U.D.C. 621.3.049.774′14.002.56:621.385.833.28

電子ビームを用いた半導体プロセス評価装置

Evaluation Equipment for Semiconductor Process Using Electron Beam

古屋寿宏* Toshihiro Furuya
大高　正* Tadashi Ôtaka
引田周平* Shûhei Hikita
山田満彦** Mitsuhiko Yamada

ULSIの微細化に伴い，走査電子顕微鏡によるICパターンの形状観察や線幅測長などの管理は必須(す)となっている。日立製作所は0.5 μmプロセスに対応した6インチウェーハおよび8インチウェーハ用の走査電子顕微鏡の測長専用装置S-6000シリーズ，ならびに外観寸法評価装置S-7000シリーズを開発した。これらの機種は，電界放射電子銃を用いて低加速電圧(1 kV)で8 nm(S-6100形・S-6180形・S-6600形)および15 nm(S-7000形・S-7080形)の二次電子分解能を持ち，レジストパターンおよびエッチングパターンのインラインでの評価に適している。さらに，ICプロセスのFA・CIM(Computer Integrated Manufacturing)化に対応し，これらの装置のシステム構成例を示した。

1　はじめに

半導体プロセスで0.8 μmプロセスは量産段階に至り，現在0.5 μmプロセスの試作が実施されている。パターン加工精度(例)は0.15 μmから0.1 μmへと厳しくなり，パターン検査装置への要求精度も厳しくなっている。さらにサブミクロンのプロセスでは，コンタクトホールやスルーホールなどの加工パターンが高アスペクト比を持つようになり，ウェーハを水平状態で形状観察および測長を行う方法に加えて，三次元的な視点から形状を評価することが重要となった。

日立製作所では昭和60年に微小線幅測定を目的として，S-6000形電子ビーム測長装置(以下，S-6000形と略す。)[1),2)]を，外観検査用としてS-806形[3)]を，さらにS-7000形[4)]を製品化した。

各社で現在開発中の0.5 μmプロセスでは，量産段階での生産チップ数量の確保のために，ウェーハの大口径化(8インチ化)が進展中である。日立製作所では，8インチ対応の測長専用装置としてS-6180形を，外観寸法評価装置としてS-7080形を開発した。

さらに，0.5 μmプロセスではクリーン化・省力化などの目的のために，カセット自動搬送および通信機能(各種データなどのアップロードおよびダウンロード)が広く導入される傾向にあり，パターン検査装置でも各種システム化への対応の開発を実施中である。

半導体プロセス技術とパターン形状検査技術の推移を**図1**に示す。本稿では，電子ビームを用いたICウェーハのプロセスでの検査について述べる。

2　サブミクロン化と走査電子顕微鏡の低加速電圧・高精度化

2.1　低加速電圧観察の必要性

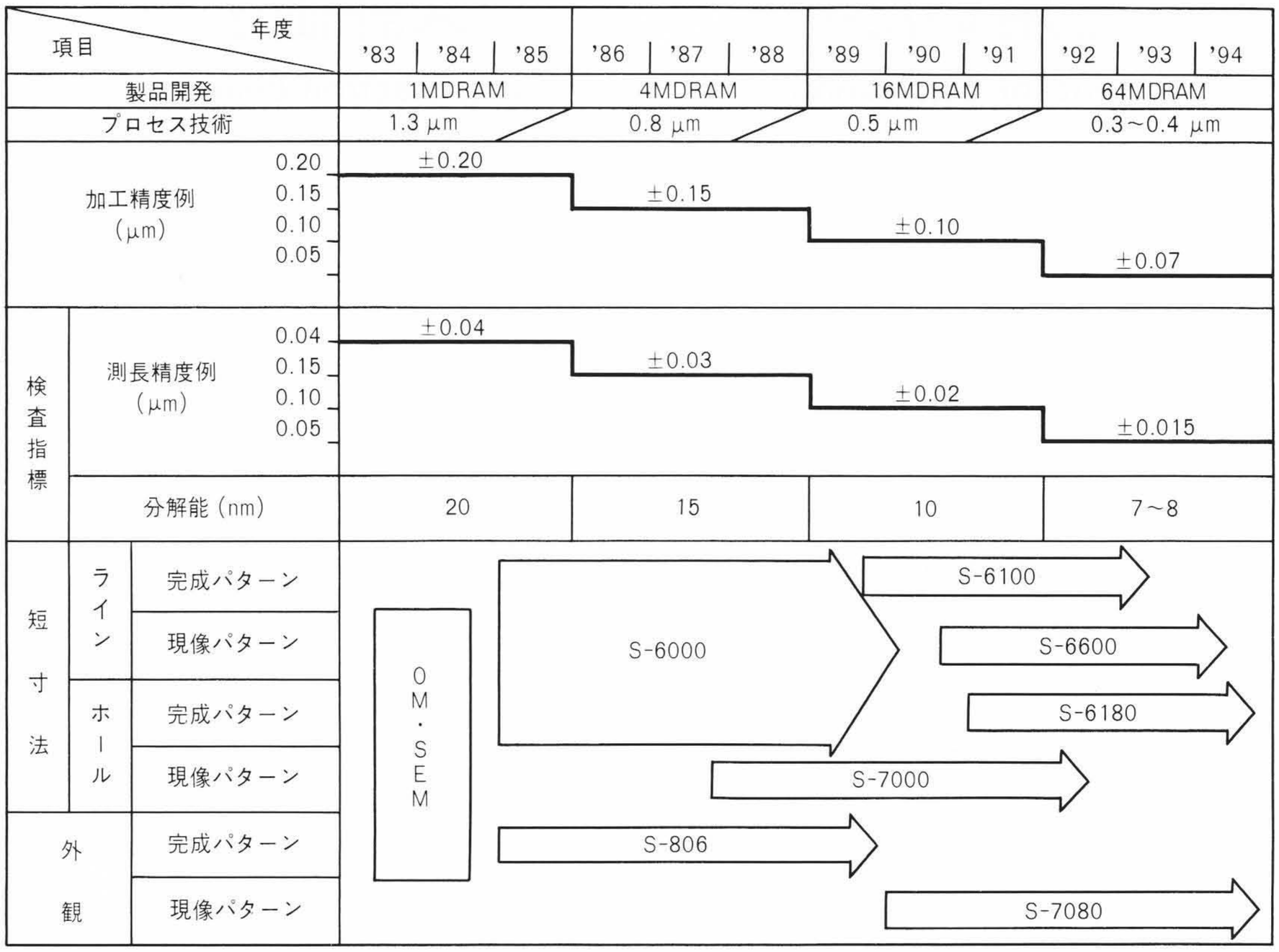
走査電子顕微鏡による試料観察・測定では，電子ビームを試料に照射したときに試料から発生する記号(二次電子)の強度の差(コントラスト)を用いて，画像の形成が行われる。コントラストは試料の表面形状，材質の差などによって決定される。

インプロセスのウェーハ表面の観察・測定では，パターンに対する破壊を避けるために，ウェーハの表面への導電コートができない。導電コートをしない試料に電子ビームを照射した場合には，帯電を起こしやすく良好なコントラストを持つ画像が得にくくなり，画像と試料の形状との対応がつかなくなりやすい。そこで，電子ビームは低加速電圧(約1 kV)程度とし，帯電を低減させる必要がある。

2.2　高分解能電子光学系

一般に電子ビームの加速電圧を低く選ぶと像の分解能が低下する。これは電子ビームの持っているエネルギーのばらつきΔVによって，試料表面での収束電子ビームの到達位置が広がるためであり，特に加速電圧を1 kV程度に下げるとこの影響が無視できなくなる。このΔVを低減する手段として，FEB(Field Emission Electron Beam：電界放射電子ビーム)を用

* 日立製作所 計測器事業部　** 日立計測エンジニアリング株式会社 テクノリサーチセンタ



注：略語説明 DRAM (Dynamic RAM), OM (Optical Microscope), SEM〔Scanning Electron Microscope (走査電子顕微鏡)〕

図1 プロセス技術とパターン形状検査技術の推移 パターン幅の微細化に伴い，光学顕微鏡に代わって電子ビームによるプロセス評価装置が不可欠となっている。

表1 各種電子源の比較 FE形電子源は，エネルギー幅，輝度，電子源径の点で優れており，また長寿命である。

項目＼電子源	FE形 (電界放射形)	熱電子 (LaB_6)	熱電子 (タングステン)
輝度 (A/cm²・sr)	10^9	10^7	10^6
電子源径 (nm)	<10	10^4	>10^4
電子のエネルギー幅 (eV)	0.2	1～2	1～2
サービスライフ (h)	>4,000	1,000	40
真空度 (Pa)	10^{-7}	10^{-5}	10^{-3}

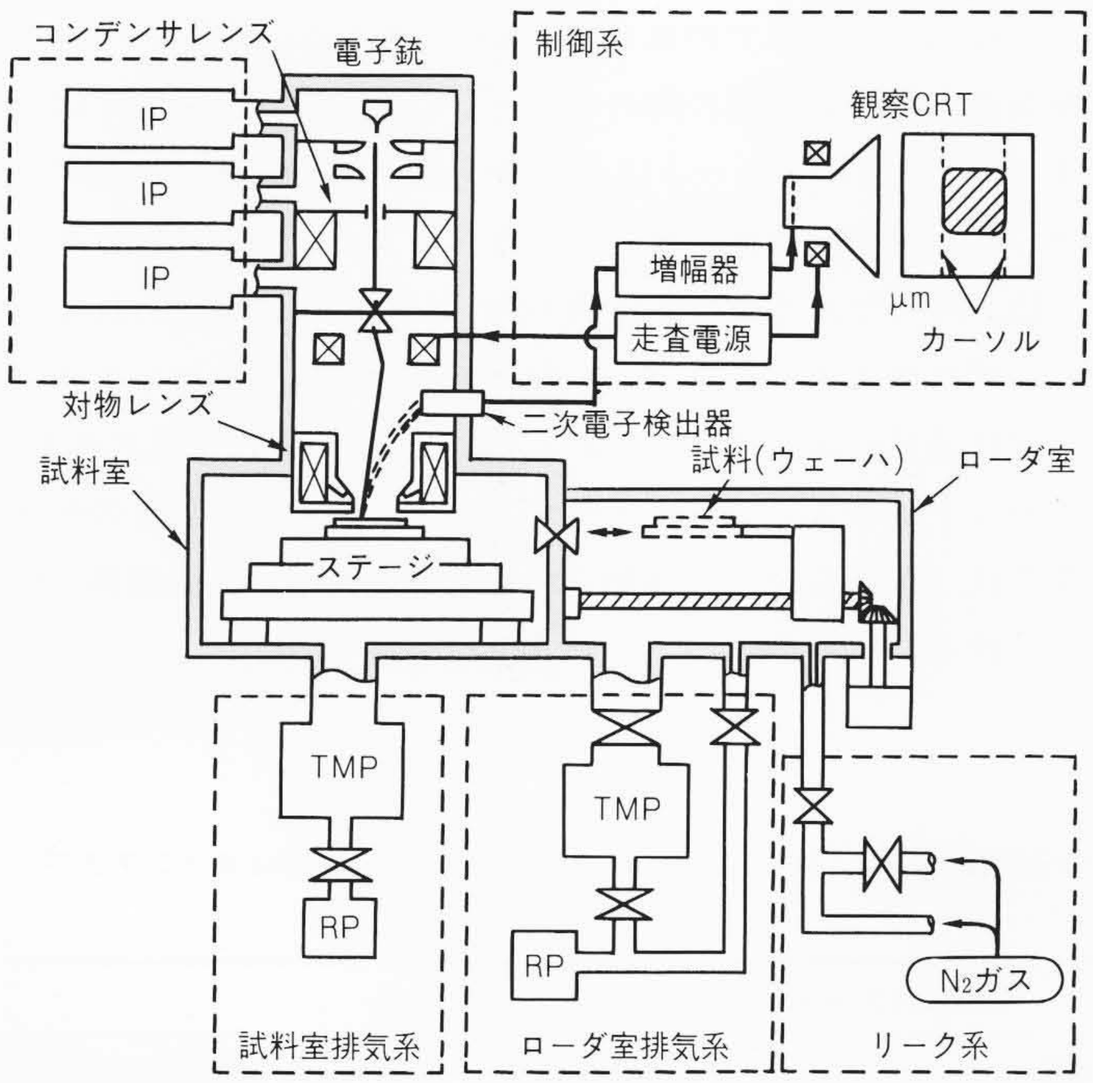
いると，エネルギーのそろった電子ビームが得られ，高い分解能を得ることができる。各種電子源の比較を**表1**に示す。さらにFEBでは，電子源の明るさは熱電子ビームに比較して100～1,000倍と高く，テレビジョンスキャンのような高速度走査でもSN比の良い高分解能像が得られる。

従来の0.8 μmパターンに比較し，0.5 μmパターンさらに0.3 μmパターンでは，パターン形状の良否判定を正確に実施するために，10 nm以上の高い分解能が必要である。そのために前述のFEBの採用に加えて，新たに低収差の対物レンズを開発した。S-6100形の外観を**図2**に示す[5]。また，S-6100形の概略構成を**図3**に示す。同図で電子銃から放射された電子ビームは，コンデンサレンズおよび対物レンズによって試料上に収束され，微小な電子ビーム径を得ることができる。このとき小さな電子ビーム径を得るためには，対物レンズの収差を小さくすることが必要となる。従来，この収差の低減の目的で，例えば同図に示すように対物レンズの下磁極に試料を接近させ，対物レンズの焦点距離をできるだけ短くし，色収差係数・球面収差係数を小さくして高分解能を得ている(例：S-6000形では15 nm/1 kV)。二次電子検出器は対物レンズの上方に配置され，二次電子は対物レンズの磁極を通して上方に検出されるTTL(Through the Lens)方式によって検出される。

従来方式(S-6000形)と新方式(S-6100形など)の対物レンズの比較を**図4**に示す。新方式では，対物レンズで発生される磁場分布を試料側に近づけるように，磁極間隙(げき)を形成することによって焦点距離を小さくすると同時に，色収差係数および球面収差係数を小さくし，高分解能化が図られている。二次電子検出は従来方式と同様，TTL方式が用いられている。

従来方式と新方式のレンズ性能の比較を**表2**に示す。新方式では従来比で色収差係数が約$\frac{1}{3}$，球面収差係数が約$\frac{1}{6}$に向上され，低加速電圧(1 kV)の条件で高い分解能(8 nm，テレ

図2　S-6100形の外観　　ウェーハを搭載して電子ビームを照射する本体部(左側)と，測長の操作・像表示などを行う制御部(右側)から構成されている。



注：略語説明
IP(イオンポンプ)，TMP(ターボ分子ポンプ)，RP(ロータリポンプ)

図3　S-6100形の構成　　ウェーハはローダ室でTMPで排気され，試料室中のステージ(X，Y移動)に搭載される。ウェーハから発生した二次電子信号はCRT上に像表示されるとともにICパターンの計測が行われる。

ビジョンスキャン・静止画像上)を達成している[5]。

2.3　測定例

サブミクロンパターン用の高解像度ホトレジストパターン

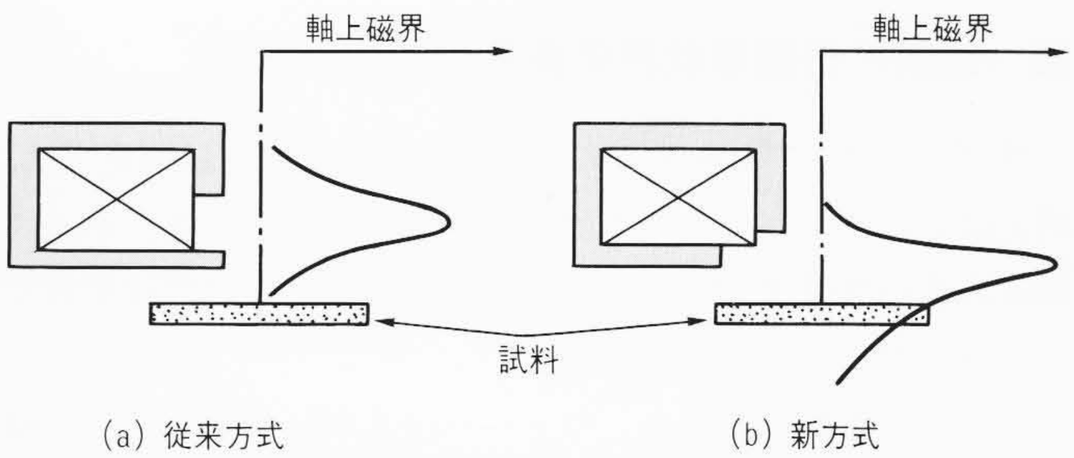


図4　対物レンズの軸上磁界の比較　　レンズの軸上磁界を試料の側に近づけることにより，レンズの収差係数を小さくし，性能向上が図れる。

表2　レンズ性能の比較　　色収差係数および球面収差係数は大幅に向上している。この結果，新方式の対物レンズで8 nmの分解能を実現している。

項目＼装置	従来方式 (S-6000形)	新方式 (S-6100形)
色収差係数比率	1	$\frac{1}{3}$
球面収差係数比率	1	$\frac{1}{6}$

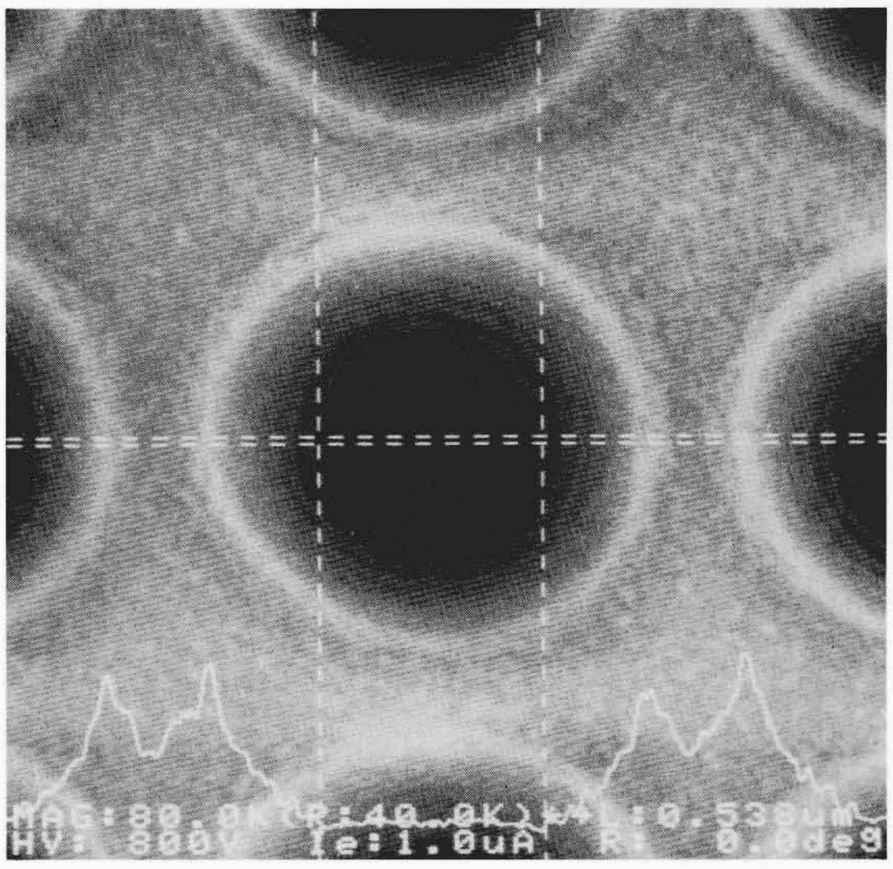


図5　SiO_2上のレジストパターン　　サブミクロン用高解像度ホトレジストのホールパターンを示す(下穴径ϕ0.6 μm)。

のホールの測定例を**図5**(下地SiO_2)に示す。ホール部分の側壁・底部などが鮮明に観察できる。

サブミクロン用高解像度レジストパターンのLine Spaceの測定例を**図6**に示す。レジストのエッジや表面の微細構造などが鮮明に観察できる。

3 測長・外観形状評価装置のシリーズ化

サブミクロンプロセスでの形状の評価および寸法測定では，例えばレジストパターンではスロープ形状，定在波，ホール形状あるいは残渣(さ)など，エッチングパターンでは形状など各種の要素が対象となる。

これらの観察・測長は，ウェーハは水平状態だけでなく傾斜した状態で実施される必要がある。日立製作所はこれらの多様なニーズに対応するために，S-6000シリーズとS-7000シリーズを開発した。S-6000シリーズとS-7000シリーズの各機種の仕様の抜粋を**表3**，**4**に示す。測長用のS-6000シリーズでS-6100形は6インチウェーハ対応，S-6180形は8インチウェーハ対応であり，ウェーハは水平に保持される。一方，ウェーハを傾斜して観察可能なS-7000シリーズで，S-7000形は6インチウェーハ対応，S-7080形は8インチウェーハ対応である。

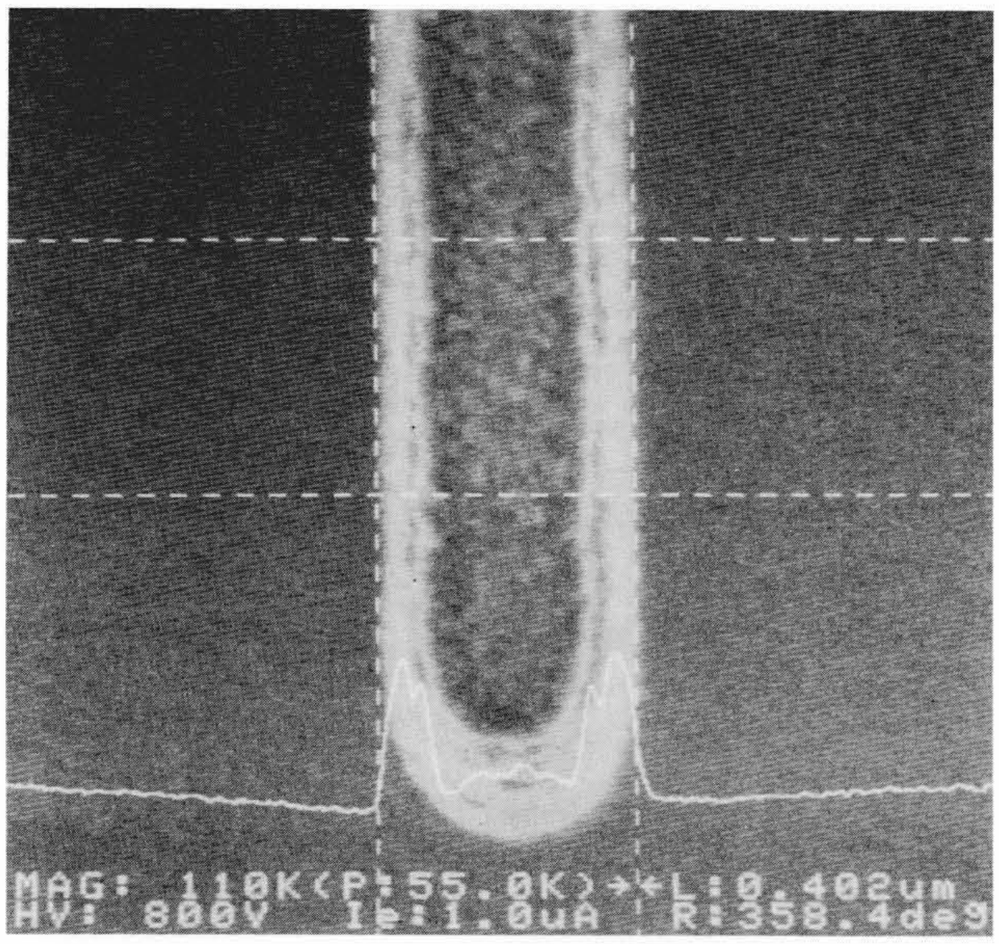


図6 Si上のレジストパターン　高解像度i線用レジストの0.4μmラインを示す。

また，S-6600形は，6インチウェーハ対応で2個のカセットを搭載し，1個のカセット搭載方式のS-6100形に比較して高いスループットを実現している[6]。

4 システム化・自動化の展開

半導体量産プロセスのFA化・CIM化の進歩とともに，電子ビームを用いた測長・外観形状検査装置でも，操作の自動化の拡大やカセットの自動搬送などが必要とされるようになった。これらの自動化は視点を代えると，測長・外観検査装置と外部装置とのシステム化，および測長・外観検査装置単独で実施する自動化に大別することができる。

4.1 FA・CIMへの対応

ウェーハプロセスでのFA・CIM化されたシステムの要素として代表的なものに，カセット搬送の自動化〔AGV(Automatic Ground Viecle)またはコンベヤ〕と，情報の管理・指令(アップロード・ダウンロード)があげられる。

工程内(ベイ内)でのカセット搬送システム(AGVなど)と，測長走査電子顕微鏡の間のカセットの授受方式例を**図7**に示す。同図(a)ではカセットはAGVから測長走査電子顕微鏡のカセットローダに直接に載せられる。一方，同図(b)ではカセットは，いったんカセット待機用台(バッファ)に載せられる。

いずれの方式でもカセットの有無，存在場所についてのデータは通信回線を経由してホストコンピュータに伝えられる。カセットはホストコンピュータによって指定されたものが選択され，AGVによって運搬されて測長走査電子顕微鏡側に供給される。

表3 S-6000シリーズ基本仕様　S-6100形・S-6600形・S-6180形は8nmの分解能を持つ。S-6180形は8インチ対応，S-6600形は6インチダブルカセット対応となっている。

項目 ＼ 形式		FEB測長装置			
		S-6000形	S-6100形	S-6600形	S-6180形
ウェーハサイズ		6，5，4インチ(3インチ径はオプション)			8，6インチ
性能	倍率	100～100,000倍	100～150,000倍		
	測長方式	カーソル方式(縦，横方向)，ラインプロファイル方式(自動測長)			
	測長範囲	0.1～200μm	0.1～100μm		
	分解能	15nm(1kV，CRT上)	8nm(1kV，CRT上)		
	測長精度	±1%または0.02μm		±1%または0.015μm	
電子光学系	電子銃	コールドFE電子銃			
	加速電圧	0.7～2kV (100Vステップ)	0.7～1.3kV (10Vステップ)		
ステージ範囲		X，Y：150mm			X，Y：200mm
オートローダ		C to Cタイプ，ランダムアクセス マニュアル装着方式も用意		2カセット，ランダムアクセス ロードロック	C to Cタイプ ランダムアクセス
スループット		8枚/h		15枚/h	8枚/h

測長走査電子顕微鏡で測長が終了すると，カセットは走査電子顕微鏡側からホストコンピュータへの終了信号が発せられ，AGVは測長終了済みのカセットを搬送し，次工程に移す。**図7**(b)は(a)に比較してシステム構成が複雑であるが，検査用カセットを待機させておくことにより，工程全体からみたときの流れをスムーズに設定できるという長所がある。

4.2　データ通信システム

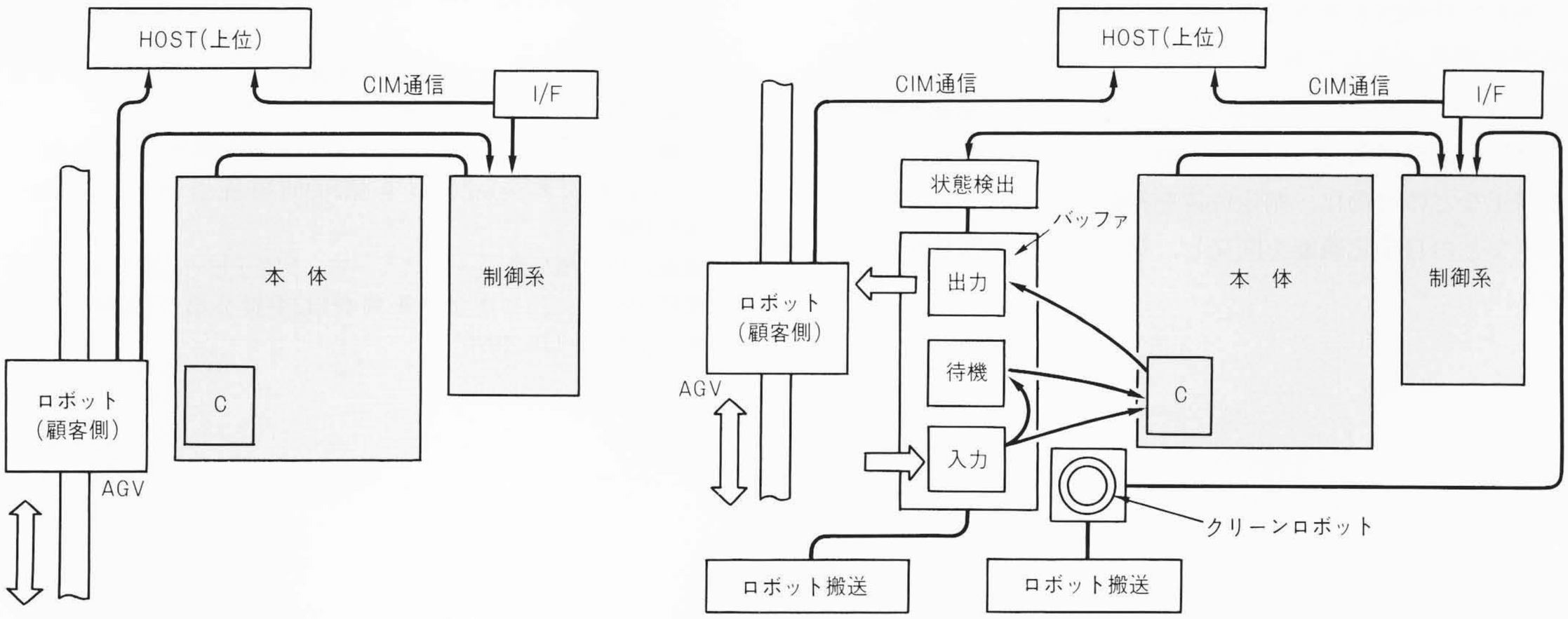
測長走査電子顕微鏡でのデータ通信システムの目的は，大別してデータのアップロード(測長走査電子顕微鏡側からホストコンピュータシステムへのデータの転送)を行い，ホストコンピュータで測長データのファイル，統計処理，レポート作製などを行う機能と，ダウンロード(ホストコンピュータシステムから測長走査電子顕微鏡側へのデータの転送)を行い，測長条件や測長ロット番号などを指定することによって，測長走査電子顕微鏡の運転を行う機能の二つが考えられる。測長走査電子顕微鏡での通信プロトコルは，RS-232Cを用いたSECS-1およびSECS〔SEMI(Semiconductor Equipment and Materials Institute, Incorporated) Equipment Communications Standard〕-2に準拠して決められている方式を用いており，IC工場などのデータ処理システムとの接続は容易となっている。

表4　S-7000シリーズ基本仕様　S-7000形は6インチ対応，S-7080形は8インチ対応となっている。

項目＼形式		ULSI外観寸法評価装置	
		S-7000形	S-7080形
ウェーハサイズ		6，5，4インチ	8，6インチ
性能	倍率	100～100,000倍	
	測長方式	カーソル方式(縦，横方向)，ラインプロファイル方式(自動測長)	
	測長範囲	0.1～100 μm	
	分解能	15 nm(1 kV，CRT上)	
	測長精度	±1%または0.02 μm	
電子光学系	電子銃	コールドFE電子銃	
	加速電圧	0.7～3 kV(100 Vステップ)	
ステージ範囲		X，Y：150 mm	X，Y：200 mm
		Z：5～15 mm　R：0～360°　T：0～60°(5軸フルCPU制御)	
オートローダ		C to Cタイプ，ランダムアクセス	
スループット		5枚/h	

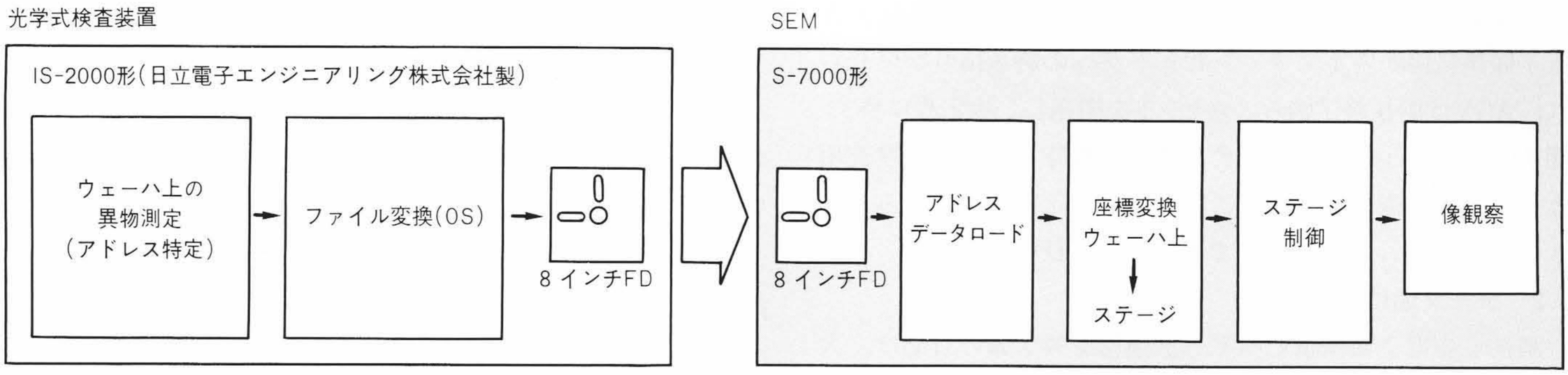
4.3　ウェーハ上異物・欠陥検査の現状とシステム化への展開

パターンの微細化に伴い，プロセス中にウェーハなどに付着する異物および形成されたパターンでの欠陥などの許容レベル(許容寸法・許容数)はいっそう厳しくなってきている。従来，ウェーハ上の異物・欠陥測定のために光学式測定方式が用いられていたが，光(レーザ)プローブ径が大きいなどの理由から，サブミクロン領域(特に約0.5 μm以下)の異物などの微細形状の観察は不可能であり，プロセスでの異物などの低減の実効的な対策が困難になっている。この隘(あい)路を打開するため，走査電子顕微鏡による異物・欠陥などの観察が重要となってきた。走査電子顕微鏡による観察では，異物・欠陥の原状(形状・材質・位置など)を保ったままで実施されることが必要である。そのためウェーハの表面には導電コーティングをせず，低加速電圧条件で観察を行う必要がある。



注：略語説明
CIM (Computer Integrated Manufacturing)，AGV (Automatic Ground Viecle)，I/F (インタフェース)，C (ウェーハカセット用ローダ)

図7　カセット自動搬送システム　ダイレクト方式では，ウェーハカセットはAGVからSEM本体側のローダにセットされる。バッファ方式ではカセットはAGVとSEM本体の間のバッファにいったん設置され，工程の緩急調整の機能を持っている。



注 略語説明 FD(フロッピーディスク)

図8 ウェーハ上異物・欠陥検査システム ウェーハ全域がまず光学式検査装置によって検査され，走査電子顕微鏡によって，選択・指定された異物・欠陥が詳細に検査される。

この低加速電圧条件で高い分解能を得るためには，FEBを用いた走査電子顕微鏡が好適である。

さらに，異物などの走査電子顕微鏡観察で，広いウェーハ上から測定対象である数少ない微小異物などの像をCRT上の視野内に短時間に表示させることが重要である。ウェーハ上異物・欠陥検査システムの例を**図8**に示す。同図で，ウェーハはまず光学式測定装置により，広い視野が短時間で測定〔異物などの存在する位置(座標)，寸法および個数〕され，そのデータがFD(フロッピーディスク)または通信により，出力される。この出力データは走査電子顕微鏡に受信され，必要な座標変換などの処理を行った後，走査電子顕微鏡のステージの移動が行われる。S-6000シリーズとS-7000シリーズのステージ系は高い精度を持っており，異物などの検索にきわめて有用となっている。

4.4 測長装置の自動化

測長・外観検査装置では，従来，各種測定条件をあらかじめプログラム化しておき，測定を実施するCP(Catalogued Procedure)方式が用いられてきた。さらに，走査電子顕微鏡の画像の調整段階での明るさ，コントラスト，焦点，非点収差補正などの自動化，測定位置を指定するオートアドレッシングなどの自動化機能を開発し，測長装置への搭載を進めてゆく。

5 おわりに

ULSIのサブミクロン化では，研究，開発および量産の各段階で，走査電子顕微鏡による形状評価および測長は必須の測定手段となった。そしてユーザーの各種目的への対応のために，S-6000シリーズとS-7000シリーズを開発した。このシステムの導入により，ULSIの微細化の進歩にいっそうの加速が期待できると考える。

参考文献

1) 大高，外：半導体プロセス評価装置，日立評論，**68**，9，725～730(昭61-9)
2) 古屋，外：FEB測長装置S-6000，日本学術振興会132委員会第93回研究会資料，p.1～5(1985)
3) 渡部，外：プロセス評価の電子ビーム検査・測定技術，Semiconductor World，4巻，8号，プレスジャーナル，102～114(1985-8)
4) 大高，外：電子ビームを用いた半導体プロセス評価装置，日立評論，**71**，5，401～407(平1-5)
5) 大高，外：高分解能電子ビーム測長装置の開発(S-6100形)，日本学術振興会132委員会第109回研究会資料，p.159～163(1989)
6) 清水，外：高分解能・高スループット電子ビーム測長装置の開発(S-6600形)，日本学術振興会132委員会第113回研究会資料，p.167～170(1990)