

半導体プロセス評価用インラインAFM(原子間力顕微鏡)

In-Line Atomic Force Microscope for Semiconductor Process Evaluation

小藪 拓和 Hirokazu Koyabu 見坊 行雄 Yukio Kembo
村山 健 Ken Murayama 保坂 純男 Sumio Hosaka



注：略語説明ほか

AFM (Atomic Force Microscope)

*は、日立製作所の公開特許である。

AFM装置(a)と、新旧方式による画像の違い

ステップイン*方式による、忠実な像[(c)参照]が得られる。

AFM装置は $\phi 300$ ラインで稼動中である。新手法[(c)のステップイン]では、高段差部(STI)に対し、試料に忠実な像が得られる。

きたるユビキタス情報社会を底辺から支える半導体デバイスに求められる性能には、高速処理や低消費電力などが要求される。性能を満たすための素子構造は、微細化に伴っていっそう高集積化され、多層構造による高段差加工が行われたり、従来と異なる材料が用いられたりする。加えて、コスト低減を目的とした生産性の向上を目指し、面積の大きなシリコンウェーハ(300 mm)が用いられるようになる。

その結果、半導体の製造工程では、高段差の平坦化や、従来のエッチングに加えて埋込加工が併用されるようになった。これらを管理するために、チップ全面にわたる高精度平坦度計測やナノメートル単位での加工深さ計測が求められるようになってきた。しかも、ウェーハの大口径化はコストを押し上げ、従来の、切断してプロファイルを求めていた方法が敬遠され始めている。これらの要求を満たす新しいインライン評価装置として、オングストローム(0.1 nm)の分解能を持つ原子間力顕微鏡(AFM)が注目されてきており、 $\phi 300$ ラインでの稼動機も含め、すでにインラインユースでの実績を上げ始めている。

1 はじめに

AFM (Atomic Force Microscope : 原子間力顕微鏡) では、試料の上方から計測することにより、他の手法では得られない試料の微細な三次元形状ひいては切断面を非破壊で得られる。しかし、さまざまな技術的課題があり、それが普及を阻害してきた。

日立グループは、それらの課題を克服することにより、装置制御が平易な、半導体プロセス評価用ワイドエリアAFM²⁾(以下、WA型AFMと言う。)を開発した。さらに、この装置にデータをリニアで、広域に走査できる機能を付加した結果、半導体製造工程で複数の適用事例を実現した。

ここでは、半導体プロセス評価用のこのWA型AFMについて述べる。

2 従来AFM(原子間力顕微鏡)とWA型AFM

2.1 AFMの概要

WA型AFMのブロック図を図1に示す。

一般的なAFMでは、X-Yスキャナに連動したカンチレバ先端の探針で試料面を走査し、X-Yの位置信号とZの上下移動信号により、三次元の位置情報を得る。その情報を基に、立体画像として利用したり、任意の試料表面プロファイル像を取得する。検出に用いる原子間力には、ファンデルワールス引力と、相対する斥力(反発する力)の2種類がある。斥力で変形するカンチレバのたわ

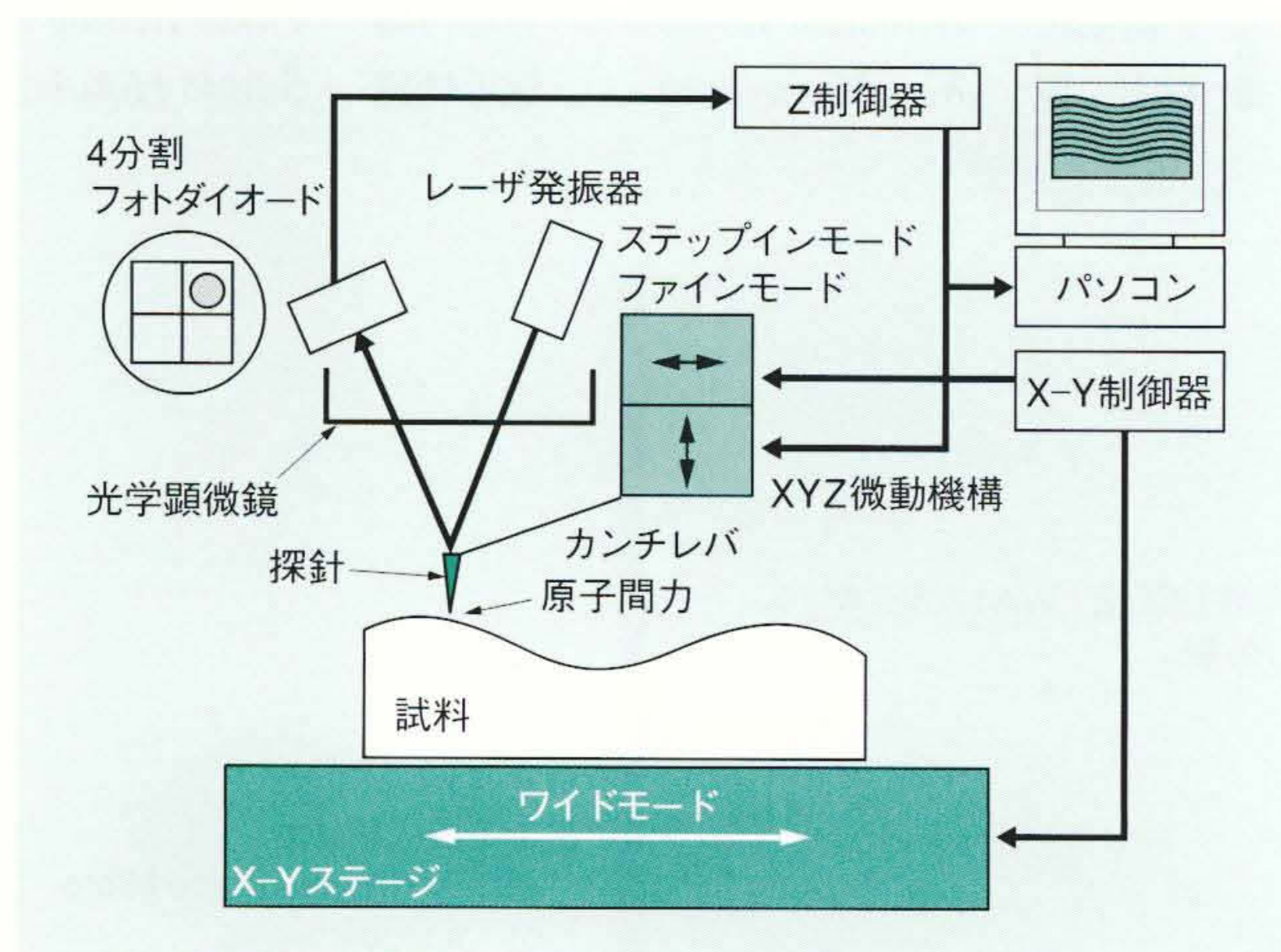


図1 WA型AFMのブロック図

カンチレバのばね定数に相当する原子間力を検出しながら試料表面を走査し、設定値との差がゼロになるように駆動機構を制御する。

み量を光てこ方式^{※1)}で高感度に検出し、たわみ角が一定になるように、探針をZ軸方向にサーボ機構を用いて自動制御している。

AFMは、この制御結果で生じた探針位置(x, y, z)を三次元データとして利用するもので、一般に、原子像をとらえたり、世界最小の文字を描くなどの例で、先端技術の象徴として知られている。しかし、従来の装置は、研究室では有効であっても、工業的な観点からは、信頼性や耐久性の低いものであった。その原因は、以下に述べる3点である。

2.2 従来AFMの課題とWA型AFMによる解決策

第一は、測定走査スピードの決定である。この課題については、これまでは試行しながら試料表面ごとに対処していた。試行は測定者の技量に依存したため、習熟度の差で大きな誤差が生じた。時には映像を取得できない場合もあり、大きな障害となっていた。

WA型AFMでは、新しい測定制御方式である「ステップイン法」^{※2)}の開発により、技量に依存することなくデータを取得できるようにした。また、この開発技術は、自動化へのベースともなった。

第二は、走査の高精度化である。探針をXYZに走査する機構として、平行平板機構を開発した。XYZ各軸が独立に並進運動を行うためにきわめて高精度な測定が行える。

従来の研究開発用途のAFMには、図2に示すチューブ式のXYZ走査機構が広く用いられている。簡単な機構で

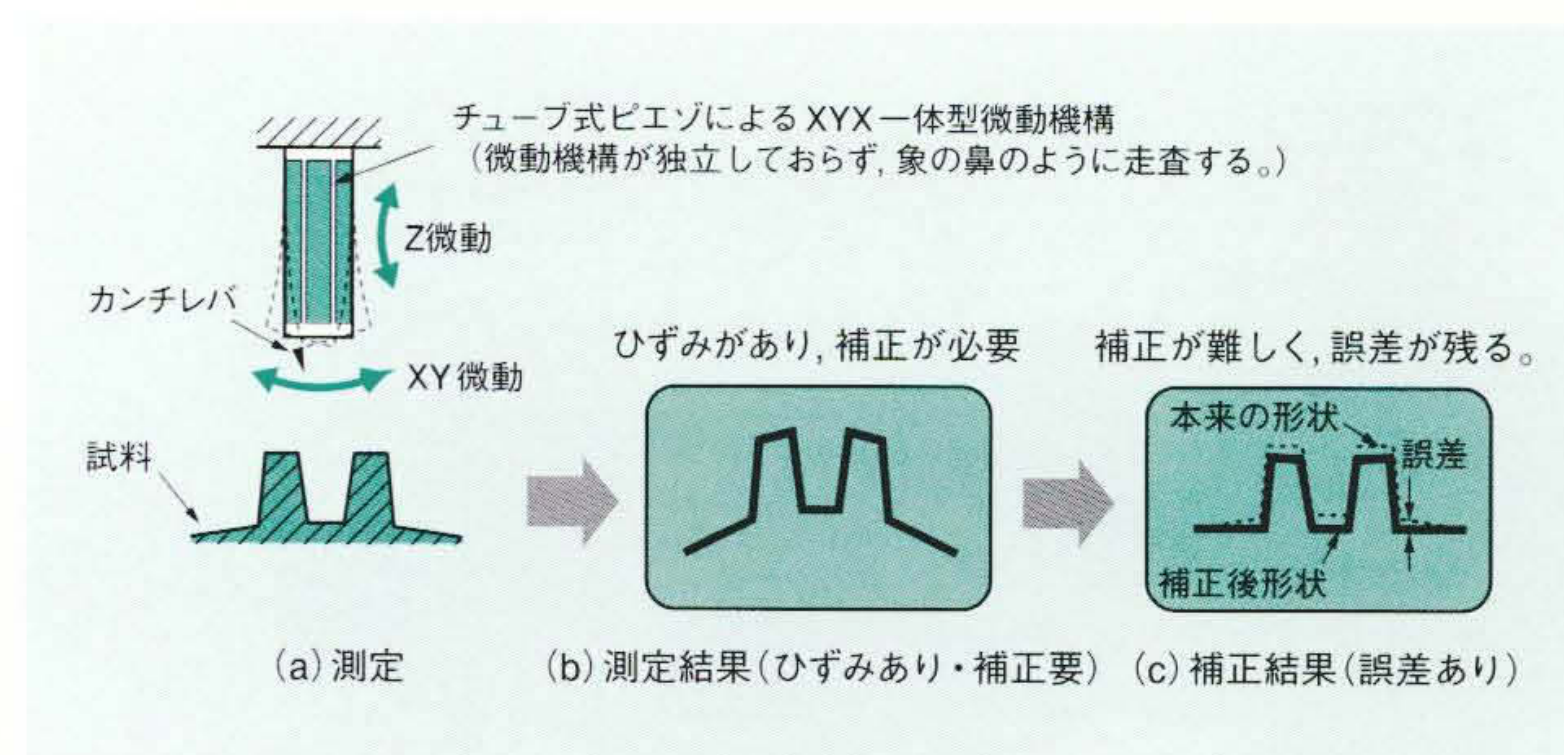


図2 従来型AFMによる測定

XYZ一体型微動機構を用いた測定結果にはひずみが生じ、補正が必要である。しかし、補正結果にはさらに誤差が残る。

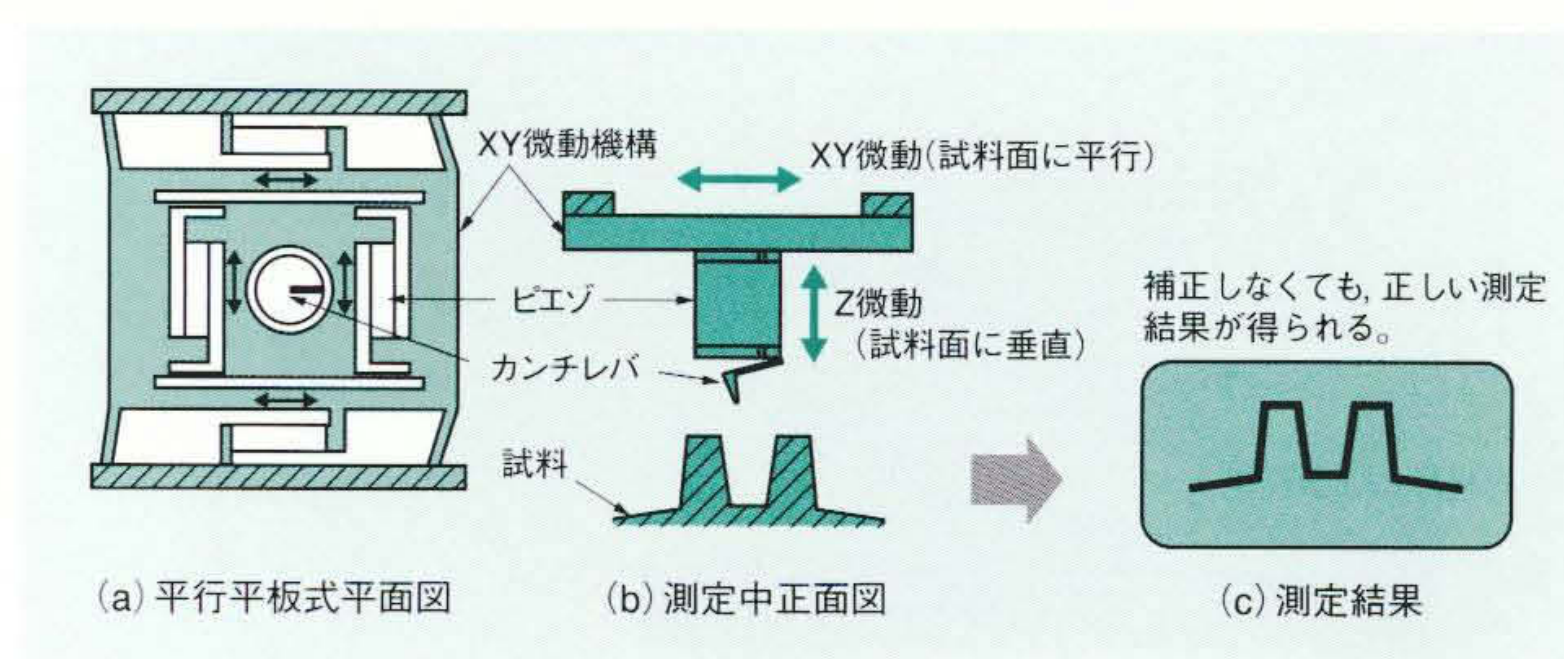


図3 WA型AFMによる測定

平行平板式微動機構の組み合わせにより、補正しなくても、ひずみなく高精度な測定結果が得られる。

象の鼻のように自由に操作できることが特徴である。しかし、首振り円弧運動を行うために、得られる像にひずみが生じる。測定者が試料表面を洞察してひずみを補正してきたが、測定表面は数式にのっとりような約束した状態になく、補正後のデータは近似値しかとり得なかった。洞察力に依存する補正は測定者に依存され、測定者ごとに異なる結果を招く原因となっていた。

WA型は、図3(b)に示す平行平板式走査機構^{※3)}とZ軸専用の微動ピエゾの採用により、カンチレバの動作を試料表面に対して水平方向は平行に、上下方向は垂直に制御し、従来法の問題を解決した。WA型のXYZ走査機構では、同時に剛性の向上が図れ、これまでよりも安定した動作を実現している。求められたデータは補正を必要とせず、生データのまま高精度な測定結果が得られる〔図3(c)参照〕。

第三は、測定範囲の拡大である。従来AFMの測定範囲は、圧電素子を用いたXY走査機構の制約から10～100 μmが限界であった。WA型AFMでは、超平坦X-Yステージ(図1参照)の開発により、測定範囲を25.6 mm²にまで拡大することに成功した。これにより、チップ全面の平坦度測定をAFMの性能で実現することができた(図4参照)。従来の小面積測定あるいは一次元の測定では不可能な測定である。AFMの常識を越えたWA型の

※1)、※2)および※3)は、日立製作所の公開特許である。

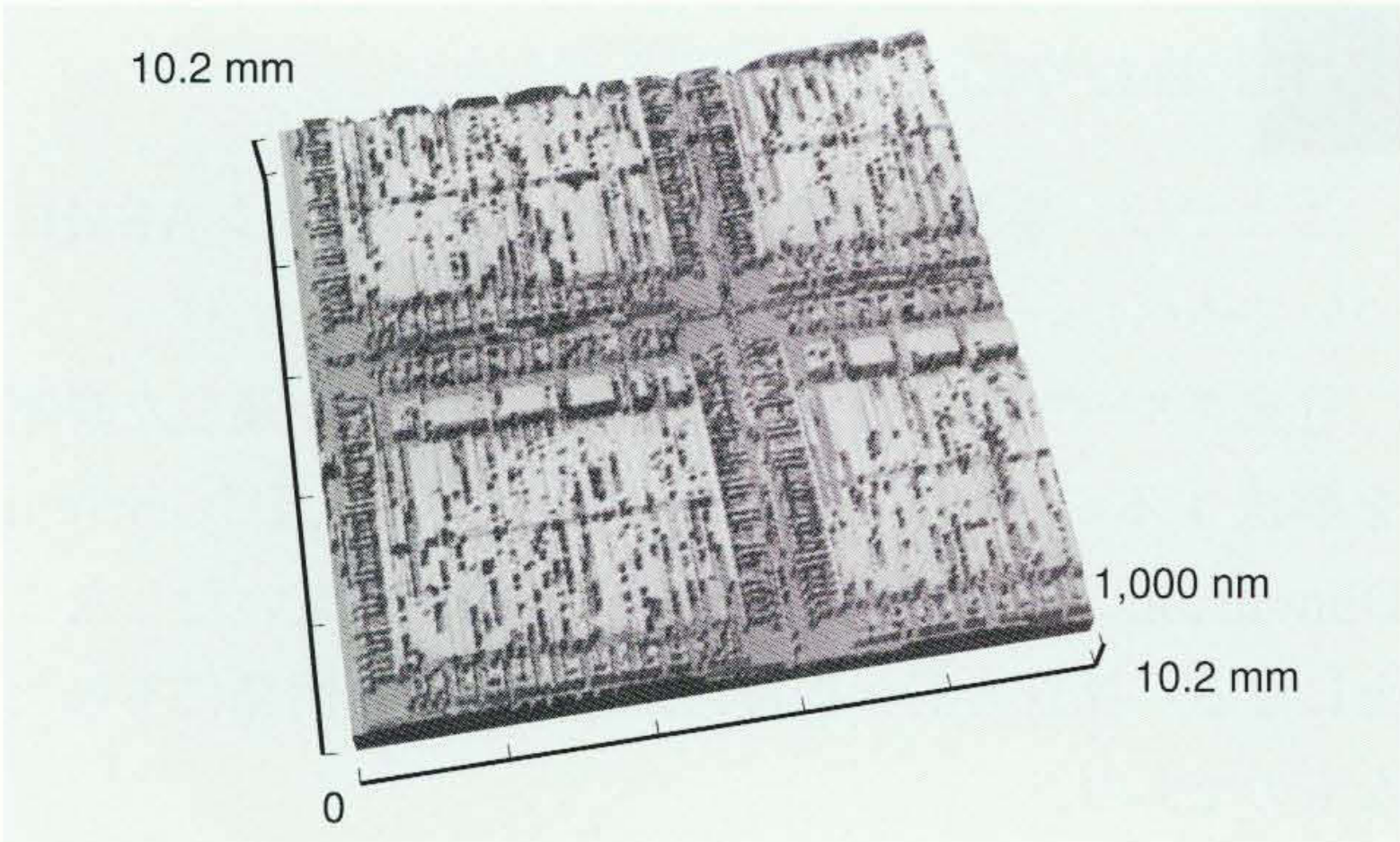


図4 チップ平たん度(CMP前)
WA型だけの持つチップサイズ平たん度測定によるCMP前平たん度結果(高さ方向を500倍強調)を示す。

広域計測機能は、測定分野を拡大し、半導体のプロセス管理へ適用され始める大きなブレークスルーとなった。

2.3 ステップイン方式

新しい測定法であるステップイン検出法の動作原理を図5に示す。同図中、(i)から(iii)で、カンチレバの動きの特徴を表した。

この新手法によると、コンタクト法で問題となる横方向の応力を生じることがなく、高段差サンプルでもプロー

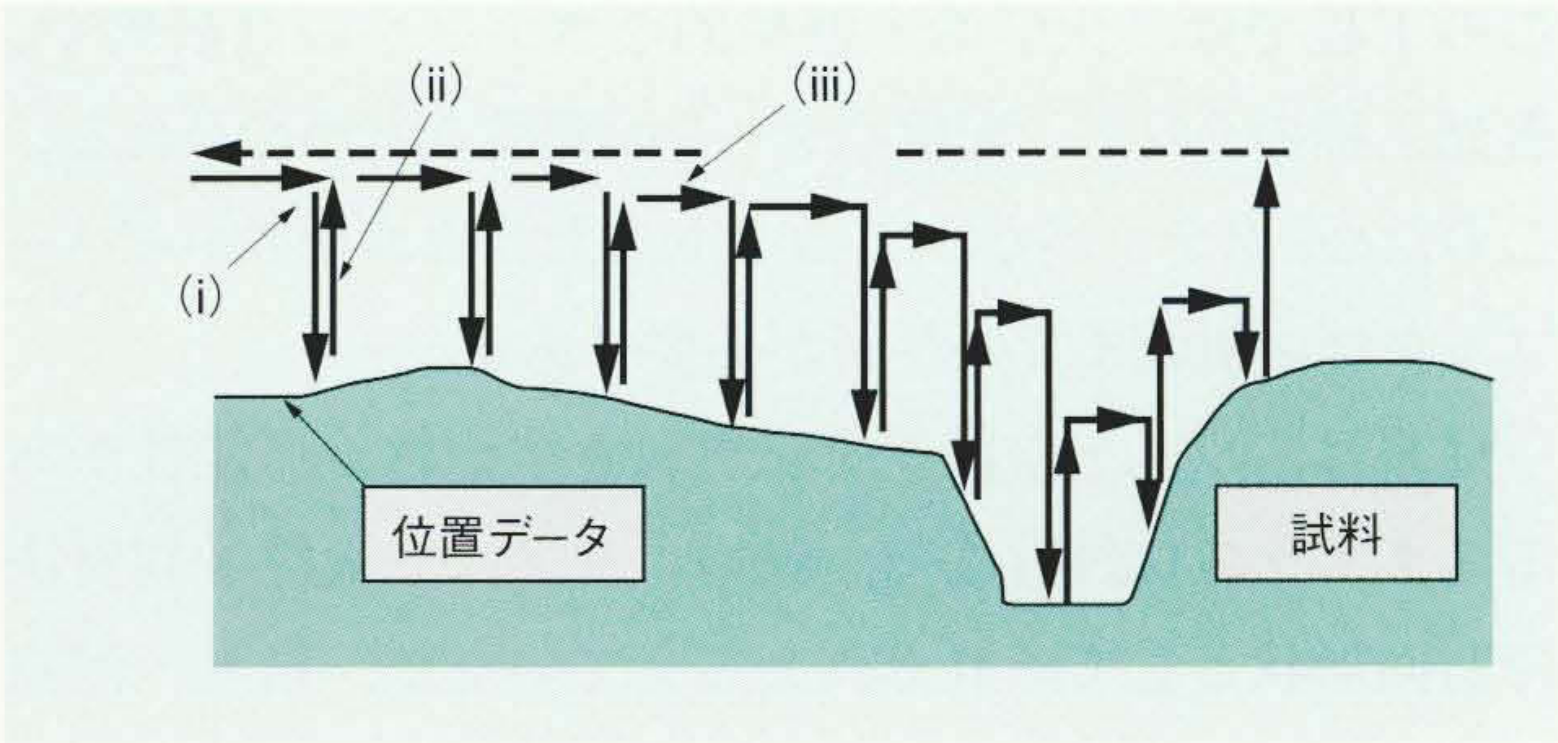


図5 ステップイン方式の動作概要
走査動作が停止した状態(i)でプローブが下降し、表面検出後(ii)、退避する。プローブが退避した状態(iii)で、1ステップ走査動作をする。

ブの跳ね上がり(ねじれ現象)や折損が生じないので、常に安定した像を取得することができる。得られるデータは、リニアセンサによるものである。

3 半導体製造プロセスへの適用

半導体製造工程の変革と、WA型AFMの解決策(図6参照)について以下に述べる。

この装置が導入された背景には、CMP(Chemical Mechanical Polishing: 平たん化処理)工程の採用があった。

工程	製造プロセスの変更		WA型AFMによる解決	観察寸法	従来の評価法での課題	
	変更点	新規ニーズ				
露光	高感度レジストの採用	電子線に弱いレジストへの対応	パターン形状の観察	～100 nm[X]	二次電子観察法 課題: レジスト変形	
	超解像法 (PSM)	シフト層の計測	深さ(高さ)の計測	～500 nm[Z]	光学法 課題: 間接測定	
素子分離	素子分離工程の変更 (LOCOS→STI)			～600 nm[X]	二次電子観察法 スタイラス法 問題点: きずの発生	
				たい積膜応力緩和形状の決定 平たん化状態の観察 アイソレータ上部に発生するくぼみによる寄生トランジスタの抑止観察	～20 nm[Z] ～20 nm[Z] 数ナノメートル[Z]	透過電子顕微鏡 透過電子顕微鏡 透過電子顕微鏡 課題: ウェーハ切断破壊観察
平たん化	層間接続材料の変更	加工終点の最適化	リセス(周辺からのくぼみ)量の観察 バリア膜凸部の観察	～20 nm[Z] 数ナノメートル[Z]	二次電子観察法 課題: 間接測定	
	パターン段差解消法の変更	加工条件の最適化	面内許容段差の観察 局部段差の観察 マイクロスクラッチの観察 最適CMP条件の決定	～200 nm[Z] 数十ナノメートル[Z] 数十ナノメートル[Z] ～25 nm[XY]	スタイラス法 課題: きずの発生 光学散乱法	
配線	配線材の変更 (Al→Cu) (エッチング→CMP)	溝の形状抵抗値の推定	溝の深さ観察 グローバル段差の測定 オーバポリッシング量の計測 ディッシング量の計測 エロージョン量の計測 グレーン観察	～500 nm[Z] ～100 nm[Z] 数十ナノメートル[Z] 数十ナノメートル[Z] 数十ナノメートル[Z] 1 nm[X]	二次電子観察法 スタイラス法 二次電子観察法 AFM(従来法), スタイラス法 AFM(従来法), スタイラス法 二次電子観察法	

注: 略語説明
LOCOS (Local Oxidation of Silicon)
STI (Shallow Trench Isolation)
TEG (Test Element Group)
PSM (Phase-Shift Mask)
[X] (横寸法)
[Z] (高さ(深さ)寸法)

図6 半導体製造プロセスの変更とWA型AFMによる解決策
従来の検査方法では、手法そのものがデバイス表面に損傷を与えたり、精度向上を図るために検査時間を要するようになっていたことから、AFMの機能が問題解決に用いられている。

この工程では、化学的・機械的なウェーハ表面研磨や、露光工程のクリア、配線パターン形成などが行われる。このため、ステップでの1ショット当たりのエリアからハーフミクロン領域までの評価が必要である。

従来は、ワイドな段差を試料にきずが付く可能性があるスタイラス(探針)法で、狭いエリアは二次電子観察法で断面形状としてそれぞれとらえていたが、精度・測定時間ともに問題があった。この装置では1台ですべての機能を果たすので、新しい計測手段として注目されている。

CMP用途に引き続き、コンタクト法では難しい高段差サンプルを測定する必要から、ステップイン法を開発した。これにより、現在では、Si上のエッチング形状観察にとどまらず、フォトレジストから超解像用マスクの観察まで適用範囲が広がってきている。

4 主な特徴と概略仕様

この装置の主な特徴は以下のとおりである。概略仕様を表1に示す。

- (1) 25.6 mm[□]のワイドデータの取得が1度の操作で可能
- (2) 拡大倍率が4ないし5倍から約100万倍で、オングストローム単位の分解能
- (3) 平行平板式X-Yスキャナの採用により、従来必要であった補正操作が不要
- (4) 300 mm径までの試料の全域観察が可能
- (5) 除振機能と高剛性機構により、クリーンルームのような過酷な環境に適合

表1 WA型AFMの概略仕様

測定モードには、広い範囲の測定が可能なコンタクト法と、標準観察範囲で特徴を発揮するステップイン法がある。

測定モード	コンタクト法 ステップイン法		
測定エリア	X・Y 方向	コンタクト法	ワイド 25 μm [□] ～25.6 mm [□]
		ステップイン法	ファイン 100 nm [□] ～10 μm [□]
	Z方向		6 μm
測定点数	映像モード		XとY, 最大512点
	ロングプロファイル (オプション)		X=最大250,000点(0.1 μm間隔) Y=1
最高分解能	X, Y		0.2 nm
	Z	ファイン	0.1 nm
		ワイド ステップイン法	1.0 nm
操作性	マニュアルモード 自動測定モード		
自動搬送系	試料径…200・300(mm) 試料…LSIウェーハ、石英ガラス オープンカセット、SMIF、FOUP		
通信ソフトウェア	GEM300ほか		

注：略語説明 SMIF (Standard Mechanical Interface)
FOUP (Front Open Unified Pod)

5 おわりに

ここでは、半導体プロセス評価用インラインAFMについて述べた。

日立グループが開発したWA型AFMは、上述した課題を解決することで、自動測定器として、CD (Critical Dimension：微小寸法) 測定への可能性を見いだしたことになる。探針の形状把握は、今後の用途開発に不可欠なものである。

この装置では、従来の課題を克服したことにより、日立グループの半導体統合評価システムを強化することになった。今後もこれをさらに発展させ、EES (Equipment Engineering System) の機能を付加することにより、さまざまなニーズに適合した、優れた装置として適応させていく考えである。

参考文献

- 1) 森本，外：Step-In Mode AFMの開発，第48回春期応用物理学会予稿集，No.2，p.842 (2001.3)
- 2) 村山，外：CMP評価用ワイドエリアAFM，第46回春期応用物理学会予稿集，p.906 (1999.3)
- 3) 松崎，外：半導体製造QC工程へのAFMの応用，第62回秋期応用物理学会予稿集，No.2，p.663 (2001.9)

執筆者紹介



小藪 拓和
1975年日立製作株式会社入社，株式会社日立ハイテクノロジーズ デバイス製造装置事業統括本部 第一事業企画本部 所属
現在，半導体製造装置関連のマーケティングに従事
E-mail：koyabu-hirokazu @ nst. hitachi-hitec. com



村山 健
1980年日立建機株式会社入社，日立建機ファインテック株式会社 設計部 所属
現在，AFMの開発に従事
E-mail：murayama80 @ hitachi-kenki. co. jp



見坊 行雄
1975年日立製作所入社，日立建機ファインテック株式会社 設計部 所属
現在，半導体検査装置関連を中心とした開発に従事
精密工学会会員
E-mail：kembo00 @ hitachi-kenki. co. jp



保坂 純男
1971年日立製作所入社，2001年3月から群馬大学 工学部 教授
現在，走査形プローブ顕微鏡の研究・開発に従事
応用物理学会会員
E-mail：hosaka @ el. gunma-u. ac. jp