるであろう。マスクおよびウェーハ用寸法測定装置の解像度/正確さ/装置間マッチング/再現性の全てにおいて、ニーズの必要時期が早まる傾向にあり、ニーズに応えようとするならば、画期的な進歩が必要となる。

計測技術者は、寸法および重ね合せ精度の測定から 3次元形状データを効果的に抽出できるようにし、高水準のプロセス制御をできるようにしなければならない。フィードフォワード制御の考え方は、リソグラフィ用計測にも当てはめられる。レジストパターンの測定データを用いて、エッチングなど、以

降の工程を制御し、デバイス性能を向上させねばならない。電気測定は、ゲート線幅や配線線幅を監視できるが、欠陥が検出できたとしてもウェーハを再生処理するには遅すぎる。重ね合せ精度の目標レベルを達成して行くためには、像コントラストの低下に起因する問題への対応も含めて、新しい光学的手法/SEM/走査プローブ顕微鏡 (SPM)の開発を加速することが必要であろう。

マスクのパターン位置測定は、新しいリソグラフィ技術の多くがマスク描画時にパターン毎の歪み補正を必要とするようになることから、一層複雑になる。パターンの歪補正は開発の初期段階で検証されねばならず、開発時期に用いられる計測装置にとっての大きな課題となる。ウェーハでの重ね合せ精度測定においても、ステップ&ステイッチ露光装置が導入されれば、新たな問題が課せられる。動的平均処理のような統計的手法が研究されている。スキヤタロメトリ (scatterometry)のような革新技術は、実用される前に応用開発が要る。顕微鏡観察の節で述べたような課題を含め、更なる革新が必要とされる。リソグラフィに係わる必要到達レベルが表 83、解決策候補が図 59 に示されている。

年 技術ノート <sup>1</sup>	1999 180 nm	2000	2001	2002 130 nm	2003	2004	2005 100 nm
ウェーハ:ゲートの加工寸法精度*	13	10.8	9.0	8.1	7.2	6.3	5.9
ウェーハ:緻密ラインの加工寸法精度*	18	16.5	15	13	12	11	10
ウェーハ:コンタクトホール <sup>2</sup> の加工寸法精度*	20	18.5	17	15	14.5	14	13
ウェーハ:孤立ラインのCD測定精度* P/T=0.2 **	2.6	2.2	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2
ウェーハ:緻密ラインのCD測定精度* P/T=0.2 **	3.6	3.3	3.0	2.6	2.4	2.2	2.0
ウェーハ:コンタクトホール <sup>2</sup> のCD測定精度* P/T=0.2 **	4.0	3.7	3.4	3.0	2.9	2.6	2.3
ウェーハ:同一寸法パターン間の測定平均値 の最大ばらつき (%)	10	10	10	10	10	10	10
マスク:孤立ラインの加工寸法精度*	16	14	12	10	9	8	7
マスク:緻密ラインの加工寸法精度*	24	21	17	13	12	11	10
マスク:コンタクトホール <sup>2</sup> の加工寸法精度 コンタクト面積の平方根で正規化*	24	21	17	14	13	12	11
マスク:孤立ラインのCD測定精度* P/T=0.2 **	3.2	2.8	2.4	2	1.8	1.6	1.4
マスク:緻密ラインのCD測定精度* P/T=0.2 **	4.8	4.2	3.4	2.6	2.4	2.2	2
マスク:コンタクトホール <sup>2</sup> の面積測定精度 P/T=0.2、面積の平方根で正規化	4.8	4.2	3.4	2.8	2.6	2.4	2.2
ウェーハ:パターン重ね合わせ精度 (nm)	65	58	52	45	42	38	35
ウェーハ:パターン重ね合わせ測定精度 (nm, 3 $\sigma$ )* P/T=0.1	6.5	5.8	5.2	4.5	4.2	3.8	3.5
マスク:パターン位置精度	39	35	31	27	25	23	21
マスク:パターン位置測定精度 P/T=0.1	3.9	3.5	3.1	2.7	2.5	2.3	2.1
マスク:位相差精度 (度)	2	2	2	2	2	2	2
位相差測定精度 P/T=0.2 (度)	.4	.4	.4	.4	.4	.4	.4
ハーフトンマスクの透過率の正常値からのずれ (%)	4	4	4	4	4	4	4
ハーフトンマスクの透過率測定精度 P/T=0.2 (%)	.8	.8	.8	.8	.8	.8	.8

表 83a リソグラフィにおける計測技術の目標到達レベル—短期

\* 測定精度は全て、nmを単位とした3 $\sigma$ 値で表わされており、測定装置の機差も含まれている。

\*\* 測定装置の性能は、ラインの形状、材質、および密度に依存しないようにしなければならない。

年 技術ノート <sup>1</sup>	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
ウェーハ:ゲートの加工寸法精度*	4.0	3.0	2.0
ウェーハ:緻密ラインの加工寸法精度*	7.0	5.0	3.5
ウェーハ:コンタクトホール <sup>2</sup> の加工寸法精度*	8.0	5.5	4.0
ウェーハ:孤立ラインのCD測定精度* P/T=0.2 **	0.8	0.6	0.4
ウェーハ:緻密ラインのCD測定精度* P/T=0.2 **	1.4	1.0	0.7
ウェーハ:コンタクトホール <sup>2</sup> のCD測定精度* P/T=0.2 **	1.6	1.1	0.8
ウェーハ:同一寸法パターン間の測定平均値の最大ばらつき (%)	10	10	10
マスク:孤立ラインの加工寸法精度*	7	5	3.3
マスク:緻密ラインの加工寸法精度*	11	8	5.6
マスク:コンタクトホール <sup>2</sup> の加工寸法精度 コンタクト面積の平方根で正規化*	12	9	6.4
マスク:孤立ラインのCD測定精度* P/T=0.2 **	1.4	1.0	0.7
マスク:緻密ラインのCD測定精度* P/T=0.2 **	2.2	1.6	1.1
マスク:コンタクトホール <sup>2</sup> の面積測定精度 P/T=0.2、面積の平方根で正規化	1.6	1.8	1.3
ウェーハ:パターン重ね合わせ精度 (nm)	25	20	15
ウェーハ:パターン重ね合わせ測定精度 (nm, 3σ)* P/T=0.1	2.5	2.0	1.5
マスク:パターン位置精度	15	12	9
マスク:パターン位置測定精度 P/T=0.1	1.5	1.2	0.9
マスク:位相差精度 (度)	1	NA	NA
位相差測定精度 P/T=0.2 (度)	0.2	NA	NA
ハーフトンマスクの透過率の正常値からのずれ (%)	4	NA	NA
ハーフトンマスクの透過率測定精度 P/T=0.2 (%)	0.8	NA	NA

表 83b リソグラフィにおける計測技術の目標到達レベル—長期

\* 測定精度は全て、nmを単位とした3σ値で表わされており、測定装置の機差も含まれている。

\*\* 測定装置の性能は、ラインの形状、材質、および密度に依存しないようにしなければならない。

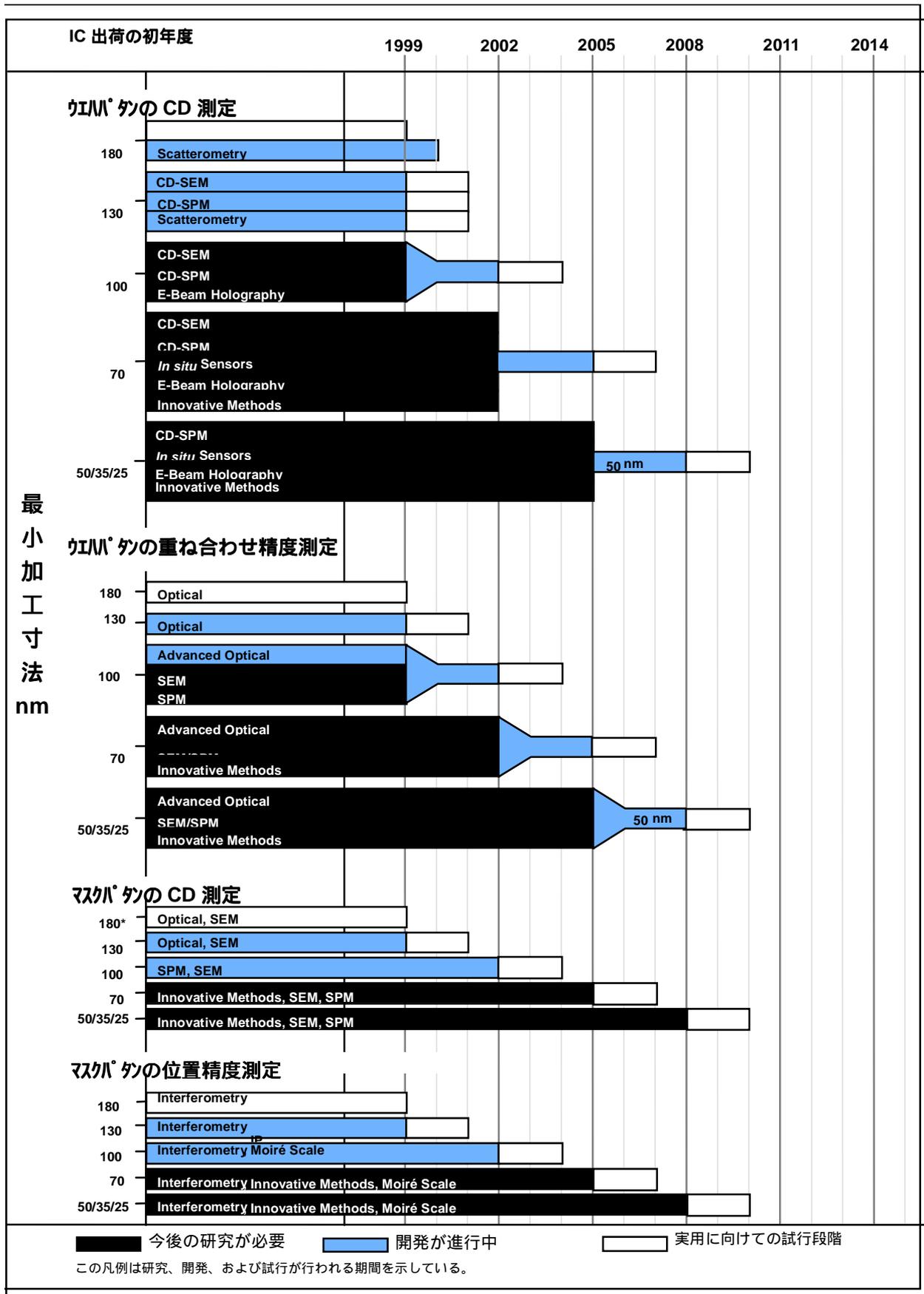


図 59 リソグラフィ用計測における解決策候補

#### 15-3-4 FEP における計測

次世代技術の導入時期が早められる傾向にあり、トランジスタの開発・製作時に使われる計測も、その技術開発を加速しなければならない。本節では、シリコンウェーハ/洗浄/熱酸化および膜堆積/ドーピング(ドーパントの導入あるいは注入)/FEP 用プラズマエッチングに特有な計測ニーズを検討する。計測ニーズはプロセスの許容範囲に拠って決められる。一方、リーク電流の制御/しきい値の低電圧化とゲート遅延の短縮/それらの許容度と云ったプロセスインテグレーションの課題が、ゲート絶縁膜の厚さ/ドーパントの分布/接合深さ/ドーズ量と云ったプロセスパラメータの許容範囲と密接に関連している。プロセス許容度のモデルを作ることは、トランジスタの計測を考える上で、重要な要件となる。FEP における計測の目標到達レベルを表 84、解決策候補を図 60 に示す。

年 技術ノード	1999 180 nm	2000	2001	2002 130 nm	2003	2004	2005 100 nm	牽引役
DRAM ½ ピッチ	180	165	150	130	120	110	100	D½
MPU ゲート長	140	120	100	85	80	70	65	M Gate
P <sup>+</sup> 基板中酸素濃度範囲 (ASTM 79); 測定精度 ± 0.5 ppma [A]	18-31	18-31	18-31	18-31	18-31	18-31	18-31	
バルクおよび SOI トップ Si 層内の 微量金属の許容値 (Fe 濃度、 atoms/cm <sup>3</sup> )	1 × 10 <sup>10</sup>	< 1 × 10 <sup>10</sup>	< 1 × 10 <sup>10</sup>	< 1 × 10 <sup>10</sup>	< 1 × 10 <sup>10</sup>	< 1 × 10 <sup>10</sup>	< 1 × 10 <sup>10</sup>	
バルクおよび SOI トップ Si 層内微量 金属の検出感度 (Fe 濃度、 atoms/cm <sup>3</sup> )	1 × 10 <sup>9</sup>	< 1 × 10 <sup>9</sup>	< 1 × 10 <sup>9</sup>	< 1 × 10 <sup>9</sup>	< 1 × 10 <sup>9</sup>	< 1 × 10 <sup>9</sup>	< 1 × 10 <sup>9</sup>	
ロジック用ゲート絶縁膜の酸化膜換 算膜厚 (nm) ± 3σ プロセス許容変動範囲	1.9-2.5 ± 4%	1.9-2.5 ± 4%	1.5-1.9 ± 4%	1.5-1.9 ± 4%	1.5-1.9 ± 4%	1.2-1.5 ± 4%	1.0-1.5 ± 4%	M Gate
ロジック用ゲート絶縁膜膜厚測定精 度 3σ (nm) [B]	0.0075	0.0075	0.006	0.006	0.006	0.005	0.004	M Gate
DRAM 容量絶縁膜: 構造・材質・ (誘電率)・酸化膜換算膜厚 (nm)	Cyl. MIS Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  (22) 3.0	Cyl. MIS Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  (22) 3.0	Cyl. MIS Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  (22) 3.0	Pedestal MIM Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  (50) 0.95	Pedestal MIM Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  (50) 0.95	Pedestal MIM Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  (50) 0.95	Pedestal MIM BST  (250) 0.45	D½
DRAM 容量絶縁膜膜厚 (nm) ± 3σ プロセス許容変動範囲	11.5 ±4%	11.5 ±4%	11.5 ±4%	12.2 ±4%	12.2 ±4%	12.2 ±4%	28.7 ±4%	D½
DRAM 容量絶縁膜膜厚測定精度 (nm 3σ) [C]	0.046	0.046	0.046	0.049	0.049	0.049	0.11	D½
2D および 3D トーハントプロファイル測 定の空間分解能 (nm)	3	3	3	2	2	2	1.5	
オフラインでのトーハント濃度測定精 度(濃度範囲にわたって) [D]	5%	5%	5%	4%	4%	4%	3%	

表 84a FEP における計測技術の目標到達レベル—短期

年 技術ノード*	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm	牽引役
DRAM 1/2 ピッチ	70	50	35	
MPU ゲート長	45	32	22	
P <sup>+</sup> 基板中酸素濃度範囲(ASTM 79);測定 精度±0.5 ppma [A]	18 – 31	18–31	18–31	
バルクおよび SOIトップ Si 層内の微量金属の 許容値 (Fe 濃度、atoms/cm <sup>3</sup> )	< 1 × 10 <sup>10</sup>	< 1 × 10 <sup>10</sup>	< 1 × 10 <sup>10</sup>	
バルクおよび SOIトップ Si 層内微量金属の検 出感度 (Fe 濃度、 atoms/cm <sup>3</sup> )	< 1 × 10 <sup>9</sup>	< 1 × 10 <sup>9</sup>	< 1 × 10 <sup>9</sup>	
ロジック用ゲート絶縁膜の酸化膜換算膜厚 (nm) ± 3σ プロセス許容変動範囲	0.8–1.2 ± 4%	0.6–0.8 ± 4%	0.5–0.6 ± 4%	MPU
ロジック用ゲート絶縁膜膜厚測定精度 3σ (nm) [B]	0.0032	0.0024	0.002	MPU
DRAM 容量絶縁膜:構造・材質・(誘電率)・ 酸化膜換算膜厚 (nm)	Pedestal MIM epi-BST (700) 0.15	Pedestal MIM ??? (1500) 0.060	Pedestal MIM ??? (1500) 0.043	D ½
DRAM 容量絶縁膜膜厚 (nm) ± 3σ プロセス 許容変動範囲 [C]	27.2 ± 4%	23.0 4%	16.4 4%	D ½
DRAM 容量絶縁膜膜厚測定精度 (nm 3σ) [C]	0.11	0.092	0.066	D ½
2D および 3D トーハントプロファイル測定の空間 分解能 (nm)	1	0.8–0.6	0.8–0.6	
オフラインでのトーハント濃度測定精度(濃度範 囲にわたって) [D]	2%	2%	2%	

表 84b FEP における計測技術の目標到達レベル—長期

表 84 FEP における計測の目標到達レベルの脚注

[A] IOC '88 の値は、ASTM の値に 0.65 を掛けたものである。

[B] 測定精度(測定の精密さ)は、 $P/T=0.1=6 \times (\text{測定の精密さ: } \sigma) / (\text{プロセスの許容変動範囲})$  を用いて算出された。測定の目標到達レベルは、SiO<sub>2</sub> 膜厚に換算した値を示してある。130 nm および 100 nm 技術ノードのロジックデバイスでは、SiO<sub>2</sub> 膜が SiON 膜や Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> 積層膜に置き換えられ、70 nm およびそれ以降の技術ノード、可能ならば 100 nm 技術ノードからでも、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> のような高誘電率材が使われよう。高誘電率層の物理膜厚は、SiO<sub>2</sub> 換算膜厚に ( $\epsilon_{\text{high } k} / \epsilon_{\text{ox}}$ ) を掛けることに依って、算出できる。例えば、6.4 nm 厚さの Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (k=約 25) 膜は、1nm 厚さの SiO<sub>2</sub> (k=3.9) 膜に相当する。記載された膜厚測定精度は、SiO<sub>2</sub> 膜に換算した値である。高誘電率膜の膜厚測定精度は、記載値に ( $\epsilon_{\text{high } k} / \epsilon_{\text{ox}}$ ) を掛けることに依って、算出される。積層誘電膜の全容量は、誘電層の容量に、界面層/チャネル界面での量子準位の効果/ポリシリコンゲート電極内にできる空乏層の容量、を含めたものである。したがって、ゲート

絶縁膜の膜厚測定 of 課題には、界面層の計測が含まれることになる。

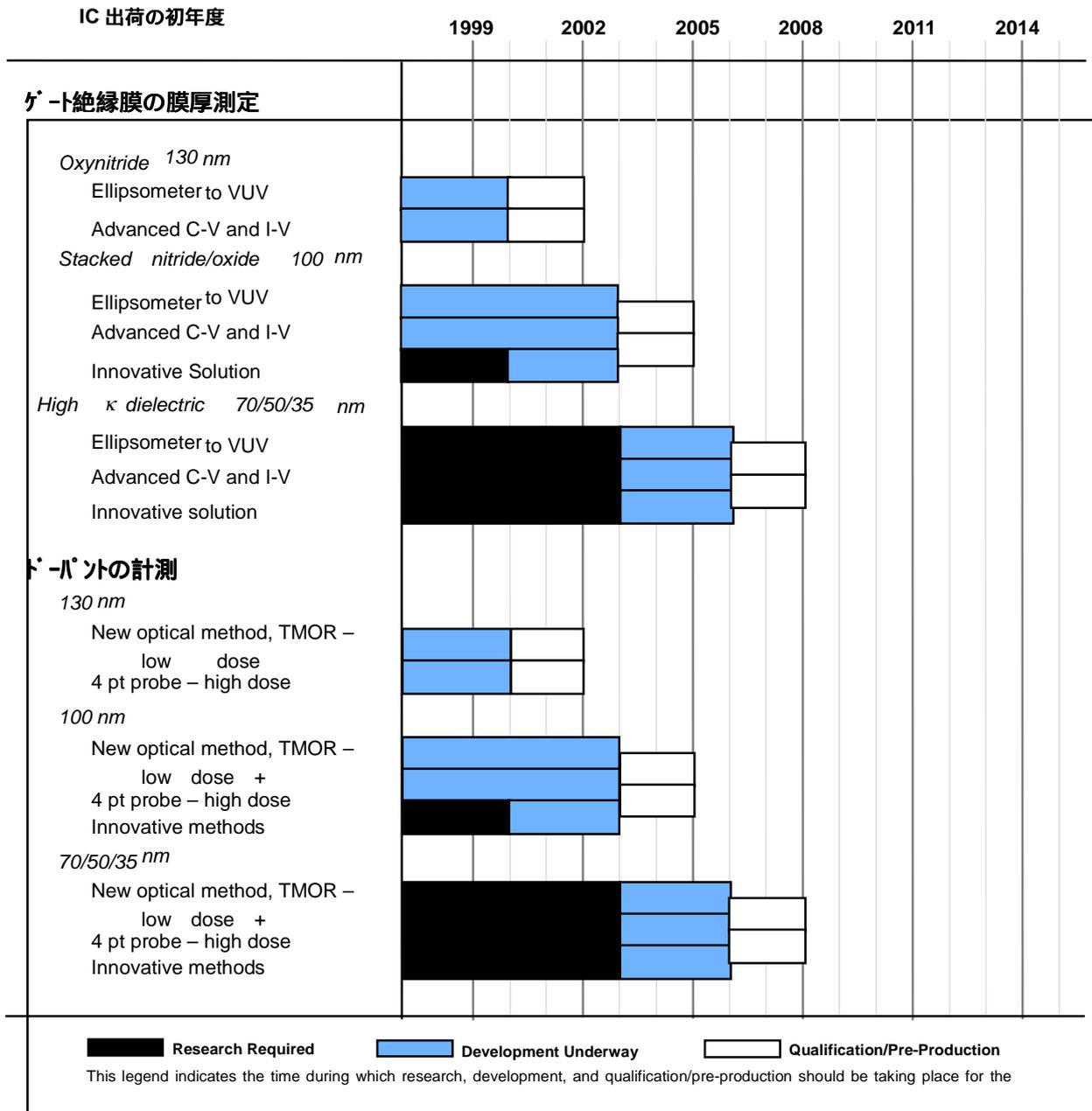
- [C] MIS 構造では、ポリシリコン上に堆積した容量絶縁膜をアニールする際に界面が酸化されることを考慮し、物理膜厚を  $t_{\text{diel}} = (t_{\text{eq.ox}} - 1 \text{ nm}) \times \epsilon_{\text{diel}} / 3.9$  で計算している。MIM (Metal Insulator Metal) 構造では、界面が酸化されることは無いため、 $t_{\text{diel}} = t_{\text{eq.ox}} \times \epsilon_{\text{diel}} / 3.9$  で計算している。ここで、 $t_{\text{eq.ox}}$  は  $\text{SiO}_2$  換算膜厚、 $\epsilon_{\text{diel}}$  は容量絶縁膜の誘電率である。
- [D] システムテック誤差 (訳者注: 系統的要因に因って発生する誤差) が少ない精密な測定が必要とされる。

シリコンウェーハ — ‘必要な IC 性能を得るために、最も経済的なシリコンウェーハの仕様は何か?’ を決めなければならない。計測は、ポリッシュウェーハ/エピタキシャルウェーハ/SOI ウェーハの最適仕様を決めるために、不可欠の技術である。重要な計測の課題として、(1) 微粒子と表面欠陥の検出、(2) ウェーハ周辺部の検査できない領域 (検査不能領域) の削減、(3) 平坦度などが挙げられる。ゲート酸化膜の品質・信頼性 (GOI) の問題は、ゲート酸化膜厚が薄くなるにつれて、その比重が軽くなりつつある。微粒子や COP (crystal originated pits) のように微小な光散乱体 (LLS; localized light scatterer) のサイズを計測し、種類を見分けるためには、より進歩した装置が必要となる。さらに、サイズが 50-70 nm よりも小さい LLS を検出し同定するためには、新しい検出方法が必要となるかも知れない。ウェーハ端から 2 mm 以内の周辺領域を測定できるようにすることが、重要な計測課題である。鍵となる点は、ビーム或いは最小プローブ径とウェーハ周辺部検査不能領域との関係である。すなわち、意味のある測定データを得るためには、どの程度のプローブの重なりが要るかと言うことである。リソグラフィは、IC 製造を成功させるための関門であることに、今後も変わりがない。パターン露光中に問題が生じないようにし、ステッパの露光品質を保証しなければならない。露光品質を保証できる有意なウェーハの評価・解析を行うためには、スキャン露光装置におけるサイトフラットネスの測定法を標準化しなければならない。

洗浄 — インシチュセンサが、微粒子、化学組成、そして可能ならば微量金属をその場計測するため、一部のウェット洗浄装置に組み込まれつつある。微粒子検出は‘欠陥低減’の章で取り扱われている。微粒子、欠陥と金属、そして有機汚染の解析は、本章の‘材料と汚染の評価・解析’の節で述べられる。

熱酸化/膜堆積 — 新しいゲート絶縁膜/容量絶縁膜用の高誘電率材、新しいゲート電極材、および新しいプロセスフローを導入するため、材料/電気特性の評価・解析およびインライン計測の開発が必要となる。当面の焦点となる計測課題は、厚さ 2 nm 以下の  $\text{SiO}_2$  膜や  $\text{SiON}$  膜を計測できるように、エリプソメトリ (楕円偏光解析法) や電気 (C-V, I-V) 計測の能力向上を図ることである。解決策候補として、紫外波長を用いたエリプソメトリが挙げられる。界面層を評価・解析したりインライン計測を行うために、計測手法が必要となる。高周波電気試験法の継続的な開発と標準化、および絶縁物の信頼性を試験する新しい方法が必要である。‘膜堆積後のゲート絶縁膜/容量絶縁膜の誘電特性は、熱処理後の誘電特性とは異なる’という無視できない証拠がある。このことは、電気計測データと物理計測データとの比較を複雑なものにする。しかし、両者の相関をはっきりさせることが必要である。

ドーピング技術 — 活性ドーパントの注入については、180 nm 技術ノード以降に向けて、導入を制御するためのインライン測定技術を改良しなければならない。現在、高ドーズ注入のプロセス制御には 4 探針法が用いられ、低ドーズ注入にはサーマルウエーブ法 (thermally modulated optical reflectance) が用いられている。両手法ともに改善されねばならない。ドーズ量/ドーパントプロファイル/ドーズの均一性を直接その場測定できるように、新しい測定方法の開発が必要である。高ドーズの B/P/As 注入を制御するため、蛍光 X 線法をインライン使用したとの報告がある。オフラインであるが、SIMS を用いれば、極浅接合などで現在必要とされる測定精度を達成できる。光照射に依るキャリア発生と検出 (carrier illumination) やレーザパルス照射に依る音響波発生と検出 (impulsive stimulated thermal scattering) などの新しい非破壊測定法について、どの程度の可能性と応用性を有するものであるかが、現在評価されているところである。2次元、可能ならば3次元のドーパントプロファイルを観測することが、次世代技術の開発には不可欠である。新しいドーピング技術を開発するためには、活性ドーパントのプロファイルとその TCAD モデルの作成/欠陥の分布を知ることが必要となる。



TMOR—thermally modulated optical reflectance

USJ—ultra shallow junctions

図 60 FEP 用計測における解決策の候補歩技術

### 15-3-5 配線における計測

チップ内配線の技術開発や製造に用いられる計測については、Cu/低誘電率材のような新しい層間絶縁膜/ダマシ構造とともに、微細化の加速が、大チャレンジをもたらす。

配線用プロセス装置および配線プロセスの開発/試作段階では、膜堆積後およびパターン加工後の膜特性を詳細に評価・解析しなければならない。現在、配線構造に係わるインライン計測の多くは、

膜堆積直後のモニターウェーハを用いて行われるか、破壊観測に頼っている。構造の微細化は、バリア層の極薄化を含め、さらに進歩し続けるであろう。CD 測定では、絶縁物で形成された高アスペクト比構造を計測できるように、能力を向上させなければならない。

配線における計測では、‘電気性能/歩留/信頼性との相関が取れるような物理測定データを提供すること’が求められる。そのためには、測定手法の継続的な開発が必要である。製造段階で効率的・経済的な計測を行うためには、パターン付きウェーハ上で測定できるようにしなければならない。配線用計測技術の目標到達レベルを表 85 に、解決策候補を図 61 に示す。

年 技術ノード*	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	牽引役
DRAM 1/2 ピッチ	180 nm			130 nm			100 nm	
MPU ゲート長	140	120	100	85	80	70	65	
露光フィード内平坦度：露光フィード* (mm × mm)、配線の最小加工寸法 (nm) 平坦度測定精度 (nm)	25×32 250 ±25	250	250	25×36 200 ±20	200	200	25×40 175 ±17	MPU
堆積バリア膜膜厚 (nm) / プロセス許容変動範囲 (±3σ) 膜厚測定精度 1σ (nm) P/T=0.1 ハタン付きウェーハでのプロファイルの評価・解析が必要 [A]	17/10% <0.06	16/10% 0.05	14/10% <0.05	13/10% 0.04	12/10% 0.04	11/10% <0.04	10/10% 0.03	MPU
バリア層としての反応膜の膜厚と膜厚均一性 (nm)								
層間膜の実効誘電率 (κ) とハタン構造での異方性、クロック周波数の 5×-10×の測定周波数 ((GHz) [B]	3.5-4.0 1.25	3.5-4.0	2.7-3.0 3.0	2.7-3.0 2.1	2.2-2.7	2.2-2.6	1.6-2.2 3.5	MPU

表 85a 配線における計測技術の目標到達レベル—短期

年 技術ノード*	2008	2011	2014	牽引役
露光フィード内平坦度：露光フィード* (mm × mm)、配線の最小加工寸法 (nm) 平坦度測定精度 (nm)	25 × 44 175 ±17	25 × 52 175 ±17	175 ±17	MPU
堆積バリア膜膜厚 (nm) / プロセス許容変動範囲 (±3σ) 膜厚測定精度 1σ (nm) P/T=0.1 ハタン付きウェーハでのプロファイルの評価・解析が必要 [A]	0	0		MPU
バリア層としての反応膜の膜厚と膜厚均一性 (nm)	1	1	1	MPU
層間膜の実効誘電率 (κ) とハタン構造での異方性、クロック周波数の 5×-10×の測定周波数 ((GHz) [B]	< 1.5 6	< 1.5 10	< 1.5 17	MPU

表 85b 配線における計測技術の目標到達レベル—長期

表85 配線における計測の目標到達レベルの脚注

- [A] ロードマップでは、35 nm 技術ノードのバリア層が、堆積法ではなく、金属および/あるいは絶縁物の反応に依って形成されると予測している。
- [B] 最小の実効誘電率が記載されている。DRAMとロジックの要求がかけ離れているため、数値はロジックの要求を記載している。低誘電率材の誘電率および異方性を測定する技術は、40 GHzまでの開発がほぼ完了しており、製造への技術移転が1999年から2000年までに行われるであろう。

新しい配線材料/プロセスの組合せは多様であり、計測手法の進歩と新しい測定技術が必要となる。製品を逸早く市場に出すためには、未熟な製造技術を試作/初期生産の段階で改良せねばならない。このためには、この段階で、高性能・高速な測定技術を使用できるようにしなければならない。

生産に移行するまでに‘安定で裕度のあるプロセス技術 (robust process)’を作り上げることが必要であり、そのための上手な進め方は、‘開発段階で使用できる評価・解析技術’を持つことである。

配線に特化した CD 測定手法の開発を、さらに進めなければいけない。ダマシ構造では、高アスペクトなトレンチ/ビアホールの深さ・幅双方を計る必要があり、計測が更に難しくなる。加えて、絶縁膜があるため、表面帯電(チャージアップ)の問題も発生する。現在の顕微鏡観察技術では、コンタクトやビアの底を観察したり、側壁の傾斜角を測ることができない。

配線技術の目標到達レベルを見ると、バリア層の厚さは将来 <6 nm になる。膜厚変動のプロセスウインドウを 20%とすれば、測定の精密さは、 $6\sigma \leq 0.12 \text{ nm}$  でなければならない。この精度を達成することは、現有の技術では不可能である。40 GHz まで対応できる低誘電率材料用高周波計測技術とテスト構造が開発された。計測装置/計測手順/テスト構造物質を実用に移し、低誘電率層間膜を用いた配線の計測に適用して、クロック高調波/表皮効果/クロストーク/材料の異方性を調べることが必要である。

パターン加工後のウェーハ平坦度は、CMP(chemical mechanical polishing:化学機械研磨)技術を用いると、平坦度計測技術の能力以上に平坦化される。スタイラスプロファイラー(訳者注:或る触針式表面粗さ計の固有名詞)と走査プローブ(原子間力)顕微鏡は、局所/ウェーハ全面の平坦度情報を提供できるが、そのスループットは改善されなければならない。幾つかの標準推進組織が、リソグラフィの SPC に必要とされる情報を得る目的で、平坦度試験法を開発中である。新材料や配線構造に関わるその他の計測項目として、薄膜内の水分含有量、膜の化学量論的組成、機械的強度/剛性、局所的応力(ウェーハ全体で見た応力に対して)、そして配線の比抵抗(バルクでの比抵抗に対して)が挙げられる。さらに、計測技術の開発と並行して、測定値校正技術と標準試料/標準物質の開発が進められなければならない。

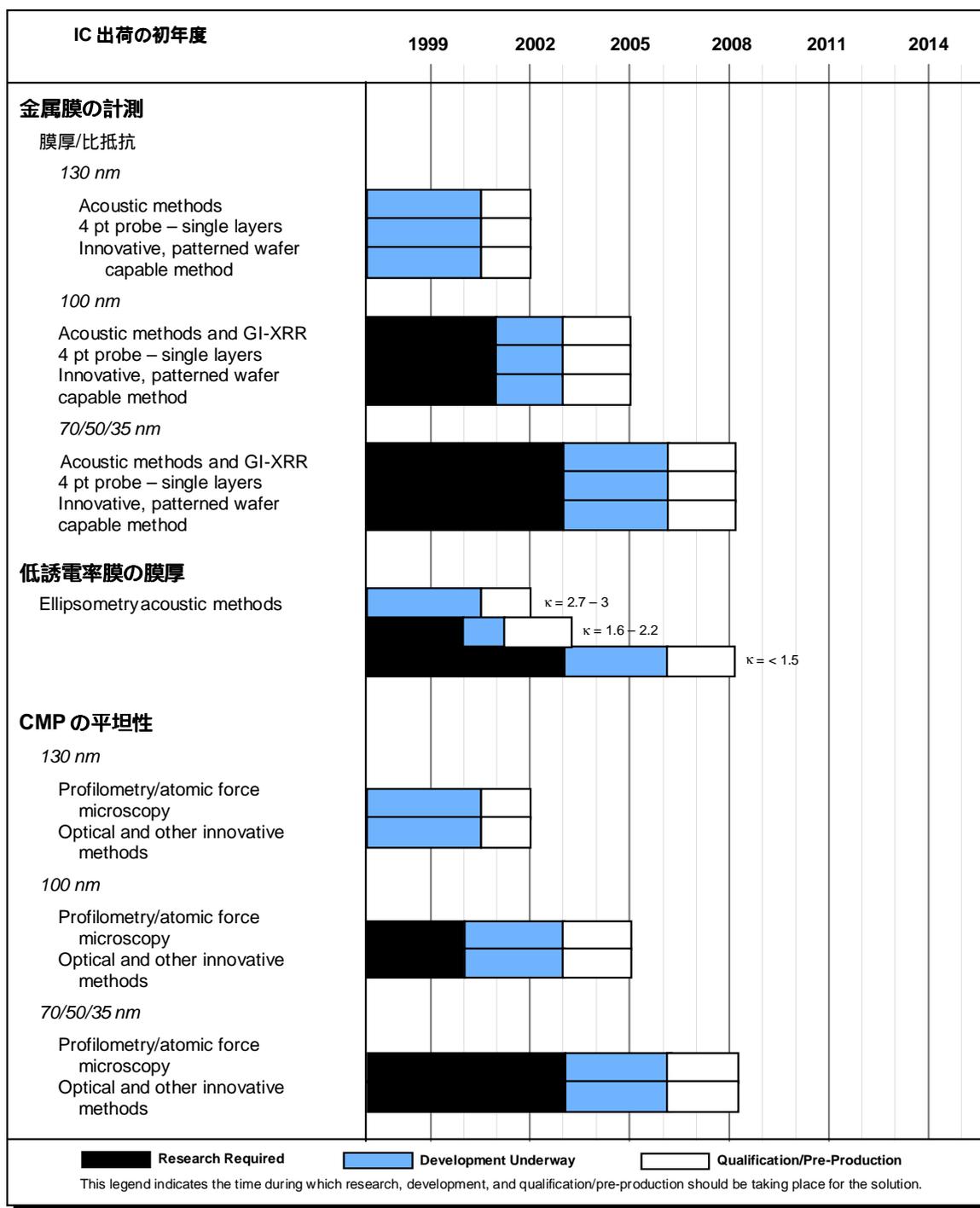
配線構造は、様々な材料・様々な厚さの薄膜層を積み重ねて形成されている。計測には、プロセスウェーハを対象として、多層膜の膜厚を高速・高空間分解能で測定するという難しい要求が課せられる。現在用いられている蛍光 X 線/反射率測定/エリプソメトリ/プロファイロメトリ(profilometry)/微量天秤法のような膜厚測定法では、この要求を満たすことができない。

レーザー照射で生じる音響波や熱波を検出して多層膜を測定する新しい方法がある。しかし、プロセスウェーハを測定しようとした場合、現在はスクライブ領域にテスト構造を配置しなければならない。

## 配線における重要な計測項目のまとめ

配線構造を設計するためには、低誘電率材の高周波誘電率を測定することが必要となる。配線構造を高周波試験し、クロック高調波(基本周波数の 5 倍から 10 倍)、表皮効果、およびクロストークを評価・解析しなければならない。その他の計測項目として、高周波における比抵抗(シート抵抗)、接

着性、機械的強度が挙げられる。さらに、ダマシプロセス/Cu配線プロセスなどのプロセス制御を行うため、高アスペクト比構造の像観察およびCMPの終点検出が必要である。



GI-XRR—grazing incidence X-ray reflectivity

図 61 配線用計測における解決策候補

### 15-3-6 材料と汚染の評価・解析

材料評価・解析技術に要求されることは、新材料を短期間で導入できるようにすることと、物理特性・電気特性に関する重要な情報を提供できるようにすることである。適切なオフラインの評価・解析手法とインラインでの物理計測・電気計測手法との相互的關係を、もっと拡充すべきである。評価・解析手法は、薄膜の厚さや元素濃度などの正確な情報を得るために、今後も使われ続ける。評価・解析手法の開発方向は、ウェーハ全面にわたって計測でき、クリーンルーム内で使用できるようにして行くことである。

オフラインの評価・解析から、しばしば、インライン計測では取れない情報が得られる。例えば、透過電子顕微鏡(TEM)や走査形透過電子顕微鏡(STEM)、特に環状の暗視野検出器を用いて像形成するTEMやSTEM(ADF-STEM:annular dark field STEM)を用いることに依り、極薄膜や界面層の断面を超高分解能で観察・分析することができる。ADF-STEMにX線分析やエネルギー損失電子の検出機能を備えれば、界面の化学結合状態を知ることができる。微小角入射X線反射率測定法を用いて、薄膜の厚さや密度を測定することができる。微小角入射X線回折法を用いると、薄膜の結晶構造に関する情報を得ることができる。

近年のレーザーの発達に拠って、分光的な2次高調波光の発生(SOSG:spectroscopic optical second harmonic generation)が可能となり、従来は不可能とされていた誘電体/基板界面の光学特性を評価・解析できるようになった。SOSGの効果を示す一例として、Si/SiO<sub>2</sub>界面における準位の観測が挙げられる。これは、従来技術である同一波長帯域の分光エリプソメトリでは不可能な観測である。また、新しい材料を評価するためには、孔の多い低誘電率絶縁体のボイド含有量/ボイドサイズ、膜の接着性、機械的性質などの物理特性をオフラインで評価・解析できることが必要である。

高エネルギー分解能のX線検出器など、有望な新技術を早急に市販化しなければならない。マイクロカロリメータ型/超電導トンネル接合型のエネルギー分散型X線分光器(EDS)を試作した結果では、非常に高いエネルギー分解能が得られ、従来のEDSでは不可能であったオーバーラップピークの分離や化学結合の情報が得られている。これらの技術は従来形EDSや在り来りの波長分散型分光器に勝っており、クリーンルームに設置したSEMに装着して使用すれば、より微小な粒子や欠陥の分析が可能になる。

有用な評価・解析装置にウェーハ用のステージを装着し、ウェーハを直接測定できるようにするという傾向は、今後も続く。ウェーハ全面を測定可能なオージェ電子分光装置(薄膜、微粒子、そして欠陥の分析に有効)やSIMS(薄膜、ドーパント、表面汚染有機物/金属や微粒子/欠陥の分析に有効)は、既に市販されている。

ロードマップでの要求として、さらなる像分解能/分析分解能の向上が求められている。表面汚染物の分析方法として、全反射蛍光X線分析法や気相分解法(vapor phase decomposition)に依って濃縮した試料をICP質量分析器(ICP-MS)で測定する方法などがあるが、さらなる自動化と感度の向上が望まれる。

### 15-3-7 標準試料/標準物質

標準試料/標準物質は、認定された特性値を有する物質であり、計測機器を校正するために用いられる。標準試料/標準物質は、計測において非常に重要な役割を担う。その理由は、異なった計測方法で得られたデータ同士/同種の装置に依って得られたデータ同士を相互比較したり、モデルと実験結果との照合を行う際、その「物差し」となるからである。標準試料/標準物質は、複数の作製元から種々な形態や等級の物が供給される。呼称は作製元に依って色々である: 認証標準試料/標準物質(certified reference material, CRM)、コンセンサス標準試料/標準物質(consensus reference material)、NISTトレーサブル標準試料/標準物質(NTRM)、或いはスタンダード標準試料/標準物質(standard reference material, SRM)等がある。

(訳者注:ISO の VIM(国際計量計測用語集)には、標準物質(RM)と認証標準物質(CRM)が定義されている。RM の定義は、‘機器の校正、測定法の評価、又は物質の値付けに用いるために、単一又は複数の特性値が十分に均一で良く確定された物質又は材料’、CRM の定義は、‘特性値の表現に用いられている単位の正確な現示へのトレーサビリティが確立され、かつ表記された信頼の水準での不確かさが各認証値に付されるという手続きによって、その一つ又は複数の特性値が認証された。認証書付きの標準物質’とされている。;本ロードマップでは、NIST(訳者注:標準に関する米国立研究機関)の用法が記載されている。NIST の RM は、ISO の RM に適合しており、CRM に適合している場合も有る。NIST の SRM は、ISO の CRM に適合している。)

NIST は、半導体産業における計測科学の先進機関として、これまで国際的に認められてきた。しかし、進歩の激しい半導体産業から寄せられる標準試料/標準物質の要望に対し、これまで通りのニーズの捉え方/装置・技術の開発/標準試料・物質の開発をしては対応できない。このことは、NIST 自身も認識している。このような状況のもと、民間企業が NIST の足りないところを補完し、標準試料/標準物質を製作できるようにするため、幾つかの取り組みが為されている。

第一の取り組みは、民間の供給業者が作製した標準試料/標準物質を NIST が正確な値付けをし、該供給業者が NTRM のトレードマークを付けた NTRM 試料として販売できるようにするものである。第二は、検定所認定制度(national voluntary laboratory accreditation program, NVLAP)による方法で、NIST により民間の検定機関の認定を行うことである。この取り組みは、現在進められており、拡充されつつある。第三の取り組みは、ASTM のような権威ある標準推進組織の管理下で、複数の分析機関が相互に検定しあいながら、CRM を開発することである。

標準試料/標準物質の作製・検定・認証に際し、以下のような技術的要件がある:

- 標準試料/標準物質は、使用しても変化・変質せず、安定した特性値を保持できること;場所的/時間的な特性値の変動は、所望の校正の不確かさ以下でなければならない。
- 標準試料/標準物質は、望ましい環境で製作できないことが多い; 短い作業時間の中で、特殊な製造技術を用い、作製・検定・認証の作業を行わなければならないことが多い。
- 標準試料/標準物質を検定し認証するためには、詳細を文書化された規格に基づいて作業されなければならない。現在、満足な測定方法・手順が決められていない分野もある。基本的な測定方法・手順が明らかにされなければ、標準試料/標準物質を作ることはできない。

- 半導体製造プロセスの評価・制御に用いられる装置を校正する場合、校正用標準試料/標準物質の認証値の不確かさは、プロセスの変動し易さの 1/4 以下でなければならない。
- シミュレーションの入力データとして用いられるドーパントプロファイルのように、正確な測定が要求される場合には、標準試料/標準物質の認証値の正確さは、要求値の1/4以下でなければならない。ここで云う正確さは、バイアスと変動し易さの双方を考慮に入れたものである。
- 測定に携わるプロセスエンジニアには、標準試料/標準物質の取扱や取得結果の判断に間違いが生じないように、十分な教育・訓練を積み重ねなければならない。

新世代技術を立ち上げるための測定を開始する際、特に材料開発やプロセス装置開発の初期には、‘適切な標準試料/標準物質が利用できる状態になっていること’が非常に重要である。どのような標準試料/標準物質も、上に述べた様々な要件を満足するために、多くの大チャレンジを抱えている。

### 15-3-8 計測の統合

ウェーハ径が大きくなり、必要とされる測定分解能が高くなるにつれ、データ量およびデータ処理速度ともに劇的に増大する。これら膨大な生データから、プロセス制御や欠陥低減を容易にするために、有用な情報を抽出しなければならない。このためには、計測データを他のデータや工程管理情報と関連付けられるようにすることが必要であり、工場規模あるいは企業規模の情報システムに統合しなければならない。

計測データの統合の仕方は、(1) 高度な近接効果補正技術や位相シフトマスク技術の導入、(2) 193 nm、157 nm、そして次世代リソグラフィ技術の立ち上がり方、(3) Cu と低誘電率配線プロセスのインテグレーションの仕方、(4) 量産用ウェーハの 200 mm から 300 mm への移行時期、といった要素技術の発達程度に左右される。

例えば、レチクルのパターン寸法/欠陥のデータは、ウェーハで測定されたパターン寸法/欠陥のデータと比較されねばならない。このためには、マスク供給者/試作ライン/量産工場の間で、効率的な情報伝達が必要となる。ベアウェーハの nm 程度の凹凸/欠陥のデータは、ウェーハ単位で、デバイスの歩留り損失と比較されねばならない。このためには、シリコンウェーハメーカとデバイスメーカの間で情報交換が必要となる。さらに、多くの工場が「そのままコピーする ”copy exactly”」、「手を加えてコピーする ”copy intelligently”」または「ウェーハ状態での電気特性を同じにする ”wafer-state matching”」という考え方をとっているため、同じデバイスを製造している工場間での計測データの交換が必要である。

工場規模のシステムは、検査装置で検出された物理的欠陥/電氣的欠陥/パラメトリック欠陥のデータと、他の検査装置で採られたデータとの相関関係を解析するとともに、計測装置で採られた物理的パラメータのデータと絶えず相関をとらねばならない。

計測統合の一つの形態が、高度なプロセス制御 (APC) である。APC は、プロセス変動の減少/先行ウェーハや装置発塵監視用ウェーハの枚数削減/歩留り向上期間や欠陥対策時間の短縮/同

種量産装置の互換使用/総合的な装置効率の改善/開発期間の短縮/試作ラインから工場へのプロセス技術移管の容易化を目的として、モデルに基づいたプロセス制御を行うことである。

### 15-3-9 パッケージング(封止技術)における計測

組立て・パッケージング技術は、電子システムの大きさ/性能/価格を決定づける重要な要素であり、その重要性は今後も増大し続ける。本節は、組立て・パッケージング関連の計測課題を纏めたものである。内容は、網羅的なものではなく、最も重要な分野に焦点を絞っている。

チップ/パッケージ/システムにおける整合の取れた電気モデルの作成とシミュレーションツール:技術の現状とニーズ — 一組のチップは、個々にシングルチップパッケージ、あるいは一纏めでマルチチップパッケージに組込まれる。これらのチップとパッケージを一つのシステムと見做し、その電気モデルを作ることに依り、より多くのことが、コスト・時間の面で効率的に行えるようになる。3次元配線や給電構造に係わるパラメータを抽出したり、これらパラメータの妥当性やこれらパラメータが回路性能に及ぼす影響について詳細な検証を行うためには、素子・配線間のカップリング/アナログ・デジタル混合信号のシミュレーション/電源擾乱/電磁波障害などが問題となり、その技術進歩が求められる。全体を一つのシステムとして扱える効果的なシミュレーションツールが必要である。

実使用に即した加速不良試験方法 — 温度サイクル試験/化学的暴露試験/衝撃・振動試験は、不良メカニズムを検証する目的で短時間に不良が発生するようにしたり、製品の寿命や動作限界を評価・改善するために行われる。これらの加速試験で発生する不良が製品使用時に発生する不良と同じ種類のものとなるよう、試験/測定/モデル化を通して、改善して行くことが必要である。

界面の測定とモデル化 — 組立て・パッケージングの性能/信頼性/原価は、界面についての理解度と、界面を測定し制御する能力に左右される。例えば、‘ダイ接合材/モールド材/カプセル材/接着剤/アンダーフィル (underfills)/熱コンパウンドが、界面において何のように振舞うか?’を知ることは、重要な課題である。界面特性を正確に測定・予測する能力が、将来にわたり、経済的な製品開発の鍵となる。

パッケージ/組立て部品における熱/機械シミュレーションモデルの精密化と検証 — 電子製品の温度/機械耐性を向上させるため、努力が続けられている。測定で実証し、完成された熱/機械モデルを作ることが必要である。これには、パッケージや組立て部品の熱流特性/界面特性/破断の力学/熱機械的挙動を知らねばならない。実証するためには、特性/欠陥/不良を位置出し測定するためのより優れたシステム/測定技術も必要となる。

材料パラメータ — パッケージング材料の大きさ/厚さ/特性温度など、基本特性の測定/データ収集/普及には、絶えざる改善が必要とされる。これには、使用温度/使用応力範囲における熱伝導/電気伝導/誘電率と誘電損失係数/応力・歪み関数/比熱/微小力学のおよび形状的安定性も含まれる。

材料の使用に係わる制御 — はんだ/はんだ代替物/アンダーフィル/カプセル材/接合材などのパッケージやバンプ型チップの製作に使用される材料は、多くの分野で使用限界を広げている。これには、量的制御/質的制御/厚さ/均一性/気泡欠陥/熱特性/電氣的・機械的特性などが該当する。

これらパラメータをオンラインで精密測定するためには、検査法の変更/プロセス変動の減少/欠陥の制御/廃棄物の削減が必要となる。