

(要旨)

計測技術は半導体産業を支える基盤技術の一つである。プロセスおよび装置の開発、製品あるいはラインの立ち上げ、量産など、全ての局面において高度な計測技術が不可欠である。しかし、計測に要求される分解能・精度・感度が高くなるとともに、その要求に応えることが困難になりつつある。半導体計測技術の未熟さが、半導体生産技術の発達ひいては半導体産業の発展を妨げる隘路となり兼ねない。

到達レベルから見て、隘路となり兼ねない特に重要な項目を挙げると、2002 年 130nm ノードでは、デバイス構造の微細化や微細化に伴って派生する高アスペクト比化に対応することが主なニーズであり、180 nm ノードから引き続いての課題である微細構造や高アスペクト比構造の高解像度観察、ドーパントプロファイルの高空間分解能計測に加え、極薄ゲート酸化膜や極薄容量絶縁膜の高精度膜厚測定が課題となる。2005 年 100nm ノードでは、パターン微細化の推進を図ることが主なニーズとなり、ウエハパターンやホトマスクパターンの寸法・パターン位置を高精度に測定することが課題となる。一方、全ノードを通した課題として、第一に、プロセス材料およびコンタミネーションをさらに精密に制御することが必要であり、微粒子や微量不純物を高感度で検出できるようにすることが挙げられる。第二に、プロセスやプロセス装置をより精密に制御するために、高性能なプロセス監視センサ、プロセスモニタそして装置パラメータ計測センサの開発が求められる。

このような課題に対応するため、デバイス／プロセスの研究・開発に際しては、計画段階から計測ニーズを明確にするようにし、適確なニーズを計測技術の研究・開発に反映させなければならない：計測技術はプロセス装置の開発／プロセスの開発／新材料の導入検討と言った、先行的研究・開発の時期に必要とされることが多い。また、計測ニーズは新材料・新デバイス構造・新プロセスの導入などに左右されるが、計測に携わる人達にとって、それらの技術開発方向が明確に見えていくわけではない。デバイス／プロセスの要求に応えるためには、計測ニーズを適確に捉え、開発技術の焦点を絞り、早期に開発着手することが必要である。半導体メーカ、計測装置メーカ、および公的研究機関は、一丸となって、センシング技術および計測装置の開発を行わねばならない：計測装置メーカは、比較的小規模であることが多く、先行開発や装置試作の費用負担に耐えることが難しい。デバイスおよびプロセスの設計に際しては、‘より余裕度のある設計’を課題として、研究・開発を進めねばならない。例えば、CD ばらつき、ゲート絶縁膜／容量絶縁膜の膜厚ばらつきなどに鈍感なデバイスおよびプロセスを設計・開発することが必要である：計測の精度／分解能／感度は原子レベルの極限に近づきつつあり、計測性能がデバイス／プロセスの物理限界で制約されることも予測される。仮に計測の技術開発が精力的に進められるとしても、必ずしも期待されるような性能・機能が実現されない恐れもある。‘日本の半導体技術を牽引すべき、旗印としての S o C ’を明確にするとともに、各要素技術の課題・目標として詳細化することを急がねばならない：S o C ということでは、混載／短 T A T／少量多品種／マスク製作などをキーワードとし、これら課題に対応した計測技術を開発することになる。しかし、S o C の意味するところは広く、‘S o C のための計測’の目標が必ずしも明確になってはいない。

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

微細形状の観察分解能 (nm, P/T = 0.1)	1.4	1.0	0.7	0.5	0.35	0.25
ホール底部観察分解能 (nm, P/T = 0.2)	2.8	2.0	1.4	1.0	0.7	0.5
パターン寸法の測定再現性 緻密ライン / 孤立ライン / ホール (nm, 3 σ , P/T = 0.2)	3.6	2.6	2.0	1.4	1.0	0.70
	2.8	2.0	1.4	1.1	0.8	0.6
	4.0	3.0	2.6	1.6	1.1	0.80
実微粒子の検出感度 (nm, パターン上)	90	65	50	35	25	17
微小領域における表面ケミカル 金属の検出感度 (at/cm ² , 各金属, P/T = 0.1)	9.4×10^9	4.5×10^9	3.0×10^9	2.0×10^9	1.5×10^9	1.1×10^9
表面有機物の検出感度 (at/cm ² , 各有機物, P/T = 0.1)	2.0×10^{11}	1.4×10^{11}	9.8×10^{10}	6.8×10^{10}	4.8×10^{10}	3.4×10^{10}
ゲート絶縁膜膜厚測定精度 (nm, 3 σ , P/T = 0.1)	0.0076	0.0060	0.0077	0.021	0.015	0.013
容量絶縁膜膜厚測定精度 (nm, 3 σ , P/T = 0.1)	0.046	0.049	0.11	0.11	0.092	0.066
ドーパントプロファイル測定の空間分解能 2-D/3-D (nm)	10/-	7/15	5/10	4/7	3/5	2/3.5

図表 2 - 1 1 半導体計測の期待される到達レベル

2 - 1 1 - 1 背景

計測技術は半導体産業を支える基盤技術の一つである。プロセスおよび装置の開発、製品あるいはラインの立ち上げ、量産など、全ての局面において高度な計測技術が不可欠である。しかし、パターンの微細化・デバイス構造の立体化・配線の多層化そして使用材料の高純度化・高纯净化が進み、計測に要求される分解能・精度・感度が高くなるとともに、その要求に応えることが困難になりつつある。半導体計測技術の進歩が遅滞するようであれば、その未熟さが、半導体生産技術の発達ひいては半導体産業の発展を妨げる隘路となり兼ねない。半導体計測技術は、今後の発達・革新が特に必要とされる分野である。

半導体計測技術の発達・革新を促すべき役割が、ロードマップに課せられる。半導体計測技術は、計測対象の多岐・多様さと、装置市場規模の小ささ故に、

- ・ 半導体メーカと計測装置メーカとの協力体制に係わる問題。
- ・ 計測技術の開発リソースに係わる問題。

を常に抱えている。ロードマップが、必要とされる技術の開発方向および到達レベルを明確にし、普遍的な開発目標を示すことは、上記問題を解決するための突破口となる。

半導体メーカと計測装置メーカとの緊密な協力体制、そして開発リソースの必須技術への効率的投入は、半導体計測技術の発達を加速し、革新への道を拓く。また、かくして得られた高度な半導体計測技術は、単に半導体生産技術の発達を支えるだけではなく、未だ経験やノウハウに頼る部分が大きい半導体生産技術を科学に立脚した半導体生産技術へと発展させることにもなる。

2 - 1 1 - 2 範囲

半導体計測を、“半導体デバイス製造において用いられるセンサ、モニタ、観測装置、観測システム、およびそれ等の応用に係わる科学、技術”と定義する。以下、この定義に規定される範囲で検討する。(注)

検討項目は、パターン寸法・パターン重ね合わせ精度・パターン欠陥、微細構造の形状、薄膜および薄層の厚さ・組成・化学結合状態・原子配列/分子構造・機械的性質・電気的性質、ウエーハおよびプロセス材料の組成・化学結合状態・原子配列/分子構造・不純物・汚染物・微粒子などを対象とし、半導体生産技術のニーズに応えるためのセンサ、モニタ、観測装置、観測システム、およびそれ等の応用技術である。

また、検討に際しては、

- ・ 測るべき対象。
- ・ 対象を測るために具備すべき計測装置の機能と性能。
- ・ 目的とする計測装置を実現するための解決策。

について、計測など他分野の人々にも理解し易いように、簡明かつ要点を得て表現するように努めた。

なお、以降、オフライン、インライン、オンライン、および in-situ (インシチュ、その場…) は以下のような意味で使用する。

(1) オフライン:

スタンドアロン装置を使用し、製造途上のウエーハ（以降の節ではプロセスウエーハと記述する）を非定期的に観測する場合。

(2) インライン:

ライン内のスタンドアロン(stand alone)装置を使用し、製造途上のウエーハあるいはパイロットウエーハ(モニタウエーハとも言う)を定期的に観測する場合。

(3) オンライン:

プロセス装置内に組み込まれたセンサまたはモニタを使用し、製造途上の（処理中ではない）ウエーハを定期的に観測する場合。なお、in-situ に含まれて議論される場合も有る。

(4) in-situ

プロセス装置内に組み込まれたセンサあるいはモニタを使用し、処理中のウエーハあるいは処理中のプロセスパラメータを定期的に観測する場合。

なお、上記用語は、欧州においては日本と同じ意味で使用されるが、米国においては若干異なる。米国では、製造途上のウエーハを工場外に持ち出しスタンドアロン装置を使用して非定期的に観測する場合をオフラインと言い、工場内のスタンドアロン装置を使用して製造途上のウエーハを非定期的に観測する場合は at-line(アトライン)と言う。

(注) 米国 SEMATECH による Metrology(メトロロジ、計測) の定義:

The science of measurement to ascertain dimensions, quantity, or capacity: the techniques and procedures for using sensors and measurement equipment to determine physical and electrical properties in wafer processing.

2 - 1 1 - 3 要求

半導体計測技術を発達させるためには、半導体メーカと計測装置メーカとの緊密な連携が不可欠である。その前提として、半導体計測の課題を計測装置メーカの技術者によく理解して貰うことが必須となる。このような認識に立ち、半導体生産技術の視点と計測技術の視点とから、ニーズと到達レベルの纏めを行った。図表 2 - 1 1 - 1 に半導体デバイス・プロセスからのニーズ すなわち困難な課題、図表 2 - 1 1 - 2 に期待される到達レベルを記載する。

(1) 半導体生産技術の視点から見た困難な課題

半導体計測の働きは多岐に渡るが、特に強調されるべき点は、

- ・ 新プロセス・新材料の立ち上げ期間の短縮。
- ・ 実プロセス処理時間の短縮。
- ・ 歩留向上への寄与にある。

一方、半導体計測の対象について見ると、パイロットウエーハ上の観測用テストパターンやテスト構造ではなく、プロセスウエーハ上のパターンやデバイス構造そのものを計測することが必要となりつつある。この背景には、ウエーハ大口径化にともなう基板単価の上昇により、パイロットウエーハに要する費用が増大傾向にあること、および ASIC(application specific integrated circuit:特定用途向け

け IC)化の流れやプロセス高難度化・複雑化の進展により、より精密な枚葉でのプロセス管理が求められている事情がある。将来的には、プロセスウエーハ上の本体パターンや構造そのものを計測することが必要となろう。例えば、微細パターン上に形成された膜の特性は、平坦な膜の特性とは異なる。したがって、新プロセス・新材料を立ち上げる際に、デバイス特性や信頼度を正確に予測するためには、微細パターン上に形成された膜そのものを対象として、その厚さ / 形状、組成、化学結合状態、原子配列 / 分子構造、機械的ストレス、機械的強度、膜の密着強度、電気特性などを観測することが望まれる。

新プロセス・新材料の面では、

- ・素子形成に係わるゲート絶縁膜や容量絶縁膜の新しい材料、および浅接合構造。
- ・素子分離に係わる STI (shallow trench isolation: 浅溝素子分離) 構造。
- ・多層配線形成に係わるダマシン構造と CMP (chemical mechanical polishing: 化学機械研磨)

の新プロセス、および Cu 配線・低誘電率層間絶縁膜の新材料などが挙げられる。

これらの新プロセス・新材料を短期間で量産まで立ち上げるために、主な計測の課題として以下の項目が挙げられる。

- ・ゲートおよび容量絶縁膜の計測:

プロセスウエーハ上で、その膜厚、膜組成、化学結合状態を合理的経済性（合理的装置価格、合理的処理時間、合理的稼働率、合理的稼働費用など）をもって測れるようにすることが重要である。なお、組成や化学結合状態は、膜の電気的特性および機械的特性を大きく左右するため、今後ますます重要な計測対象となる。

- ・ソース/ドレイン接合層のドーパントプロファイルの計測:

2 次元 (2-D) / 3 次元 (3-D) ドーパントプロファイルを合理的経済性をもって高空間分解能測定できることが望まれる。

- ・低誘電率層間絶縁膜材料および Cu 配線材料の計測:

プロセスウエーハのパターン上で、その膜厚、膜組成、原子配列 / 分子構造、膜ストレス（膜応力）、膜機械強度、膜の密着強度、電気特性などを、合理的経済性をもって測れることが要求される。特に、層間膜誘電率や Cu 結晶方位などの膜特性は、インラインで計測できることが期待される。

- ・ハーフエッチングプロセスのエッチング終点検出:

ダマシン、トレンチ、STI などで用いられるハーフエッチングに於いて、in-situ での深さモニタが必要とされる。

- ・CMP における in-situ 膜厚モニタ:

平坦化処理中のウエーハを対象として、所定測定点の膜厚を測ることが必要とされる。

- ・ホール中に埋め込まれた配線材のボイド (void: 空隙) の非破壊・高速検査:

Cu や Al のプラグに巣食うボイドは、信頼性を損なう大きな要因であり、インラインでの検査が必要である。

- ・高アスペクト比のホール底部の非破壊・高分解能観察 / 高感度組成分析:

現在と同様、将来においても大きな課題である。

なお、ゲート絶縁膜、容量絶縁膜、および層間絶縁膜の膜厚検査、ハーフエッチングプロセスの終点検出、CMP の in-situ 膜厚モニタ、ボイドの非破壊検査、そしてホール底部の非破壊検査技術は立ち上げ後の量産においても使用される重要な技術であり、継続しての高スループット

(throughput:単位処理能力)化・操作性向上が必要とされる。

プロセス処理の実時間短縮に関わり、第一に、より短時間で観測作業を遂行することが要求される。特に、プロセスマージン減少の傾向は、観測項目や観測頻度を増加させるだけでなく、先行テストなど段取り時間の増大を招く。段取り時間低減のためにも、短時間で観測結果の得られることが必須となる。第二に、ウエーハの流れを円滑にするため、複数台のプロセス装置を区別無く使えるようにすることが不可欠となる。特に、露光装置やエッチング装置の機差を無くすることが重要である。装置間差を無くすために、露光装置では機械加工精度・組立て精度の向上、エッチング装置ではエッチングパラメータを精密に制御することが求められる。主な計測の課題として、以下の項目が挙げられる。

- ・ パターン寸法測定、重ね合わせ精度測定、および膜厚測定では、合理的経済性を伴った短時間・高精度での計測が求められる。
- ・ コンタクトおよびビアのホール検査には、合理的経済性を有した上、ホールの開口/非開口およびコンタクト抵抗値の合否を短時間で判定できるホールオープンチェッカの開発が望まれる。
- ・ エッチング時にエッチング速度・エッチング形状・ウエーハ表面の温度分布・プラズマ状態を in-situ で測定し、装置制御に帰還できることが望まれる。そして、極薄ゲート絶縁膜を下地とするゲート電極形成のように、高いエッチング選択比を要求されるプロセスには、エッチング終点検出が必要となる。

また、インライン観測時間の短縮に加えて、成熟したインライン観測技術をオンラインモニタあるいは in-situ モニタ化することが、今後の重要な課題となる。クラスタツール(cluster tool)に関しては、その必要性が特に高い。オンラインモニタあるいは in-situ モニタ化することは、検査工程数削減やプロセス処理時間短縮に拠る生産性向上だけではなく、モニタを CIM(computer integrated manufacturing)に組込むことに依る実時間歩留り管理の実現や、パイロットウエーハの削減に伴う費用低減の効果をもたらす。パイロットウエーハ削減の経済的効果は、ウエーハ大口径化に伴うシリコン基板単価の上昇とともに、更に大きなものとなる。このような視点からは、パイロットウエーハを用いているウエーハ上付着微粒子(パーティクルあるいは異物とも言う)の検査や膜厚測定をオンラインあるいは in-situ モニタ化し、プロセスウエーハで計測できるようにすることが重要である。当面の課題としては、以下の項目が挙げられる。

- ・ パターン付きウエーハの微粒子検査において、ヒストグラム処理などにより、定量性を向上することが要求される。
- ・ 膜厚測定の空間分解能を高めることが期待される。このためには、画像処理技術の応用などにより、パターン位置決め精度を向上することが前提となる。

歩留向上の視点からは、パターン微細化に合わせて微粒子・パターン欠陥の検出感度を向上することに加え、見えない欠陥の発生を防止することが望まれる。なお、見えない欠陥とは、パターン欠陥検査装置/ウエーハ表面微粒子検査装置/ウエーハ外観検査 SEM(scanning electron microscopy:走査電子顕微鏡観察法)など現行のウエーハ検査技術では検出できないが、不良を誘起してしまう欠陥の総称である。例えば、検出限界以下の極微細な欠陥(non-detectable defects)、微量な不純物や汚染物、そしてデバイスパラメータのずれ/ばらつきに起因した欠陥(parametric defects)などが見えない欠陥に含まれる。また、検査対象から除外されているため検知されることの無い、結晶欠陥や機械的ストレス(応力)なども広義の見えない欠陥と見なせる。

- ・ RTA(rapid thermal anneal)、RTO(rapid thermal oxidation)、CVD(chemical vapor

deposition:化学的気相成膜)、およびPVD(physical vapor deposition) 処理時のウエーハ表面温度を測定するため、in-situ 温度モニタの開発が期待される。熱処理膜厚、膜組成、あるいはドーパント濃度などに依存する温度測定ばらつきがあり、これらを無くすることが大きな技術課題である。

- ・イオン打込みにおいて、イオン種/イオンエネルギー(打込み深さ)/ドーズ量(ドーパント濃度)をモニタするため、インライン、オンラインあるいはin-situでのインプラモニタが必要とされる。特に、インラインのドーパント濃度モニタへの期待が大きい。
- ・CVD膜形成において、膜質を精密に制御するため、チャンバ内の不純物ガス濃度を高感度でモニタできることが望まれる。

また、微粒子の発生を未然に防止するため、チャンバ壁に付着する堆積物の膜厚をモニタできることが期待される。なお、このことはエッチングチャンバについても同様である。

- ・イオンおよびプラズマプロセスにおいて、チャージアップ(帯電)起因のデバイス損傷を無くすため、ウエーハ表面に帯電した電荷量をin-situで測定できることが期待される。

結晶欠陥/機械的ストレスについて見ると、結晶欠陥ということでは、イオン注入欠陥の回復や二次欠陥の成長が大きな問題である。イオン注入欠陥についての理解を深めるために、結晶欠陥をモニタできることが望まれる。また、機械的なストレスについては、Si結晶の応力測定が主な課題である。Si結晶の応力分布を、空間分解能/応力値精度の目標を1999年100nm/50% 2014年20nm/30%として、2次元計測できることが要求されている。

なお、見えない欠陥と云うことでは、‘見えない領域’すなわち‘ウエーハ周辺部の検査不能領域(wafer edge exclusion)’を削減することも重要である。検査不能領域は、現在ウエーハエッジから3mm程度であるが、2002年の130nmノードでは2mm以下、2005年100nmノード以降は1mm以下にすることが、求められている。さらに、ウエーハエッジ側面およびウエーハ裏面に存在する微粒子や金属汚染を評価・解析したいとの要求も、今後は増大するであろう。

また、パターン微細化推進の要となる光リソグラフィの発達を支援するために、光近接効果補正(OPC: optical proximity correction)マスクや位相シフトマスク(PSM: phase shifting mask)など超解像技術の本格導入に対応した検査・計測技術が、今後重要度を増す。OPCマスクから転写されたウエーハパターンの形状計測/検査手法を開発することも必要になる。

(2) 計測技術の視点から見た困難な課題

半導体計測の技術開発方向は、合理的経済性を保持しながら、極微小領域・極微量成分を対象として、高精度・高感度・高分解能な観測を追求していくことにある。観測装置としては、極細プローブ形成技術、高速・高精度での観測箇所位置決め技術、および極微量信号の高感度検出技術を発達させることが基本となる。

困難な課題としては、

- ・微細な高アスペクト比構造の観測。
- ・微小領域における超薄膜・超薄層構造の観測。
- ・closed-loop manufacturing(クローズドループマニファクチャリング:プロセスの実時間計測と計測結果のプロセスへのオンラインフィードバック)のための実時間制御用高精度・高感度モニタ。
- ・高性能科学用計測機器の半導体計測への合理的経済性を伴った展開。
- ・トレーサビリティの保証。

が挙げられる。

なお、トレーサビリティ (traceability) とは、国際計量基本用語 (VIM: international vocabulary of basic and general terms in metrology) によると、「不確かさが全て表記された、切れ目の無い比較の連鎖を通して、通常は国家標準または国際標準である決められた標準に関連づけられ得る測定結果または標準の値の性質」と定義されている。

微細な高アスペクト比構造の観測については、“パターンの微細化に合わせてデバイス構造のアスペクト比が増大する”という状況が背景にある。具体的な課題としては、トレンチやホールの加工寸法・加工形状を高速で3次元観測できること、トレンチやホールの埋め込み材内ボイドを非破壊で高速検出できること、およびトレンチやホール底部の残渣を高速で検出・組成分析できることが期待される。また、高アスペクト比化が進めば進むほど、パターン間隙の微粒子を検出することが困難になる。歩留および信頼度向上の視点から、ウエーハ表面微粒子検査の高感度化・高スループット化が切望される。

微細な超薄膜・超薄層構造の計測については、主として、新規に導入されるデバイス構造やプロセス材料が観測対象になる。具体的な課題としては、

- ・数 nm 以下の空間分解能で接合層を初めとした注入層のドーパントプロファイルを観測できること。
- ・ゲート酸化膜や高誘電率容量膜の膜厚、組成、化学結合状態、膜内微量金属、および信頼度を求められること。
- ・層間膜（層間多層膜）あるいはサイドウォールスペーサとして使用される低誘電率膜の膜厚、組成、原子配列/分子構造、機械的ストレス、機械的強度、膜の密着強度、膜内微量金属、電気容量、および信頼度を測定できること。
- ・バリアメタルの膜厚、組成、化学結合状態、原子配列情報が得られること。
- ・メタル膜（メタル積層膜）の膜厚、組成、原子配列を測定できること。
- ・多層膜界面の原子配列、組成、化学結合状態および膜の密着強度を求められること、およびウエーハ表面の微粒子、残渣、汚染を検出し組成分析できることが要求される。

closed-loop manufacturing の実現は、半導体製造技術が進歩し続ける限り、永遠の課題となろう。しかし、絶えず理想状態に近づけることが要求される。実時間でプロセスを制御するために、インラインモニタあるいはオンラインモニタに係わる課題としては、パターン寸法および合わせ精度測定の短時間化・高精度化を加速すること、および高アスペクトホール用のオープンチェッカを開発することが挙げられる。また、in-situ モニタに係わる課題としては、CMP 膜厚の測定、ダマシン/トレンチ/STI などのハーフエッチングやゲート電極エッチングにおける終点検出、エッチング速度・エッチング形状・ウエーハ表面温度分布・プラズマ状態などのエッチングパラメータの測定、RTP/CVD/PVD 処理時のウエーハ表面温度の測定、イオン打込みにおける打ち込みイオン種/イオンエネルギー/ドーパント濃度のモニタ、および CVD チャンバ内の不純物ガス濃度の測定が挙げられる。なお、in-situ モニタをプロセス装置に組込む際には、プロセスチャンバ内においてウエーハ表面での物理現象を in-situ センサで検出・モニタリングするための技術に併せて、使用中に発生する in-situ センサの窓の汚れ防止・センサ窓のセルフ洗浄技術を開発するとともに、in-situ センサの校正、およびインライン測定器やオフライン測定器とのマッチングを可能にしなければならない。

高性能な科学用計測機器・応用技術を半導体計測に展開することは、先ず不良解析および研究・開発の分野が対象となろう。現在、科学計測に使用されている機器・応用技術の中には、精度


あるいは感度に優れ、半導体の不良解析や研究・開発に使いたいと思われるものが幾つも有る。例えば、SPM(scanned probe microscopy:走査プローブ顕微鏡観察)による極薄酸化膜の絶縁破壊個所非破壊観測や反射電子顕微鏡による界面の非破壊観測などである。このような科学用計測機器・応用技術が汎用化され、半導体技術者が何時でも・何処でも・簡単に使えるようになることが期待される。半導体生産技術の進歩を加速するだけでなく、半導体産業を科学に立脚したものにするためにも大きな効果があろう。高性能な科学用計測機器・応用技術を半導体計測に展開するための技術課題としては、合理的経済性(合理的装置価格、合理的処理時間、合理的稼働率、合理的稼働費用など)を有すること、デバイスへの損傷や汚染が無いこと、ウエーハハンドリング/データハンドリング/データ解析を標準化すること(使い易くすること)が挙げられる。使い易さについては、最終的に、自動測定が期待される。自動測定を実現するためには、ウエーハハンドリングの自動化に加えて、データ処理機能の自動化(自動計測に適応した計測アルゴリズムとそれに基づくデータのコンピュータ処理化)が必須である。


一方、半導体産業に見られるグローバル化の動きは今後益々強くなろう。半導体計測でもグローバル化の流れに対応することが求められている。すなわち、誰が・何時・どんな装置を使って測定しても、同じ計測結果が得られるようにしなければならない。このことは、計測データの互換性・普遍性をもたらすだけではなく、計測装置を互換使用できることからの派生効果として、設備投資額削減にも繋がる。最終的には、計測の信頼性を確保あるいは保証するため、国家計量標準あるいは国際計量標準にまで遡れるトレーサビリティを必要とする。当面の課題としては、パターン寸法、パターン重ね合わせ、膜厚などの校正標準を確立することが期待される。


以上応用技術の視点から課題を述べたが、検査・計測装置としては、以下のような要件を満たすことが必要である。

- ・ 検査・計測装置は使用台数の少ないこともあり、特に安定に稼働しなければならない:現在の一般的な稼働率 (equipment availability) は 90%程度であるが、2002 年 130nm ノードでは 95%以上、2008 年 70nm ノード以降では 98%以上の稼働率が期待されている。
- ・ 多品種少量生産の進展に対応して行かねばならない:ウエーハキャリアに装填されるロット数は、現行1ロット程度であるが、2002 年の 130 nm ノード以降には複数ロット/ウエーハキャリアが常態になると思われる。
- ・ ネットワークの高度化に即応しながら、計測データの活用技術を発達させて行かねばならない:実時間でのプロセス自動制御/歩留り管理を行うことは必然となり、検査・計測データの統合管理、プロセス異常の実時間検出/製造の自動停止、電気試験データとプロセス検査・計測データとの実時間相関解析・問題箇所の自動判定と云ったことを可能としなければならない。

計測における困難な課題	計測における問題の要約
・微細な高アスペクト比構造の合理的経済性を伴った観測	<ul style="list-style-type: none"> ・トレンチ/ホール の 3 次元加工寸法・加工形状の高速測定 ・トレンチ/ホール埋め込み材のボイドの非破壊・高速検出 ・トレンチ/ホール底部の残渣の高速検出・組成分析 ・サイズ 100 nm 以下の微粒子・パターン欠陥の検出
・微小領域における超薄膜、超薄層構造の合理的経済性を伴った観測	<ul style="list-style-type: none"> ・浅接合層のドーパント濃度の 3 次元プロファイル観測 ・高誘電率ゲート酸化膜 / 容量膜の膜厚、組成、化学結合状態、微量金属、信頼度測定 ・低誘電率(多層)層間膜の膜厚、組成、原子配列、機械的ストレス/強度、微量金属、電気容量、信頼度測定 ・バリアメタルの膜厚、化学結合状態、組成測定 ・メタル(積層)膜の膜厚、原子配列、組成測定 ・多層膜界面の化学結合状態、原子配列測定 ・ウエハ表面の微粒子、残渣、汚染の検出と組成分析
・ closed-loop manufacturing のための実時間プロセス制御用高精度・高感度モニタ	<ul style="list-style-type: none"> ・パターン寸法および合わせの短時間・高精度測定 ・高アスペクトホールのオープンチェッカ ・in-situ モニタ/on-line モニタによる精密制御: CMP 膜厚、ダマシ/トレンチ/STI などのハーフエッチング制御 ・エッチングにおけるレート・形状・ウエハ温度・プラズマの制御 ・in-situ モニタ/on-line モニタによる精密制御: RTA のウエハ温度、インプラの打ち込みイオン種/打ち込み深さ/ドーパント濃度、CVD チャンバ内不純物ガス濃度の測定
・高性能科学用計測技術の半導体計測への合理的経済性を伴った展開	<ul style="list-style-type: none"> ・例えば、SPM による極薄酸化膜の絶縁破壊個所非破壊観測や反射電子顕微鏡による界面の非破壊観測など ・合理的装置コスト、合理的スループット、デバイスに損傷・汚染を与えない測定 ・ウエハハンドリング、データハンドリング、データ解析の標準化 ・自動計測
・トレーサビリティ	<ul style="list-style-type: none"> ・CD、合わせ、膜厚、欠陥形状・サイズなどの校正標準

 新材料、新プロセスの短期間立ち上げ

 実プロセス処理時間の短縮

 歩留向上

図表 2 - 1 1 - 1 半導体計測における困難な課題

期待される到達レベルは、原則として、最初にニーズとしてのプロセス制御値あるいは余裕値を記述し、後段にそれ等を保証もしくは向上するために必要とされる計測精度および計測時の要件を記述する。また、プロセス制御値/余裕値および計測精度は 3 あるいは 3 に相当する数値を記述し、計測精度については算出の根拠となる P/T (precision to tolerance) 値を併記する。なお、P/T は $P/T = 6 / (UL - LL)$ にて定義される。ここで 3 は計測の精度、UL (upper limit) は制御すべきプロセスパラメータの管理上限、LL (lower limit) は管理下限を意味する。例えば、プロセスパラメータの許容値が $3_{process}$ で表されている場合には、 $(UL - LL) = 6_{process}$ となり、 $P/T = 3 / 3_{process}$ で表される。

ITRS では、測定精度を 1 で記載したり、プロセス管理幅 (UL - LL) を process range として表記し、 $\pm(UL - LL)/2$ の数値を記載した項目がある。

色表示は、プロセスニーズを水色で記載し、それらニーズに応えるべき計測技術が既に存在する場合は無色、未だ研究・開発段階ではあるが対応できる見込みのある場合を黄色、解決策が見当たらず対応の見通しが無い場合を赤色で記載した。なお、プロセスニーズの中から、計測装置の具備すべき機能として位置づけられる項目を取り上げ、計測時の要件として記載した。また、これらの色判定は、夫々の項目だけに着目し、可否を検討した結果である。

到達レベルから見て、デバイスおよびプロセス開発の隘路となり兼ねない重要な項目を挙げると、2002 年 130 nm ノードでは、デバイス構造の微細化や微細化に伴って派生する高アスペクト比化に対応することが主なニーズであり、180nm ノードから引き続いての課題である微細構造や高アスペクト比構造の高解像度観察、ドーパントプロファイルの高空間分解能計測に加え、極薄ゲート酸化膜や極薄容量絶縁膜の高精度膜厚測定が課題となる。2005 年 100 nm ノードでは、パターン微細化の推進を図ることが主なニーズとなり、ウエーハパターンやホトマスクパターンの寸法・パターン位置を高精度に測定することが課題となる。2008 年 70nm ノードでは、プロセス材料およびコンタミネーションをさらに精密に制御することが必要となり、微粒子や微量不純物の高感度検出が課題として浮上してくる。一方、全ノードを通して、精密にプロセスを制御するために、高性能なプロセス監視センサやプロセスモニタの開発が求められる。

製品の出荷開始年 テクノロジノード (DRAM 1/2 ビッチ: 緻密ライン)	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
---	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

インラインでのパターン形状観察						
孤立ラインの幅 (nm) ¹⁾	140	100	70	50	35	25
微細形状の観察分解能 (nm, P/T = 0.1)	1.4	1.0	0.7	0.5	0.35	0.25
ホール最大アスペクト比 ²⁾	6.3	7.5	9	10.5	12	13.5
ホール直径 (nm) ¹⁾	200	140	110	80	55	45
ホール底部観察分解能 (nm, P/T = 0.2)	2.8	2.0	1.4	1.0	0.7	0.5
ホール底部の検査速度 (wafers/h @5 points/w)	10	10	10	10	10	10
ホール埋め込み部ボイドの 検査速度 (wafers/h @5 points/w)	10	10	10	10	10	10

1) 孤立ラインの幅およびホール直径は、本報告書のリソグラフィに記載された数値を表示しており、ITRS に記載された数値とは異なる。

2) Dual-Damascene 構造では、この値に配線とピアホールのアスペクト比が加わる。

インラインでの微粒子測定とオフラインでの微粒子組成分析						
問題となる微粒子のサイズ (nm, パターン上)	90	65	50	35	25	17
実微粒子の検出感度 ¹⁾ (nm, パターン上)	90	65	50	35	25	17
組成分析が可能な最小の微粒子 サイズ (nm 密パターン上)	48	28	22	15	10	7
微粒子の組成分析時の位置決 め精度 (μm)	3	2	1	1	1	1

1) 実微粒子の検出感度：パターン上実微粒子の検出感度である。標準粒子の PSL (polystyrene latex) に対する感度ではない。実際的な検出感度は、ウエーハの表面粗さやパターンの材質・形状・密度に依存する。現行の PSL に代り、実粒子に近い散乱光強度を有する標準粒子の開発が期待される。

	プロセスノーズ		技術有り		技術開発中		技術無し
---	---------	---	------	---	-------	---	------

図表 2 - 1 1 - 2 A 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

オフラインでの基板表面微量不純物の測定						
表面クリティカル金属の制御レベル (at/cm ² , 各金属) ¹⁾	9.4×10^9	4.5×10^9	3.0×10^9	2.0×10^9	1.5×10^9	1.1×10^9
表面クリティカル金属検出感度 ²⁾ (at/cm ² , 各金属, P/T = 0.1)	9.4×10^8	4.5×10^8	3.0×10^8	2.0×10^8	1.5×10^8	1.1×10^8
表面有機物の制御レベル (at/cm ² , C 換算総量)	1.0×10^{13}	7.0×10^{12}	4.9×10^{12}	3.4×10^{12}	2.4×10^{12}	1.7×10^{12}
表面有機物の検出感度 ^{2,3)} (at/cm ² , 各有機物, P/T = 0.1)	2.0×10^{11}	1.4×10^{11}	9.8×10^{10}	6.8×10^{10}	4.8×10^{10}	3.4×10^{10}
表面微量酸素の制御レベル (at/cm ²)	$< 1 \times 10^{14}$	$< 1 \times 10^{14}$	$< 1 \times 10^{12}$	$< 1 \times 10^{12}$	$< 1 \times 10^{12}$	$< 1 \times 10^{12}$
表面微量酸素の検出感度 ²⁾ (at/cm ² , P/T = 0.1)	$< 1 \times 10^{13}$	$< 1 \times 10^{13}$	$< 1 \times 10^{11}$	$< 1 \times 10^{11}$	$< 1 \times 10^{11}$	$< 1 \times 10^{11}$

1) クリティカル金属としては、Na、Ca、Fe、Cq、Ni、Cuなどが挙げられる。

本表では、本報告書の FEP が 2 種類程度の汚染種を想定していることを考慮して、各元素に対して数値を規定しているが、ITRS では全金属量に対して数値を定めている。

2) 以降、分析の S/N は 3 以上とする：当該不純物を含まないと考えられる試料を複数回分析し、その計測値の標準偏差の 3 倍を検出感度とする。

3) 有機については、最大 5 種類の有機物検出を想定している。

オフラインでの基板表面微小領域不純物の測定 ¹⁾						
表面クリティカル金属の制御レベル (at/cm ² , 各金属)	9.4×10^9	4.5×10^9	3.0×10^9	2.0×10^9	1.5×10^9	1.1×10^9
測定領域 (μm)	0.18	0.13	0.1	0.07	0.05	0.035
表面クリティカル金属検出感度 (at/cm ² , 各金属, P/T = 0.1)	9.4×10^9	4.5×10^9	3.0×10^9	2.0×10^9	1.5×10^9	1.1×10^9

1) 偏析したり、溝・トレンチ・ホールの底部に局在する汚染金属を想定している。130 nm ノード以降では、測定領域中に存在する被測定原子の数が 1 以下になる。高感度化と併せて統計的な取り扱いが必要となろう。

なお、表には記載されていないが、有機物についても同様の微小領域計測が必要である。

図表 2 - 1 1 - 2 B 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

オフラインでのシリコン基板特性の計測						
P ⁺ 基板中酸素濃度範囲 許容変動値 (ppma, 3)	18-31 1.5	18-31 1.5	18-31 1.5	18-31 1.5	18-31 1.5	18-31 1.5
P ⁺ 基板中酸素濃度測定精度 (ppma, 3 , P/T = 1/3)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
バルク内微量金属の許容値 (含 SOI トップ Si 層、Epi 層) (at/cm ³ , Fe 換算の合計)	1×10^{10}	$< 1 \times 10^{10}$	$< 1 \times 10^{10}$	$< 1 \times 10^{10}$	$< 1 \times 10^{10}$	$< 1 \times 10^{10}$
バルク内微量金属の検出感度 (at/cm ³ , 各金属, P/T = 0.1) ¹⁾	1×10^9	$< 1 \times 10^9$	$< 1 \times 10^9$	$< 1 \times 10^9$	$< 1 \times 10^9$	$< 1 \times 10^9$

1) ITRS では、バルク内微量金属の検出感度を Fe 濃度で規定しているが、本表ではその他金属についても適用する。また、ITRS では 2008 年以降を赤にしているが、根拠が不明であり、本表では黄色とする。

オフラインでの純水中不純物の測定						
純水中金属の制御レベル ¹⁾ (ppt, 各金属)	19	9.1	5.9	4.0	2.9	2.2
純水中金属の検出感度 (ppt, 各金属, P/T = 0.1)	1.9	0.91	0.59	0.4	0.29	0.22
純水中酸素濃度制御レベル (ppt)	10	1	1	1	1	1
純水中酸素濃度検出感度 (ppt, P/T = 0.1)	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

1) 表面金属の制御レベルに比例して低減することを前提とする。

in-situ、オンラインでの純水および薬液中の微粒子の測定						
問題となる液中微粒子のサイズ (nm)	90	65	45	35	25	17
液中微粒子の検出感度 (nm)	90	65	45	35	25	17

図表 2 - 1 1 - 2 C 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

オフラインでの薬液中不純物の測定						
薬液中金属の制御レベル (ppt, 各金属)	234	114	74	50	37	28
薬液中金属の検出感度 (ppt, 各金属, P/T = 0.1)	23	11	7.4	5.0	3.7	2.8
薬液中 TOC の制御レベル (ppb)	< 60	< 30	< 20	< 15	< 10	< 10
薬液中 TOC の検出感度 (ppb, P/T = 0.1)	< 6	< 3	< 2	< 1.5	< 1	< 1
薬液中バクテリアの制御レベル (CFU/L)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
薬液中バクテリアの検出感度 (ppt, P/T = 0.1)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

オフラインでのレジスト中の微量金属の測定						
レジスト中金属の制御レベル (ppb, 各金属) ¹⁾	9.4	4.5	3.0	2.0	1.5	1.1
レジスト中金属の検出感度 (ppb, 各金属, P/T = 0.1)	0.94	0.45	0.30	0.20	0.15	0.11

1) 表面金属の制御レベルに比例して低減することを前提とする。

オンラインでの洗浄液中微量金属の測定 ¹⁾						
洗浄液中金属の制御レベル (アルカリ～中性) (ppt)	94	45	30	20	15	11
洗浄液中金属の検出感度 (アルカリ～中性) (ppt, P/T = 1/3)	31	15	10	6.7	4.9	3.7
洗浄液中金属の制御レベル (強酸性) (ppt)	9400	4500	3000	2000	1500	1100
洗浄液中金属の検出感度 (強酸性) (ppt, P/T = 0.3)	3100	1500	1000	670	490	370

1) バッチ (batch) 洗浄もしくは洗浄液循環式の枚葉洗浄において、ウエーハ洗浄に起因した洗浄液の汚れをモニタすることを想定している。

図表 2 - 1 1 - 2 D 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

インラインでの雰囲気測定						
気中アンモニアの制御レベル ¹⁾ (pptv【ng/m ³ 】)	1000 【772】	800 【618】	730 【564】	660 【510】	610 【471】	580 【448】
気中アミンの検出感度 (pptv【ng/m ³ 】, P/T = 0.1)	100 【77】	80 【62】	73 【56】	66 【51】	61 【47】	58 【45】
気中有機物の制御レベル (ng/m ³ , 吸着性有機物総和)	305	214	150	105	73	51

1) 孤立ラインのばらつきから想定している：レジスト開発における耐アンモニア性の向上と、線幅の縮小に応じたアンモニア量低減の要求とを考慮し、足して2で割ることによって数値を算出している。レジスト開発の状況に合わせて、今後の見直しが必要である。

オフラインでのスラリー中の微量金属の測定						
スラリー中の金属の制御レベル (ppb) ¹⁾	9.4	4.5	3.0	2.0	1.5	1.1
スラリー中の金属の検出感度 (ppb, P/T = 0.1)	0.94	0.45	0.30	0.20	0.15	0.11

1) STI 等に適用される酸化膜、および Si 用 CMP のスラリーを想定している。制御レベルの数値は、レジスト中の金属に準じて設定されている。なお、表には記載されていないが、スラリー中の TOC / バクテリアについては、薬液同等の制御レベルが必要と考えられる。

インラインでのウエーハ平坦度の測定						
配線の最小加工寸法 (nm)	250	200	175	175	175	175
露光フィールド (mm×mm)	25×32	25×34	25×36	25×40	25×42	25×44
焦点深度 (mm)	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4
フィールド内平坦度 (nm)	250	200	175	175	175	175
平坦度測定精度 ¹⁾ (nm, 3σ, P/T = 0.2)	25	20	17	17	17	17

1) 平坦度は、平坦性に優れたチャックにウエーハを固定して観測した際に、フィールド程度の領域で計測されるウエーハ最表面の最大高低差と定義する。

図表 2 - 1 1 - 2 E 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

インラインでのウエーハ上パターンの寸法測定						
パターンの加工寸法精度 ¹⁾	18	13	10	7.0	5.0	3.5
緻密ライン/孤立ライン ²⁾ /ホール (nm, 3)	14 20	10 15	7.0 13	5.5 8.0	4 5.5	3 4.0
パターン寸法の測定再現性 ³⁾	3.6	2.6	2.0	1.4	1.0	0.70
緻密ライン/孤立ライン/ホール (nm, 3 , P/T = 0.2)	2.8 4.0	2.0 3.0	1.4 2.6	1.1 1.6	0.8 1.1	0.6 0.80
同一寸法パターン間の測定平均値のばらつき ⁴⁾ (3)	10%	10%	10%	10%	10%	10%
ラインエッジラフネスの測定精度 ⁵⁾ (nm, 3 , P/T = 0.1)	1.4	1.0	0.7	0.55	0.4	0.3
繰返しパターン寸法測定 ⁶⁾ (ロジックゲート セルサイズ: μm^2)	0.65	0.25	0.11	0.045	0.019	0.0075
曲線形状パターンの 2 次元的大小測定 ⁷⁾ (ホール nm/ セルサイズ μm^2 /SN サイズ μm^2)	200 0.26 0.097	140 0.10 0.034	110 0.044 0.012	80 0.018 0.0039	55 0.0075 0.0013	45 0.0031 0.0003

図表 2 - 1 1 - 2 F 半導体計測の期待される到達レベル

- 1) パターンの加工寸法精度は、エッチ後のパターンを対象として規定されている。
- 2) 孤立ラインの加工寸法精度については、本報告書のリソグラフィに記載された数値を表示しており、ITRS に記載された数値とは異なる。
- 3) 測定再現性は、CD 測定装置の装置間誤差（装置マッチング）を含む。
ホールの測定再現性について、ITRS は MPU (micro-processor unit) ホールから算出して 2005 年に 2.3 nm と記載しているが、本表ではマイルストーンの DRAM (dynamic random access memory) ホールに合わせて 2.6 nm とする。
- 4) 同一寸法パターン間の測定平均値のばらつき：同一寸法のパターンを計測した場合であっても、パターン形成工程の違いなどに起因して現れる測定の誤差。ITRS では、Maximum CD measurement bias として記述している。
なお、測定バイアスは、パターン寸法の真値あるいは参照値と測定平均値との差として定義されるが、日本では装置起因のオフセット誤差として理解される。
- 5) エッジラフネス：視野程度の範囲でパターンエッジの平均線を引いた時、該パターンエッジ平均線の方に観察される山頂線と谷底線の間隔を言う。山頂線とは、最も高い山頂を通るパターンエッジ平均線に平行な線であり、谷底線とは、最も低い谷底を通るパターンエッジ平均線に平行な線である。山頂とはパターンエッジの凸部最先端を言い、谷底とはパターンエッジの凹部最奥点を言う。
P/T=0.1 は、許容エッジラフネスを孤立ライン加工寸法精度の 1/3、測定精度を許容エッジラフネスの 1/3 程度と想定し、設定したものである。
- 6) 繰返しパターン寸法測定：ロジックゲートなど、同一のセルパターンがダイ内に繰返し存在する場合、そのパターン群を繰返しパターンと称する。繰返しパターン寸法測定は、繰返しパターン中に

存在するパターンを特定し、そのパターンの寸法を測ることである。この機能は、例えば、着目するゲートトランジスタの性能と加工寸法との正確な相関関係を求める場合などに用いられる。

ロジック・ゲートセルの面積は一義に規定できないが、ここでは、5トランジスタ/ゲートと仮定し、2トランジスタ/セルに相当する DRAM メモリセルの 2.5 倍に設定した。

- 7) 曲線形状パターンの 2 次元的サイズ測定: パターンエッジ平均線が直線ではなく曲線をなすパターンを、曲線形状パターンと言う。このようなパターンのサイズを求めることを、曲線形状パターンの 2 次元的サイズ測定と称する。微細パターンでは、リソグラフィマージンの減少に伴い、近接効果によるパターン歪み（直線エッジの曲線化）が顕著になる。曲線形状パターンのサイズ測定は、例えばホールやメモリセルの拡散領域・容量電極パターンなど、極微細パターンの寸法測定に対応する。

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

インラインでのウエーハ上パターンの重ね合わせ精度測定						
重ね合わせ精度 (nm, 3)	70	50	35	30	20	15
重ね合わせ測定精度 (nm, 3 , P/T = 0.1)	7.0	5.0	3.5	3.0	2.0	1.5

インラインでのマスク基板上微粒子検査とマスクパターン欠陥検査						
OPC パターン寸法 1/4 (1/5) 縮小/等倍 ¹⁾ (nm)	180 -	160 90	130 65	90 45	60 30	42 20
問題となる欠陥サイズ 縮小/等倍 (nm)	150/-	100/26	80/20	60/14	40/10	30/8
微粒子・パターン欠陥の検出感 度 縮小/等倍 (nm)	150/-	100/26	80/20	60/14	40/10	30/8
位相シフトパターン欠陥検査	シフト有り	シフト有り	シフト有り	シフト有り	シフト有り	シフト有り

1) 等倍のレチクルを製作することは極めて困難な課題であり、あまり現実的ではない。

図表 2 - 1 1 - 2 G 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

インラインでのマスクパターンの寸法測定						
最小マスクパターン寸法	560	360	260	180	120	85
1/4 (1/5) 縮小/等倍 (nm)	-	90	65	45	30	20
OPC パターン寸法	180	160	130	90	60	42
縮小/等倍 (nm)	-	90	65	45	30	20
パターンの加工寸法精度	23/-	16/10	12/7	8/5	6/4	4/3
緻密ライン/孤立ライン/ホール ¹⁾	18/-	12/ 8	8/6	6/4	4/3	3/2
縮小/等倍 (nm, 3)	26/-	17/10	13/9	10/6	8/5	6/4
パターン寸法測定再現性	4.6/-	3.2/2.0	2.4/1.4	1.6/1.0	1.2/0.8	0.8/0.6
緻密ライン/孤立ライン/ホール ¹⁾	3.6/-	2.4/1.6	1.6 /1.2	1.2/0.8	0.8 /0.6	0.6/0.4
縮小 / 等 倍 (nm,3 ,P/T = 0.2)	5.2/-	3.4 /2.0	2.6 /1.8	2.0/1.2	1.6/1.0	1.2/0.8
パターンつなぎ精度	6.0/-	4.0/2.7	2.7/2.0	2.0/1.3	1.3/1.0	1.0/0.7
縮小/等倍 (nm, 3)						
パターンつなぎ測定精度	1.2/-	0.8/0.54	0.54/0.4	0.4/0.26	0.26/0.2	0.2/0.14
縮小/等倍 (nm,3 ,P/T = 0.2)						

1) ホールの加工寸法精度および測定再現性における記載数値は、ホール面積の平方根で正規化された値である。

ホール寸法測定再現性において、2008年に記載された 1.6 nm は、レベンソン型 PSM に必要とされる数値であり、通常のコトマスクに関して記載されたホール加工寸法精度の値から算出したものではない。

インラインでのマスクパターンの位置精度測定						
パターン位置精度	36/-	28/14	20/10	16/8	12/6	8.5/5
1/4 (1/5) 縮小/等倍 (nm, 3)						
パターン位置測定精度	3.6/-	2.8/1.4	2.0/1.0	1.6/0.8	1.2/0.6	0.85/0.5
縮小/等倍 (nm, 3 ,P/T = 0.1)						

図表 2 - 1 1 - 2 H 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

インラインでの位相シフトマスクの計測						
露光方式と露光波長 (nm) ¹⁾	248	193 又は 248 + PSM	157 又は 193 + PSM	157 + PSM	NA	NA
位相差精度 ハーフトン型/レベンソン型 (3°)	2° / -	2° / 2°	2° / 2°	2° / 1°	NA	NA
位相差測定精度 (3°, P/T = 0.2)	0.4°	0.4°	0.4°	0.2°	NA	NA
ハーフトン型透過率許容変動 値 (3°)	4%	4%	4%	4%	NA	NA
透過率測定誤差 (3°, P/T = 0.2)	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	NA	NA

1) 波長のみはハーフトン型、波長 + PSM はレベンソン型位相シフト露光を意味する。

インライン/ オンラインでのゲート絶縁膜の膜厚測定						
ロジック・ゲート絶縁膜: 材質/誘電率 ¹⁾	SiO ₂ /3.9	SiON/3.9	Si ₃ N ₄ /7.5	Ta ₂ O ₅ /25	Ta ₂ O ₅ /25	Ta ₂ O ₅ /25
酸化膜換算膜厚範囲 (nm)	1.9-2.5	1.5-1.9	1.0-1.5	0.8-1.2	0.6-0.8	0.5-0.6
膜厚許容変動値 (3°)	4%	4%	4%	4%	4%	4%
ゲート絶縁膜膜厚 (nm)	1.9-2.5	1.5-1.9	1.9-2.9	5.1-7.7	3.8-5.1	3.2-3.8
ゲート絶縁膜膜厚測定精度 ²⁾ (nm, 3°, P/T = 0.1)	0.0076	0.0060	0.0077	0.021	0.015	0.013
ゲート絶縁膜膜厚測定速度 (s/point)	5	5	5	5	5	5
ゲート絶縁膜膜厚測定パターン サイズ ³⁾ (μm×μm)	60×60	60×60	60×60	60×60	60×60	60×60
ゲート絶縁膜測定対象 ウェーハ	プロセス ウェーハ	プロセス ウェーハ	プロセス ウェーハ	プロセス ウェーハ	プロセス ウェーハ	プロセス ウェーハ
ゲート絶縁膜膜厚の検査方法	インライン	インライン	インライン	オンライン	オンライン	オンライン

1) ITRS では、ゲート絶縁膜の材料名・誘電率を規定していないが、本表では物理膜厚を推定するために想定 of 材料名および誘電率を記載した。

2) ITRS では、ゲート絶縁膜膜厚測定精度として、酸化膜厚に換算した数値を記載しているが、本表では物理膜厚に対する膜厚測定精度を記載した。

3) スクライブエリアに配置された測定用パターンである。

図表 2 - 1 1 - 2 I 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

インライン/ オンラインでの容量絶縁膜の膜厚測定						
容量絶縁膜: 構造	Cyl.	Pedestal	Pedestal	Pedestal	Pedestal	Pedestal
材質/誘電率	MIS	MIM	MIM	MIM	MIM	MIM
酸化膜換算膜厚範囲 (nm)	Ta ₂ O ₅ /22	Ta ₂ O ₅ /50	BST /250	epiBST/700	? /1500	? /1500
膜厚許容変動値 (3)	3.0 4%	0.95 4%	0.45 4%	0.15 4%	0.060 4%	0.043 4%
容量絶縁膜膜厚 (nm) ¹⁾	11.5	12.2	28.7	27.2	23.0	16.4
容量絶縁膜膜厚測定精度 (nm, 3 , P/T = 0.1)	0.046	0.049	0.11	0.11	0.092	0.066
容量絶縁膜膜厚測定速度 (s/point)	5	5	5	5	5	5
容量絶縁膜膜厚測定パターン サイズ ²⁾ (μm×μm)	60×60	60×60	60×60	60×60	60×60	60×60
容量絶縁膜測定対象ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ
容量絶縁膜膜厚の検査方法	インライン	インライン	インライン	オンライン ³⁾	オンライン	オンライン

- 1) MIS (Metal Insulator Silicon) 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、単位を nm で表わして、 $t_{\text{diel}} = (t_{\text{eq.ox}} - 1) \times \text{diel} / 3.9$ 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、 $t_{\text{diel}} = t_{\text{eq.ox}} \times \text{diel} / 3.9$ で計算している。
- 2) スクライブエリアに配置された測定用パターンである。
- 3) クラスタツール上に搭載する膜厚測定モジュールが必要とされる。

図表 2 - 1 1 - 2 J 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

オンラインでのバリア膜の測定

バリア膜: 材質	堆積膜	堆積膜	堆積膜	反応膜	反応膜	反応膜
膜厚 (nm)	23	13	3	1	1	1
膜厚許容変動値 (3)	10%	10%	10%			
バリア膜膜厚測定精度 (nm, 3 , P/T = 0.1)	0.23	0.13	0.03	-	-	-
バリア膜膜厚測定速度 (s/point)	5	5	5	5	5	5
バリア膜膜厚検査パターン サイズ (μm×μm) ¹⁾	60×60	60×60	60×60	60×60	60×60	60×60
バリア膜測定対象ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ
バリア膜の検査方法 ²⁾	オンライン	オンライン	オンライン			
バリア膜組成比の測定精度	1%	1%	1%	1%	1%	1%

1) スクライブエリアに配置された測定用パターンである。

2) クラスタツール上に搭載する膜厚測定モジュールが必要とされる。

in-situ でのメタル積層膜の膜厚測定

メタル積層膜: 材質・構造	Cu/ バリアメタル	Cu/ バリアメタル	Cu/ バリアメタル	Cu 単層	Cu 単層	Cu 単層
膜厚 (nm)	350	274	225	176	137	109
許容変動値 (3)	10%	10%	10%	10%	10%	10%
メタル積層膜膜厚測定精度 (nm, 3 , P/T=0.1)	3.5	2.7	2.3	1.8	1.4	1.1
メタル積層膜膜厚応答速度 ¹⁾ (s)	0.035	0.027	0.023	0.018	0.014	0.011
メタル積層膜膜厚測定配線幅 (nm)	180	130	100	70	50	35
メタル積層膜測定対象ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ
メタル積層膜膜厚検査方法 ²⁾	in-situ	in-situ	in-situ	in-situ	in-situ	in-situ

1) Cu の CMP 研摩速度を 10nm/s とし、所要研摩時間の 1/10 に設定している。

2) ダマシン Cu - CMP の研摩終点検出には、基板とパッドの摩擦係数の変化を観測するなど、残膜厚を間接的に検出する方式が用いられている。しかし、研摩量をより高精度に制御することが必要であり、残膜厚の in-situ 測定が望まれる。残膜厚の in-situ 測定パターンは、次善の策として、スクライブエリア内に設けることも可能である。

図表 2 - 1 1 - 2 K 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

インラインでの層間膜の誘電率測定						
層間膜の比誘電率範囲	3.5-4.0	2.7-3.0	1.6-2.2	<1.5	<1.5	<1.5
周波数 (GHz)	1.25	2.1	3.5	6	10	17
許容変動値 (3)	20%	20%	20%	20%	20%	20%
層間膜比誘電率測定精度 (3、P/T=0.1)	2%	2%	2%	2%	2%	2%
層間膜比誘電率測定速度 (sec/point)	5	5	5	5	5	5
層間膜比誘電率測定パターン サイズ (μm×μm) ¹⁾	60×60	60×60	60×60	60×60	60×60	60×60
層間膜測定対象ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ
層間膜の検査方法	インライン	インライン	インライン	インライン	インライン	インライン

1) スクライブエリアに配置された測定用パターンである。

オフラインでの浅接合層のドーパント測定						
ドーパント濃度 ¹⁾ (atoms/cm ³)	2×10 ¹⁸	3×10 ¹⁸	4×10 ¹⁸	8×10 ¹⁸	1.4×10 ¹⁹	2.0×10 ¹⁹
ドーパント元素 ²⁾	P, As, B	P, As, B	P, As, B	P, As, B	P, As, B	P, As, B
接合層の深さ ³⁾ (nm)	36-72	26-52	20-40	15-30	10-20	7-15
サイドウォール幅 (nm)	72-144	52-104	40-80	28-56	20-40	14-28
ドーパントプロファイル測定の空間分解能 2-D/3-D (nm) ⁴⁾	10/-	7/15	5/10	4/7	3/5	2/3.5
オフラインでのドーパント濃度測定精度 (3)	5%	4%	3%	2%	2%	2%

1) ドーパント濃度: 接合近傍の濃度を示す。拡散層表面の数値は、1×10²⁰ 台である。

2) ドーパント元素: Extension の拡散層におけるドーパントを示す。基板側のチャネル部は、In, Sb などの重元素が新たに用いられ始める。

3) 接合層の深さ: Extension 部の深さを示す。

4) 本表の記載数値は、本報告書のモデリング&シミュレーションに基づくものであり、ITRS の値とは異なる。ITRS では、2-D/3-D とともに 1999 年 3nm...2014 年 0.8-0.6nm としている。

図表 2 - 1 1 - 2 L 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジーノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
-----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

インラインでのイオン注入におけるドーパント量（ドーズ量） 直接モニタ						
ドーパント量の範囲 ¹⁾ (atoms/cm ²)	10 ¹² -10 ¹⁶	10 ¹² -10 ¹⁶	10 ¹² -10 ¹⁶	10 ¹² -10 ¹⁶	10 ¹² -10 ¹⁶	10 ¹² -10 ¹⁶
ドーパント量測定精度 (3) ¹⁾	3%	2%	2%	1%	1%	1%
濃度直接測定の対象ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ	プロセス ウエーハ

1) 範囲は Well/Vt/Extension/S・D など全イオン注入工程、測定精度は Vt を対象とする。

図表 2 - 1 1 - 2 M 半導体計測の期待される到達レベル

製品の出荷開始年 テクノロジノード	1999 180 nm	2002 130 nm	2005 100 nm	2008 70 nm	2011 50 nm	2014 35 nm
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------

in-situ での非熱平衡プロセスにおけるウエーハ表面温度の測定						
RTP 不純物活性化における 処理温度 () ¹⁾	600-1100	600-1000	600-1000	600-900	600-900	600-900
許容変動範囲 (, 3)	1	1	1	1	1	1
昇温 (/s)	20-50	20-50	>200	>350	>350	>500
RTP 不純物活性化時ウエーハ 表面温度の測定精度(, 3)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
RTP 不純物活性化時ウエーハ 表面温度測定の空間分解能 (mm)	1	1	1	1	1	1
RTP 不純物活性化時ウエーハ 表面温度測定の時間分解能 (ms)	5-2	5-2	<0.5	<0.29	<0.29	<0.2
プラズマプロセスにおける 処理温度 () ²⁾	30-500	30-500	30-500	30-500	30-500	30-500
許容変動範囲 (, 3)	5	5	5	5	5	5
プラズマプロセス時ウエーハ 表面温度の測定精度 (, 3)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
プラズマプロセス時ウエーハ 表面温度測定の空間分解能 (mm)	1	1	1	1	1	1
プラズマプロセス時ウエーハ表 面温度測定の時間分解能 ³⁾ (ms)	5	5	5	5	5	5

1) RTP は rapid thermal process の略である。

2) 要求される時間分解能は、昇温速度 200 /s の RTP を想定し、昇温速度の逆数(5ms/) の 1/10 として計算している。

3) 要求される時間分解能は、昇温速度 20 /s のプラズマプロセスを想定し、昇温速度の逆数 (50ms/) の 1/10 として計算している。

将来、低温ゲートあるいは多層レジストエッチングの必要性が生じた場合には、マイナス温度での制御が必要になる。

図表 2 - 1 1 - 2 N 半導体計測の期待される到達レベル

2 - 1 1 - 4 課題

技術課題に勝る大きな課題として、開発リソースの不足が挙げられる。計測装置の市場は、半導体製造装置市場に比べて規模が格段に小さい上、膨大な装置開発費を要することが背景にある。一半導体メーカーあるいは一計測装置メーカーが担うには重過ぎる負荷であり、半導体メーカー・計測装置メーカー・公的研究機関が負担を応分しながら、一体となって開発を推進することが必要である。

2 - 1 1 - 5 解決策の候補技術

図表 2 - 1 1 - 3 に解決策の候補技術を記載する。

パターン寸法の測定では、CD-SEM (critical-dimension measurement scanning electron microscope: 測長 SEM) の測長精度を向上しその適用限界を延ばすことが、最も確度の高い技術開発方向である。とは言え、CD-SEM の測長精度向上に併せて、CD-SPM (critical-dimension measurement scanned probe microscope: 寸法測定用走査プローブ顕微鏡) や電子線ホログラフィなど新技術の実用化開発を促進し、来るべき CD-SEM の限界に備えることが必要となる。CD-SEM では、装置間差を含めた装置起因の誤差、およびパターン材質・パターン形状・パターン密度に依存した試料起因の誤差を低減することが課題となる。一方、CD-SPM および電子線ホログラフィなど新技術の開発に際しては、経済性を重視し、合理的なスループットを実現することが課題である。

パターン重ね合わせ精度の測定では、現行の光学的手法が精度の限界に近づいており、SEM や SPM への展開を図らなければならない。SEM および SPM では、合理的な COO (cost of ownership) の達成、すなわち経済性の向上が課題となる。

ウエーハ上の微粒子検出については、100 nm ノード以降の決め手となる候補技術が無い。したがって、現行の散乱光検出方式および光学像比較方式における限界打破技術の開発と、SEM 応用など新手法の実用化開発を並行して進めることが必要である。散乱光検出方式では検出感度の向上に併せて微粒子と COP (crystal originated particles or crystal originated pits) を分離すること、光学像比較方式ではパターンや表面構造の影響を軽減して微粒子検出感度を向上すること、そして SEM 応用ではマルチカラム方式などの新技術を開発して高スループット化を図ることが課題となる。

高アスペクトホール底部のインライン検査では、当面の最有力候補が SEM の応用である。しかし、分解能の点からは SEM も切り札とは言えず、SPM や光散乱方式などの新技術を並行して開発することが必要である。SEM ではホール底部の観察分解能/焦点深度の向上が課題であり、SPM では探針形状の最適化・再現性向上と高スループット化が必要となる。一方、光散乱方式では、比較的広い面積から得られたデータを統計処理することによって、微小な個別欠陥を検出できるようにすることが課題となる。

ウエーハ表面の微量金属測定では、ICP-MS (inductively-coupled plasma mass spectrometry: 誘導結合プラズマ質量分析法) や濃縮法を併用した TXRF (total x-ray fluorescence: 全反射蛍光 X 線分析法) を用いて、35nm ノードに到るまでの必要な検出感度を達成可能と考えられる。しかし、分析前処理での汚染が検出感度を低下させるため、解決すべき実用面での課題が多い。また、局所的に高濃度な汚染がデバイス特性に重大な影響を与えるとされており、ウエーハ全面での平

均的な汚染濃度だけではなく、ウエーハ内での汚染分布を測定できることが必要である。通常の TXRF や TOF-SIMS (time of flight-secondary ion mass spectroscopy: 飛行時間型二次イオン質量分析法) は、インライン化も可能ではあるが、要求感度を達成するために、1 桁以上の感度向上が必要である。インラインで局所的な汚染濃度の計測を可能とするためには、レーザ TOF MS の適用が検討されるべきである。

なお、デバイス特性に与える金属汚染の影響を軽減するためには、以下に述べるバルク内酸素濃度を適正に制御しなければならない。

バルク中の計測は基板の特性に強く依存する、不純物濃度の低い基板については、FTIR (fourier transform infrared spectroscopy: フーリエ変換赤外分光法) を用いて必要感度での酸素濃度検出が可能であり、SPV (surface photo voltage: 表面光電圧法) を用いて Fe を特定しつつ必要感度程度での非破壊計測ができる。Fe 以外の金属は検出技術の開発が必要である。p/p+基板や SOI (silicon on insulator) 基板については、SIMS (secondary ion mass spectroscopy: 二次イオン質量分析法) を用いて酸素濃度を必要感度で破壊計測できるが、非破壊計測のためには新規な技術の開発が必要になる。

ウエーハ上の有機物計測は、プロセスにおける付着有機物や残留有機物を定量化したり、クリーンルームの雰囲気からの汚染 (AMC: airborne molecular contamination) を評価する目的で行われる。後者の場合、ゲート酸化前後を始めとした汚染に敏感な工程 (critical process steps) に適用されるため、より高い検出感度が必要とされる。計測には、TD-GC/MS (thermal desorption-gas chromatography-mass spectroscopy: 昇温脱離-ガスクロマトグラフィ/質量分析法) や TOF-SIMS を用いることになるが、現時点ですら、要求検出感度を達成できていない。TD-GC/MS では、感度の向上に加えて、ウエーハ裏面に付着したレジスト残渣などの影響を無くす工夫を為されてはいるものの、さらにデータの信頼性を高めることが要求される。また、TOF-SIMS では、高感度化に併せて、真空脱離による影響を無くすことや有機物種の特定能力を高めることが課題となる。有機物の特定を目的としなければ、真空を使わずに済み金属が露出したウエーハにも適用できる上、実時間で温度特性が採れるため、TD-APIMS (thermal desorption-atmospheric pressure ionization mass spectroscopy: 昇温脱離-大気圧質量分析法) の適用性が高い。インラインでの計測については、レーザ TOF MS の適用が最も期待される。

プロセスウエーハのモニタでは、汚染の偏析/ホール・トレンチ内部の残渣解析などが必要であり、金属や有機物を局所分析できることが望ましい。候補技術と考えられる TOF-SIMS は、空間分解能・分析下限ともに改善を必要とする。

界面制御の観点から、表面の微量酸素の計測が今後重要になると予想される。酸素計測の候補技術としては、XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) が挙げられる。しかし、分析前にウエーハを大気中に放置すると自然酸化膜が形成されてしまうため、オンラインあるいは in-situ XPS の開発が望まれる。

薬液中の金属濃度計測は、オフラインであれば MS や IC (ion chromatography: イオンクロマトグラフィ) を用いて 100nm ノードまでの必要感度を達成できる。濃縮技術などの改良ができれば、35 nm ノードに到るまでの必要な検出感度も達成可能であろう。しかし、金属汚染は目に見えない欠陥であり、影響が明確になるまでに長い期間を要する。したがって、オンラインの計測技術の開発が必要とされる。強酸性の洗浄液の場合、液中の金属はウエーハ表面に付着し難いため要求検出感度が比較的低い。したがって、AAS (atomic absorption spectroscopy: 原子吸光法) や IC などの現存要

要素技術をインテグレーションすることによって、100 nm ノードまでの必要感度を達成できる見込みがある。低コストでオンライン化することが課題となる。アルカリ性～中性領域の洗浄液の場合、液中に含まれる金属がウエーハ表面に付着し易いため、より高感度の計測が必要であり、新しい手法を含めた開発が必要である。

レジスト中の微量金属分析は AAS や ICP-MS の検出下限で十分対応可能なレベルにあるが、実際の検出感度は分析前処理の不純物制御レベルで制限されるため、前処理技術の改善が必要である。含まれる有機物の悪影響を除く意味では、酸素添加が可能な MIP-MS(microwave induced plasma-mass spectrometry:マイクロ波プラズマ質量分析法) によって 2 桁程度の高感度化が可能である。

気中のアミン測定に関しては、分析種が明確であれば 35nm ノードに到るまでの必要な検出感度を達成可能である。今後開発される化学増幅型レジストのアミン耐性次第では、より高感度の測定が必要になるかも知れない。

気中の有機物分析に関しては、分析種を特定すれば、70 nm ノードまで必要な感度を達成可能である。主な分析種は、クリーンルーム内のプラスチック部品などから発生するシロキサン、フタル酸エステル系有機体である。気中有機物の除去にはケミカルフィルタを用いるが、今のところ除去すべき有機物を選択する自由度が小さく、特定の有機物だけを除去することができない。そのためフィルタの寿命モニタには、影響の有無に拘らず全ての有機物種をモニタすることが必要であり、広いダイナミックレンジの計測技術が要求される。

ゲート絶縁膜や容量絶縁膜の膜厚測定では、XPS(X-ray photoelectron spectroscopy:X 線光電子分光法)、AES(auger electron spectroscopy:オーグエ電子分光法)、波長領域を真空紫外に拡張した VUV(vacuum ultra-violet:真空紫外光) エリプソメトリ、および電氣的測定 (C-V、I-V) が技術の候補であり、これら技術の高性能化を図ることが必要である。なお、エリプソメトリでは、測定雰囲気からの分子汚染物(AMC) の付着が膜の光学的特性を変化させるため、測定時間とともに測定値が増大するとの報告があり、測定時の雰囲気を有機体の無い清浄状態に保つことが必要である。当面はスクライブエリアに配置された測定パターンを利用したインライン計測であるが、将来必要とされる素子領域インライン計測のためには、マイクロプローブエリプソメトリやマイクロプローブ XPS などの新規な方式の技術開発が必要である。一方、オフライン計測技術として、FIB(focused ion beam:集束イオンビーム) を照射して所定領域の断面を切り出した後、STEM(scanning transmission electron microscope/microscopy:走査型透過電子顕微鏡/走査型透過電子顕微鏡観察法) や TEM(transmission electron microscope/microscopy:透過電子顕微鏡/透過電子顕微鏡観察法) を用いて断面を観測し、膜厚や組成を評価する破壊観測技術が用いられている。この分野でも、反射電子顕微鏡を用いて薄膜と基板の界面を非破壊で観察する等、新技術の開発が進んでいる。

なお、ここでは、膜厚を電氣的に測定する手法について言及していないが、‘ 電氣的特性に直結した計測データが欲しい ’ というニーズ動向を考慮しなければならない。電氣的膜厚測定の位置付けを明確にすることは、今後のロードマップの課題となる。

浅接合層ドーパントプロファイルのオフライン計測では、共鳴光イオン化による高感度化技術を併用した TOF-SIMS、ナノメータ寸法の探針を利用した 4 端子法、ドーパントの種類や濃度により二次電子強度が異なる現象を利用した SEM および各種 SPM が候補技術であり、さらに空間分解能や検出感度の向上を図ることが必要である。SPM には、トンネル電流のドーパント濃度依存性を利用し

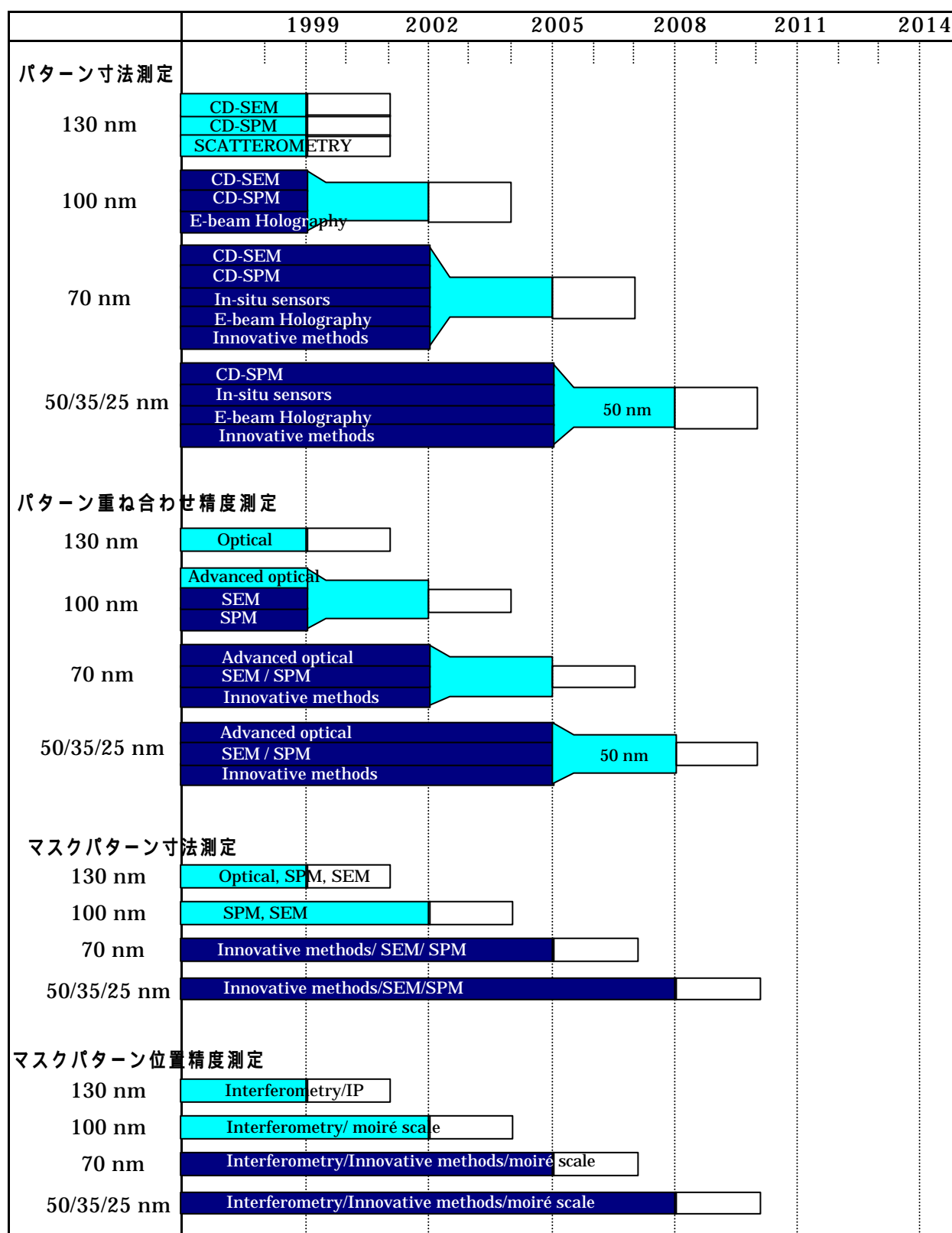
した STM (scanning tunneling microscope:走査型トンネル顕微鏡)や、探針に印加した電圧を変調させることに依り得られた dC/dV を信号として画像化する走査キャパシタンス顕微鏡等がある。将来技術として、これら SPM を電氣的測定と組み合わせる等の新規な方式の開発が望まれる。

非熱平衡プロセスすなわち過渡状態におけるウエーハ表面温度の in-situ 測定では、非接触かつ速い応答速度の測定が必要なことから、放射温度計、屈折率の温度変化を利用したレーザ干渉温度計、あるいは赤外線顕微鏡を基礎にした計測技術の開発が必要である。赤外線顕微鏡は表面温度の 2 次元分布を瞬時に計測できる特徴を有する。将来的には、温度計測に関する要求はより高くなることが予想され、新しい原理に基づく計測法の開発が必要となる。

メタル配線材料のオンラインおよび in-situ 膜厚計測では、音波法、GI-XRR (grazing incidence X-ray reflectivity:微小角入射 X 線反射法)、および MEMS (micro-electro-mechanical systems) 技術を用いて作製されるナノメータ寸法の 4 端子法が有力候補である。音波法は、レーザ照射により薄膜表面に音波パルスを発生させ、このパルスが薄膜中を透過・反射を繰り返す過程における光反射率の変化を測定して、膜厚を計測する方法である。GI-XRR は、X 線を薄膜表面にすれすれに照射して、X 線の反射強度や蛍光 X 線を計測する方法である。反射強度の測定により膜厚や密度に関する情報を、蛍光 X 線の測定により組成に関する情報を得ることができる。MEMS 技術を用いて作成されるナノメータ寸法の 4 端子法からは、薄膜の抵抗や膜厚を計測することができる。将来的には、実際の素子領域の計測技術として、マイクロプローブ GI-XRR 法等、の新規な方式の技術開発が必要である。

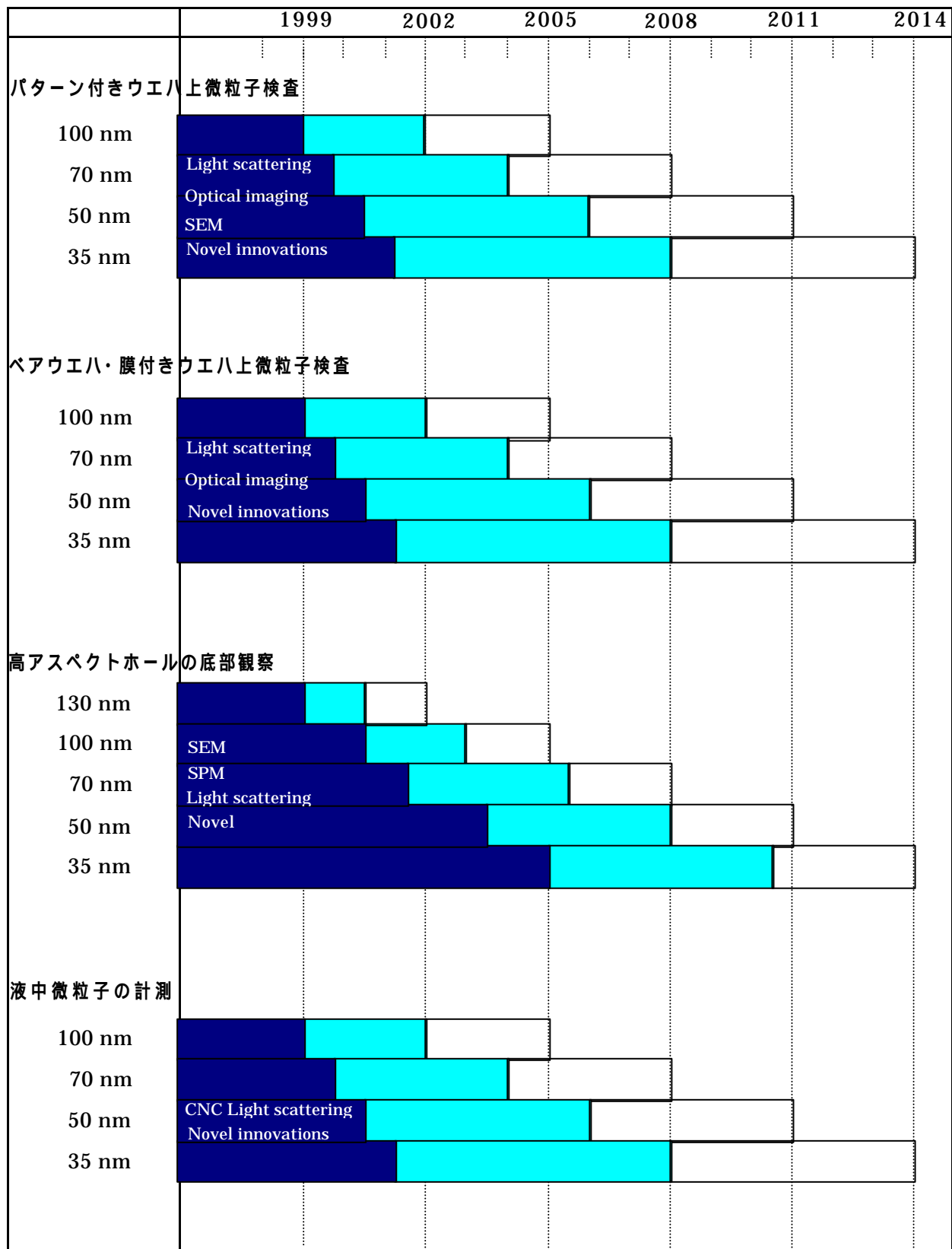
層間膜のインライン誘電率測定では、VUV エリプソメトリ、および電氣的測定 (C-V, I-V) が技術の候補であり、これら技術の高性能化を図ることが必要である。なお、層間絶縁膜の誘電率は、膜形成方法や後処理方法に依存するが、パターン依存性は小さい。したがって、測定に必要なパターンサイズとしては、ウエーハに搭載可能な範囲で出来るだけ大きなパターンを用いれば良い。しかし、将来的には、実際の素子領域を測定対象とし、微細な探針を電極に用いて、誘電率を測定できることが期待されるため、SPM の技術開発も必要である。ナノメータのプローブ作製には MEMS 技術の発達が必須である。

なお、表には記載されていないが、ハーフエッチングプロセスにおけるエッチング終点検出、イオン打込みにおけるドーズ量モニタ、およびイオン打込みやプラズマプロセスにおけるウエーハ表面帯電量の測定は、その重要性が喧伝されているにも拘らず、未だ解決策がない。今後の重要な研究・開発課題である。

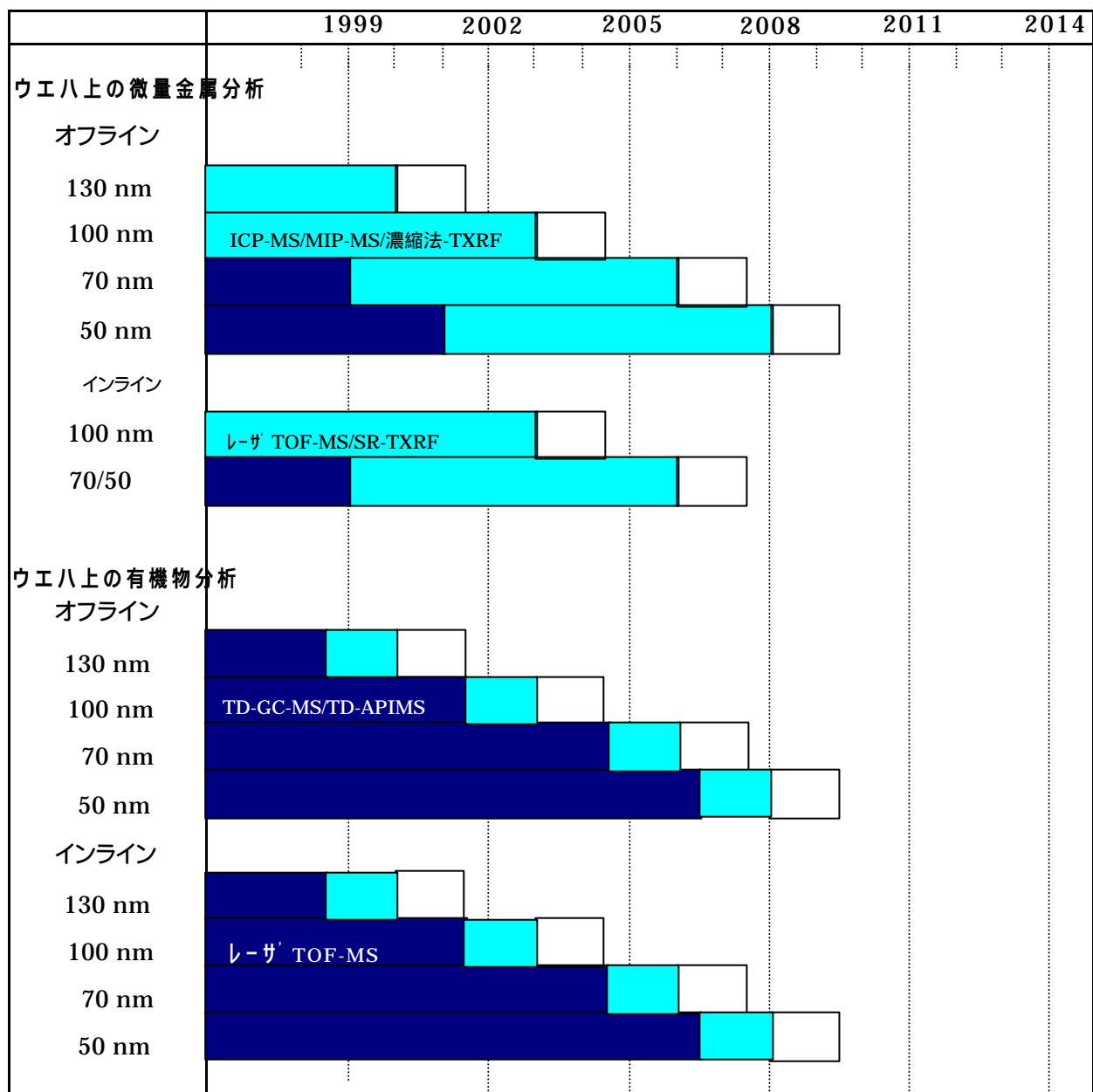


今後の研究が必要
 開発が進行中
 実用に向けての試行段階

図表 2 - 1 1 - 3 A 半導体計測における困難な課題の解決策候補技術



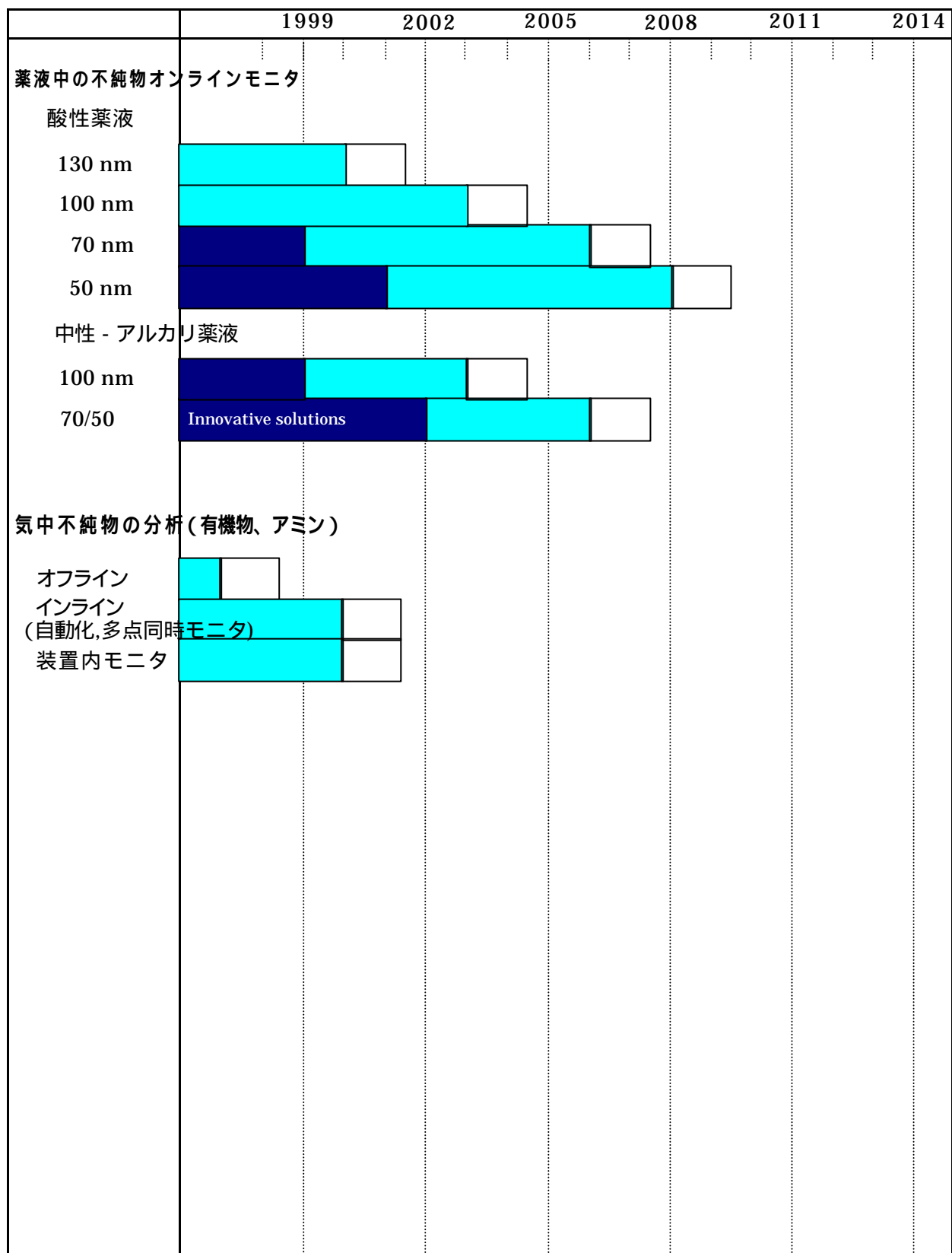
図表 2 - 1 1 - 3 B 半導体計測における困難な課題の解決策候補技術



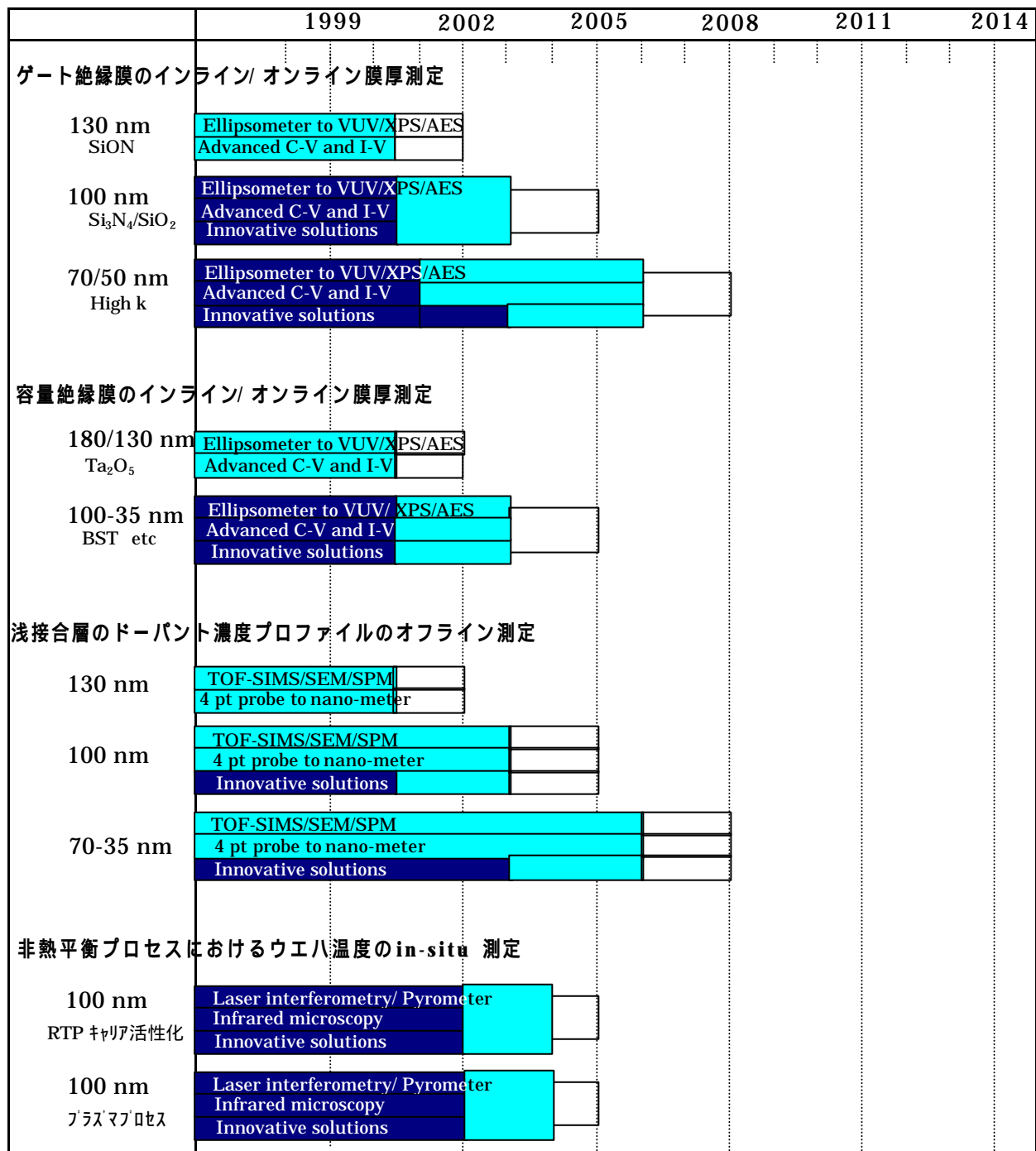
SR-TXRF: Synchrotron Radiation-Total X-ray Fluorescence

TOF-SNMS: Time of Flight-Sputtered Neutral Mass Spectroscopy

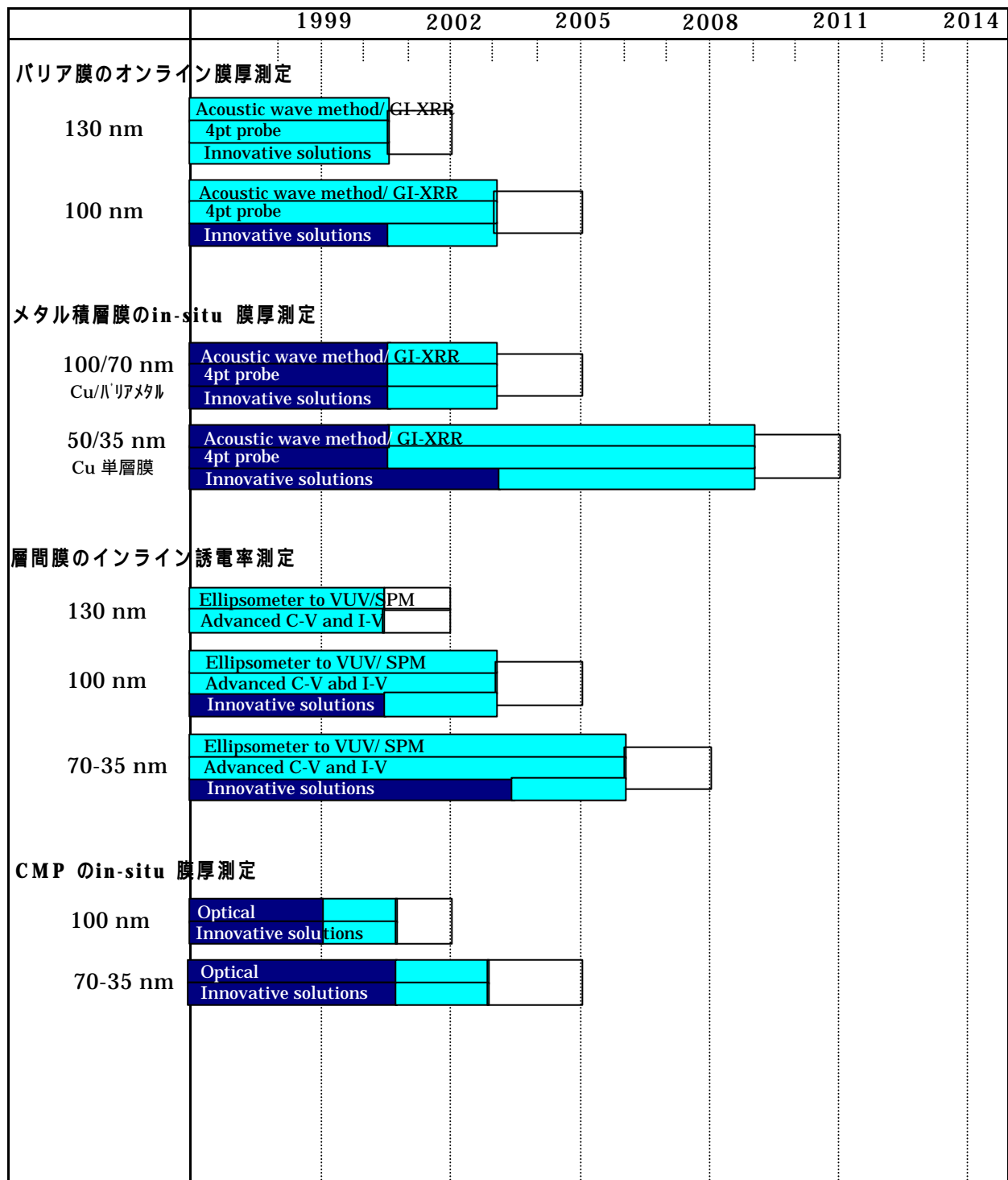
図表 2 - 1 1 - 3 C 半導体計測における困難な課題の解決策候補技術



図表 2 - 1 1 - 3 D 半導体計測における困難な課題の解決策候補技術



図表 2 - 1 1 - 3 E 半導体計測における困難な課題の解決策候補技術



図表 2 - 1 1 - 3 F 半導体計測における困難な課題の解決策候補技術

2 - 1 1 - 6 依存性

計測はデバイス/プロセス技術の基盤を為す技術であり、そのニーズ/目標到達レベルは、全てのデバイス・プロセス技術の動向に左右される。特に、微細化・多層化の進展/新材料・新デバイス構造・新プロセスの導入/微細化に伴う計測対象の微小化・微量化が、新しい計測ニーズを生み出す。また、今後は‘デバイスの電気的特性を制御するために何を計測すべきか?’という視点からのニーズ発掘が重要になる。一方、先端的計測技術は、開発および生産の初期段階ほど必要性が高い。したがって、計測技術者はプロセス/デバイスの研究・開発段階から、リソグラフィ/PID/FEP/配線/組立て&パッケージング/モデリング&シミュレーションなどのエンジニアと密接な情報交換を行い、提起される計測ニーズを早期・適確に把握するとともに、ニーズに適合した計測技術の迅速な開発に努めなければならない。

2 - 1 1 - 7 提言

計測の現状を概観すると、計測技術の進歩がデバイス/プロセス技術の急速な発達について行けない状況にある。多くの計測項目がデバイス/プロセスの要求に応えられなくなりつつあり、既に目標レベルに未達の項目も有る。この状況を打開・改善するための提言を以下に纏める。

(1) デバイス/プロセスの研究・開発に際しては、計画段階から計測ニーズを明確にするとし、適確なニーズを計測技術の研究・開発に迅速にフィードバックすることが、今まで以上に重要となる。

- ・ デバイス/プロセスの要求に応えるためには、計測ニーズを適確に捉え、開発技術の焦点を絞り、早期に開発を着手することが必要である。しかも、計測技術はプロセス装置の開発/プロセスの開発/新材料の導入検討と言った、先行的研究・開発の時期に必要とされることが多い。一方、計測へのニーズは新材料・新デバイス構造・新プロセスの導入などに左右されるが、計測に携わる人達にとって、それらの技術開発方向が必ずしも明確に見えてはいない。

(2) 半導体メーカ、計測装置メーカ、および公的研究機関が一丸となつてのセンシング技術および計測装置開発が必要である。

- ・ 計測装置メーカは、比較的小規模であることが多く、先行開発や装置試作の費用負担に耐えることが難しい。

(3) デバイスやプロセス設計に際しては、‘より余裕度のある設計’を課題として、研究・開発を進めることが今まで以上に重要となる。例えば、CDばらつき、ゲート絶縁膜/容量絶縁膜の膜厚ばらつきなどに鈍感なデバイスおよびプロセスを開発・設計しなければならない。

- ・ 計測の精度/分解能/感度は原子レベルの極限に近づきつつあり、計測性能がデバイス/プロセスの物理限界で制約されることも予測される。仮に計測の技術開発が精力的に進められるとしても、必ずしも期待されるような性能・機能が実現されない恐れもある。

最後に SOC ということに言及すると、混載/短T A T /少 量 多 品 種 /マスク製作などをキーワードとし、これら課題に対応した計測技術を開発することになる。しかし、SOC の意味するところは広く、‘ SOC のための計測 ’ のあるべき姿を一つに絞り、明確に描くことができていない。‘ 日本の半導体技術を牽引すべき、旗印としての SOC ’ を明確にするとともに、各要素技術の課題・目標として詳細化することを、急がねばならない。

参照

図表 2 - 1 1 - 2 および図表 2 - 1 1 - 3 は、記載内容の一部を 99’ ITRS から引用している。