

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

日立製作所は、ULSIの高密度化と高性能化に伴い、スルーホール工程などの深穴パターンや高アスペクト比を持つ各種パターンの3次元形状評価、微細寸法計測を細く収束した電子ビームで評価するプロセス評価装置S-7000形高精度外観寸法評価装置を開発した。電界放射形電子銃を用いて、低加速電圧(1kV)で15nmの二次電子像分解能、6インチウェーハを最大60度まで傾斜可能な高性能5軸ステージを持ち、寸法測長精度0.02 μm (3 σ)でプロセス評価が可能である。また、測長専用機S-6000形電子ビーム測長装置、デバイスを割って、より厳密にエッチングパターンなどを評価する場合に有効な超高分解能S-900形走査電子顕微鏡を紹介し、プロセス評価の応用例について述べる。

大高 正* *Tadashi Ôtaka*
 森 弘義* *Hiroyoshi Mori*
 古屋寿宏* *Toshihiro Furuya*
 山田満彦* *Mitsuhiko Yamada*
 田辺義和** *Yoshikazu Tanabe*

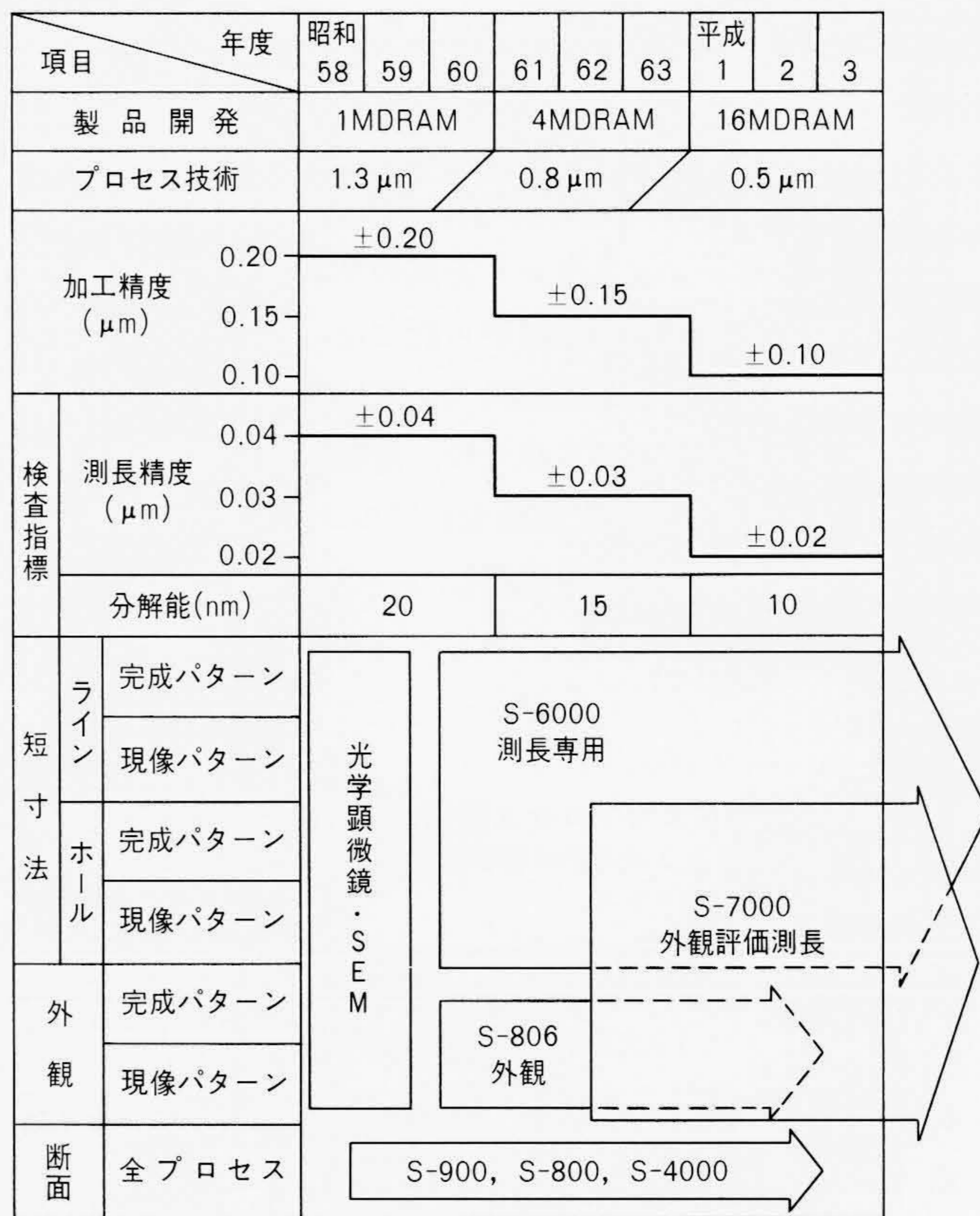
1 緒 言

半導体プロセスは、サブミクロン加工時代に入り、そのパターン幅は0.8 μm から0.5 μm へと微細化している。加工精度に関しても0.15 μm から0.1 μm へと厳しくなり、従来の光学顕微鏡による評価法では不十分となり、SEM (Scanning Electron Microscope: 走査電子顕微鏡)が不可欠となった。こうした背景から昭和60年に微小線幅測定装置としてS-6000形電子ビーム測長装置(以下、S-6000形と略す。)^{1)~3)}を、外観検査用としてS-806形⁴⁾を開発した。サブミクロンプロセスの技術開発で、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、平面的なパターン寸法計測だけでなく、3次元構造のインライン外観検査のニーズが4MビットDRAM、16MビットDRAMへと微細化するパターン管理の上で重要性が増してきた。特に外観検査では、加工パターンを任意の方向に傾斜して観察することによって、焦点深度が非常に大きいSEMの基本的な特徴を生かして、加工形状、エッチング残渣(さ)、コンタクトホールなどを観察することが必要であり、高精度に所定のパターンを高いスループットで評価しなければならない。こうしたニーズに対応して高精度寸法評価と外観評価を兼ね備えたS-7000形高精度外観寸法評価装置(以下、S-7000形と略す。)⁵⁾を開発した。

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。

2 電子ビームによるプロセス評価と装置の対応

半導体プロセスで使用される材料は、シリコン基板の上に



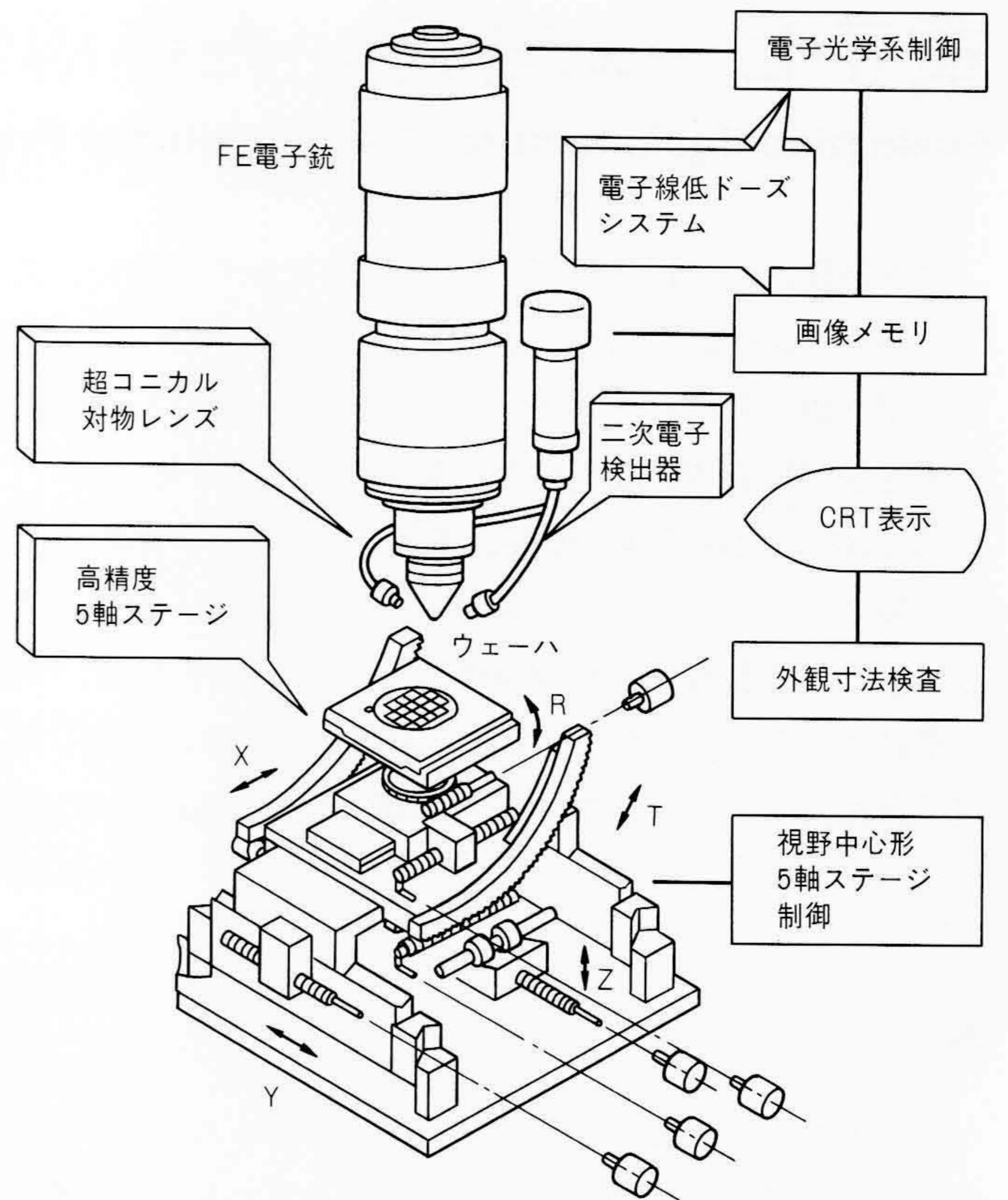
注:略語説明 SEM (Scanning Electron Microscope)

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る。寸法測長、外観評価、断面による形状評価など、目的に合った各種装置がある。

* 日立製作所那珂工場

** 日立製作所デバイス開発センター

レジスト，酸化膜，窒化膜などの絶縁材料と，ポリシリコン，アルミニウム，タングステンシリサイドなどの導電材料である。こうした材料のSEM観察では，電子ビームによる試料の帯電を防止し，良好な二次電子像が得られるように電子ビームの加速電圧を選択し，観察条件の最適化を図っている。電子ビームによるプロセス評価と装置の対応について，表1に示す。加工パターンの良否判定を目的とする形状観察では，低加速電圧(1 kV付近)で高い分解能が得られる高輝度電界放射形電子銃を用い，また，パターンの形状を任意の方向から観察できるようにするため，試料ステージは水平面内移動のほかに，高角度傾斜機能，回転機能が必要である。従来のこの種のステージでは，傾斜角度，回転角度を変化させたとき，目的とする視野が移動してしまうため同一視野を探すことに多くの時間を費やしていた。そこでS-7000形では5軸(X移動，Y移動，Z移動，回転，傾斜)CPU制御ステージとし，X，Y軸には光学格子から成るリニアエンコーダを，ほかの軸にはロータリエンコーダを用いて絶対位置を検出，制御して位置決め精度を高くし，所定の視野が容易に得られるようにした。視野中心ステージ回転としては，視野中心の座標を変換して回転後の座標を算出し，ステージの回転とともにX，Y軸を移動させることによって視野を維持するという方式を採用している。また，試料の傾斜についても同様に視野中心傾斜とし，テレビジョンスキャン方式のリアルタイム画像により，きわめて迅速な外観検査が可能になった。パターンの寸法管理を目的とした測長機能については，対物レンズを含めた電子光学系の精密コントロール，高速測長を実施するためのオートフォーカス機能と自動測長アルゴリズムなどがある。以下，プロセス評価装置の概要について述べる。



項目	仕様
二次電子像分解能	15 nm (加速電圧：1 kV)
加速電圧	0.7~3.0 kV (100 Vステップ)
倍率	観察CRT上 X100~X100,000倍
測長再現精度	0.02 μm (3σ)
ウェーハサイズ	6インチ径(最大)
ウェーハ搬送	カセット ツウ カセット，ランダムアクセス形

図2 S-7000形の構成と主な仕様 試料をあらゆる方向から観察できるようにするため，試料ステージは高精度5軸ステージとしている。

表1 電子ビームによるプロセス評価と装置の対応 形状観察については，高分解能な3次元形状観察機能，測長については高速・高精度な測長機能が必要とされる。

分類	目的	技術課題	装置の対応
形状観察	パターンの良否判定	3次元形状の高分解能観察	超コニカルレンズ (FE電子銃)
		3次元形状の多機能観察	視野中心形高精度5軸ステージ
		帯電低域	ミニマムドーズシステム
		静止画像表示	テレビジョンスキャン，画像メモリ
測長	寸法管理	低コンタミネーション	低発塵(じん)・クリーン排気系
		高精度測長	高精度電子光学系制御，ツインSE検出器
		高速測長	オートフォーカス，自動測長

注：略語説明 FE電子銃(Field Emission 電子銃)
SE(Secondary Electron：2次電子)

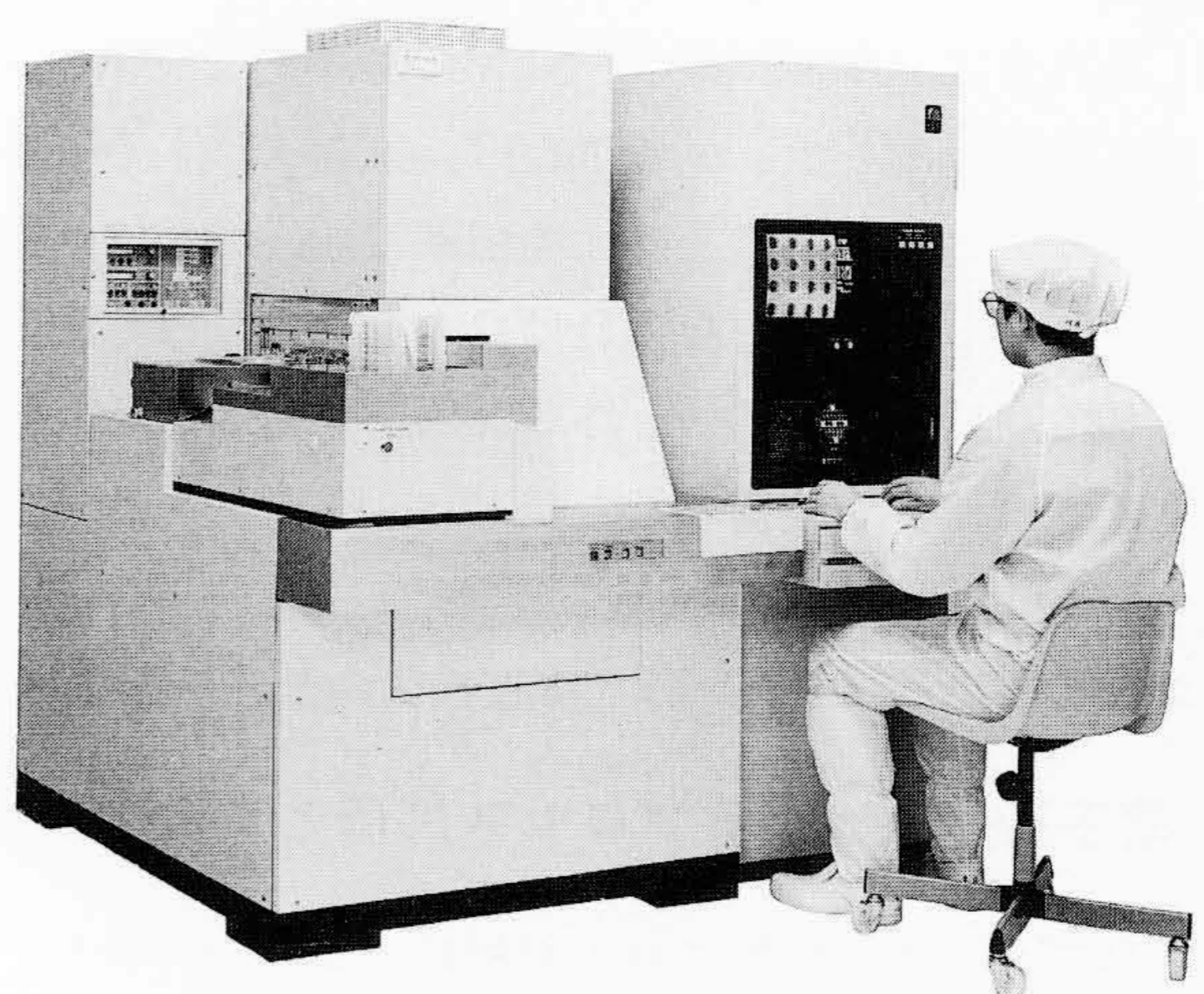


図3 S-7000形の外観 左側が電子光学系，試料ステージ，オートローダなどで構成される装置本体で，右側が制御系コンソールである。

3 S-7000形高精度外観寸法評価装置の構成と仕様

S-7000形の構成と主な仕様を図2に、その外観を図3に示す。

電界放射形電子銃で作られる高輝度電子ビームを試料上に細く収束させ走査する。試料から放出される二次電子を二次電子検出器によって検出しCRT上に像表示する。このCRT上の画像によって外観および寸法測定を行う。試料ステージは、試料をあらゆる方向からパノラマ的に観察できるように5軸ステージとし、高角度に傾斜したときでも高い像分解能を維持することができるように、対物レンズは先端が円すい状に小形化した超コニカル対物レンズとしている。

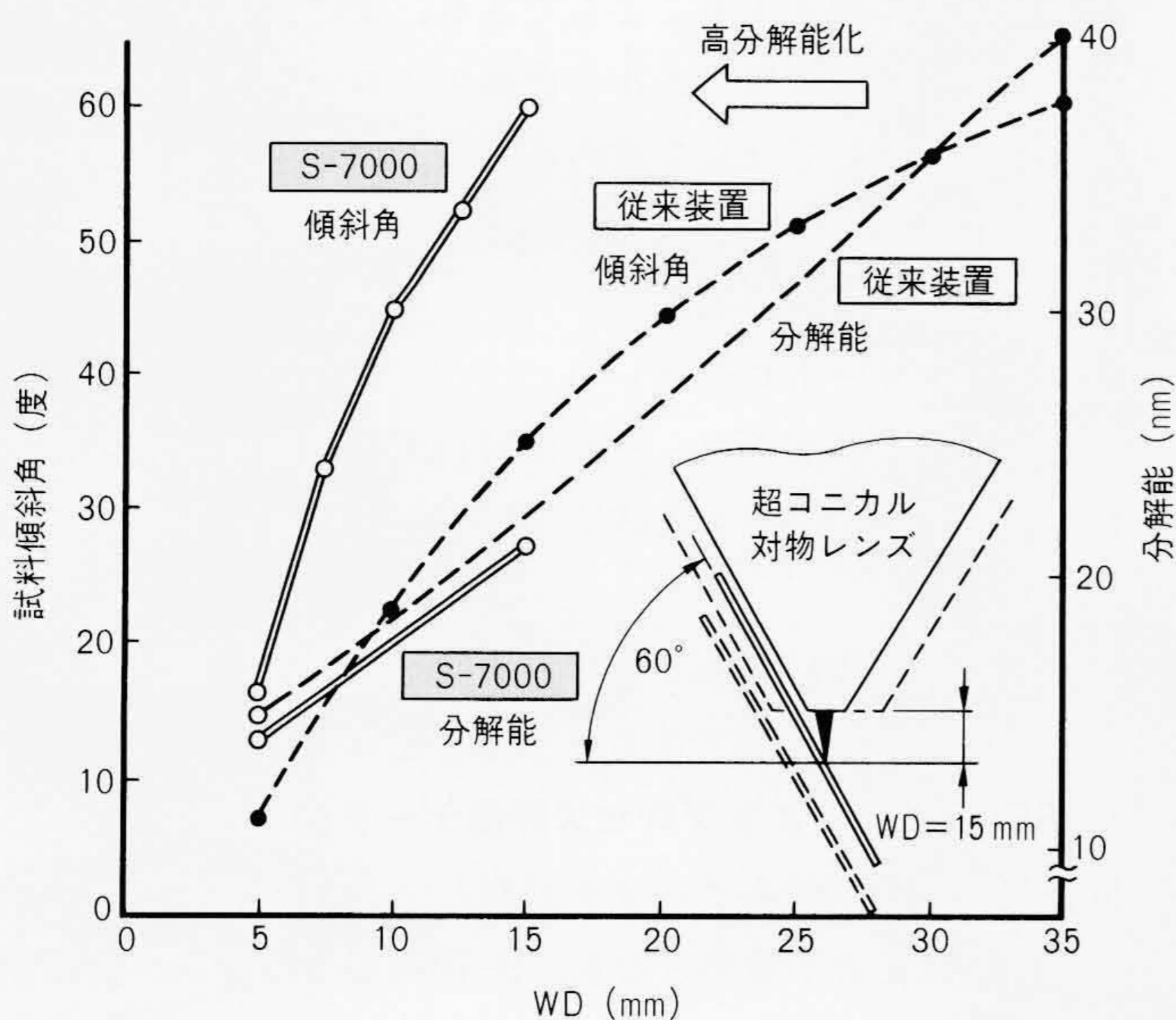
3.1 超コニカル対物レンズ

対物レンズは、試料を高角度に傾斜させた状態でも短いWD (Working Distance) で、レンズの球面、色収差係数の小さい領域で動作させるようにすることが分解能の点で有利であり、円すい状の小形レンズとした。

このレンズはWDが15 mmで最大傾斜角度60度が得られるように構成している。WDと試料傾斜角、分解能の関係を図4に示す。また、対物レンズヨークの材質は、パーマロイとして磁気的なヒステリシスを少なくし、対物レンズの焦点距離とレンズの励磁電流の直線性を向上させ、測長精度として、パターン幅に対して1%以下の再現性が得られるようにしている。

3.2 視野中心回転形高精度5軸ステージ

試料ステージは、載物した試料を電子ビーム下で所望の位



注：略語説明 WD (Working Distance)

図4 WDと試料傾斜角、分解能の関係(加速電圧：1 kV)

S-7000形では、高い傾斜角度でも高分解能が得られるように、先端を円すい状にした小形レンズを採用している。

置に移動する装置であり、X、Y移動、Z移動、傾斜、回転の5軸から成り、加工パターンをあらゆる方向から観察できるように構成している。試料を傾斜して、パターンの加工形状を任意の方向から観察しようとするとき、試料の回転が必要となる。しかも、観察している視野を逃がさないで実現することが必要である。そこで試料を回転させたとき、X、Yの移動によって座標補正量を演算して、座標補正をする方式とした。ステージローテーション時の座標補正を図5に示す。こうした座標補正に加えて、WDを替えたときに生ずる対物レンズ部での電子ビームの回転による像回転についても、各WDに対して像回転補正を実施し、きわめて迅速に所定の観察位置を逃がすことなく、あらゆる方向から観察できるようになった。

3.3 DUAL二次電子検出器の構成と効果

DUAL検出器の構成を図6(a)に示す。対物レンズの外側に2個設け、パターン測長を実施するときには両方の検出器を用いて二次電子検出によるラインプロファイル信号の対称性を確保した。外観検査のいわゆる凹凸像を主体とする場合には、2個のうち1個を切り換えて使用できるようにした。レジストパターンのおおのこの検出器による像と信号波形、双方の検出器を用いた場合の信号波形を同図(b)に示す。双方の検出器を用いた場合には、非常に対称性のよいラインプロファイルが得られ、精度よく測長することができる。

3.4 自動化機能

操作性を向上させるため、各種の自動化が図られている。

(1) 電子光学系の軸合わせメモリ機能

加速電圧変更などに伴う電子光学軸のずれを補正する。

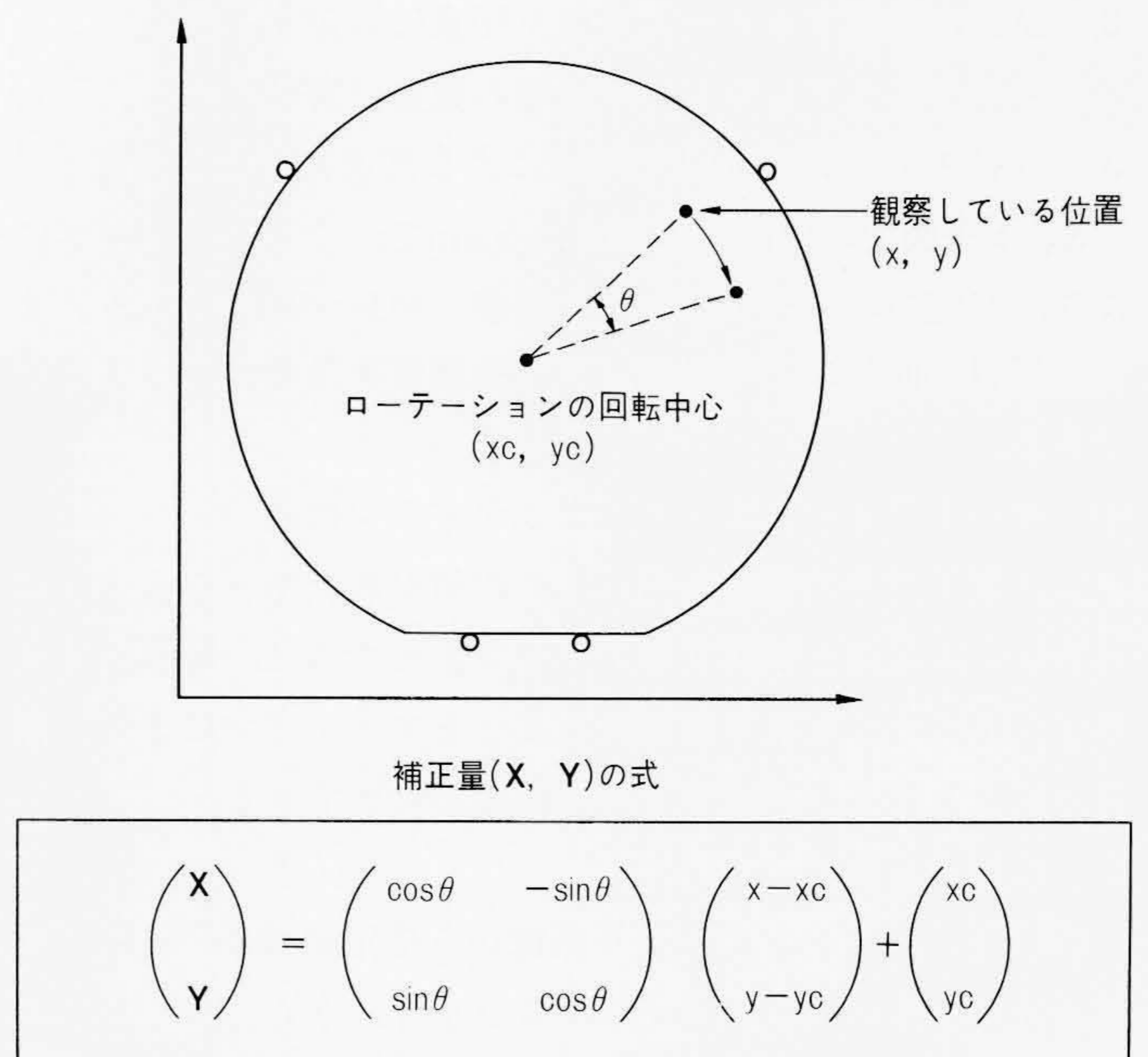
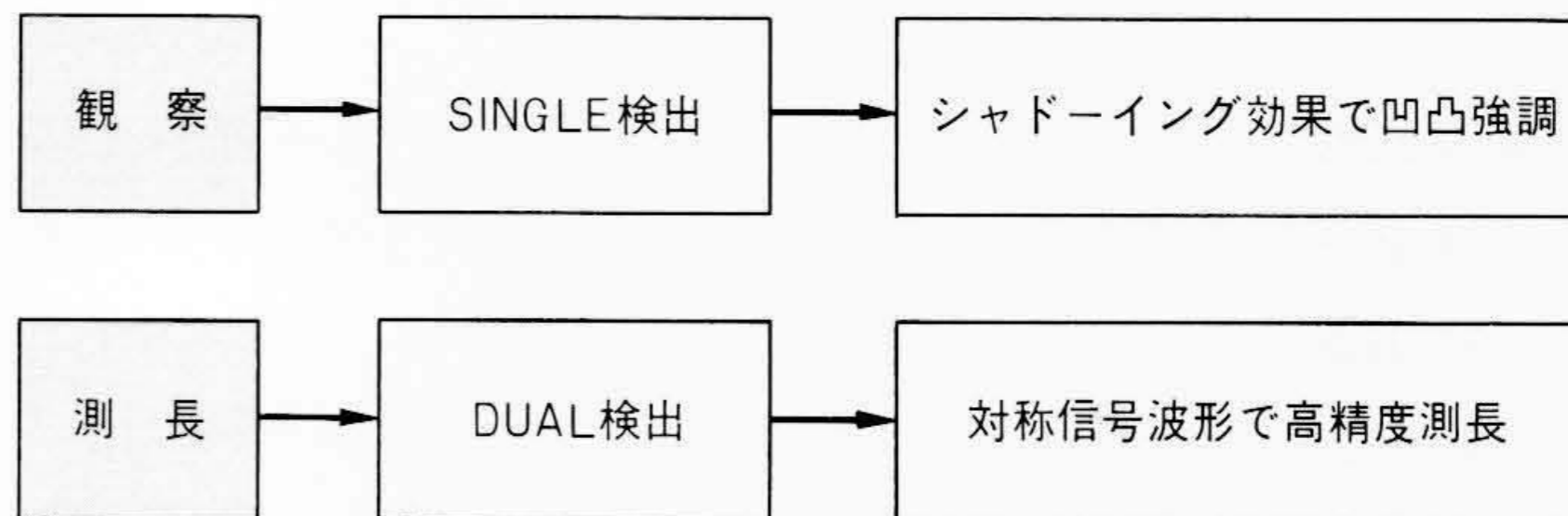
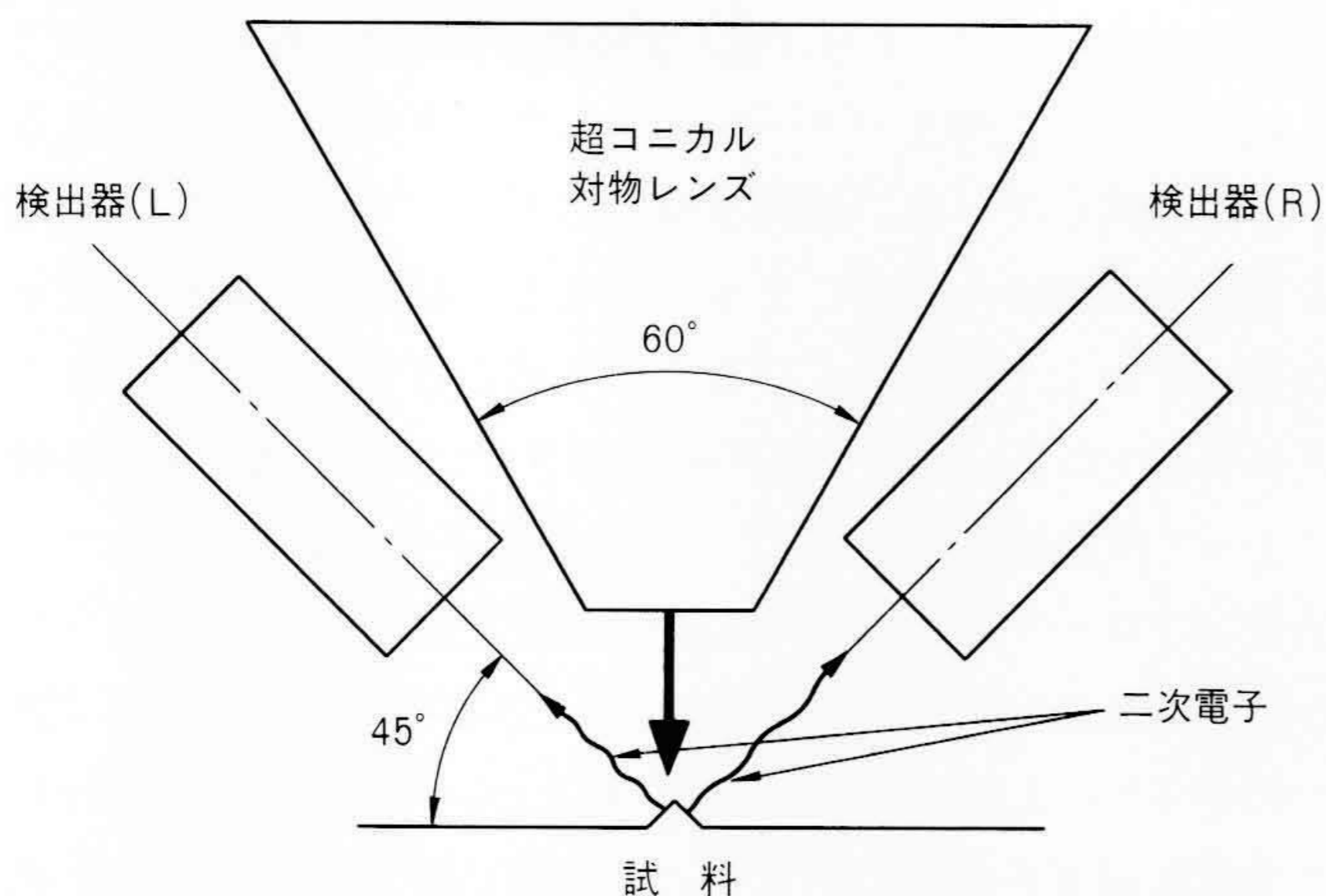
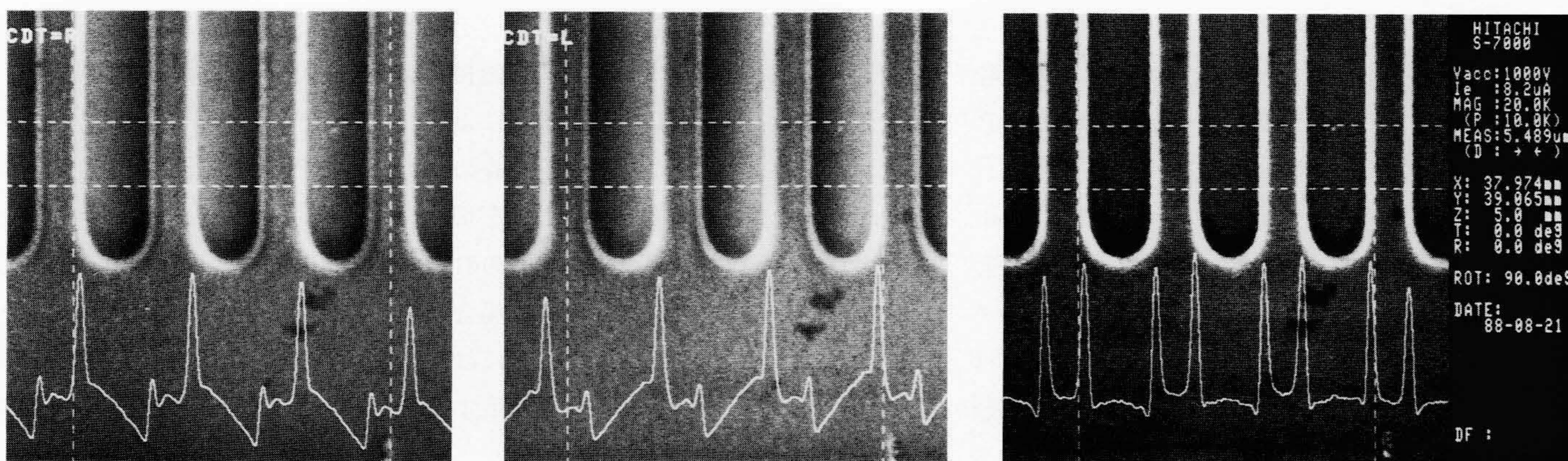


図5 ステージローテーション時の座標補正 試料ステージの回転によって生ずる視野ずれを、回転角θに応じてX、Y移動補正を行い視野を逃がさないように制御している。



(a) DUAL検出器の構成



検出器(L)

検出器(R)

DUAL検出(L+R)

(b) 各検出器による画像と信号波形(試料: SiO₂上のレジストパターン, 加速電圧: 1 kV)

図6 DUAL検出器の構成と効果 形状観察ではSINGLE検出, 測長にはDUAL検出として, 観察と高精度測長の両立を図っている。

(2) 試料に照射するビーム電流を任意に設定する機能

チャージアップしやすい絶縁物の観察に有効である。

(3) 5軸ステージの全CPU制御による高速視野出し機能

X, Y平面での位置決め精度±5 μmで, ウェーハマップにより, 所定のパターンを次々と観察・測長が可能である。また, 傾斜, 回転によってパノラマ的観察を迅速に行うことができる。

(4) オートフォーカス・オートスティグマ機能

二次電子信号の微分を行い, この値が最大値となるように対物レンズ電流を制御するオートフォーカスと, 同様に非点補正コイルへの電流を制御するオートスティグマにより, 容易に約5万倍もの高倍率での焦点合わせができる。

(5) 自動測長機能

CRT上のパターンのメモリ画像から指定領域のラインプロファイルを求め, このラインプロファイルからパターンのエッジを検出し, 演算して測長値を自動的に得る。測長できる個所は, ライン幅, スペース幅, ピッチ幅だけでなく, ホールパターンの指定領域での最大径や, 複数のラインおよびス

ペースを一度に測定することもできる。また, 測長アルゴリズムは, ラインプロファイルを直線のスロープラインとベースラインに近似して交点を求める直線近似法と, エッジのピークとボトムを指定したしきい値で分割した交点を求めるしきい値法とを用いている。

(6) カセットオートローダ

カセット中の任意のウェーハに対して, 自動ローディングされるランダムアクセス方式, 1カセットのオートローダとしている。

こうした自動化によって操作性の向上を図り, 高いスループットで観察・測長ができるようにしている。

3.5 SECS通信によるプロセス評価データの管理

検査装置では, 検査データを収集し, その評価をプロセスに反映させることが重要となる。S-7000形ではデータ評価用の種々の機能を備えており, 同一ウェーハだけでなく同一ロット, または異なったロット間でのデータ比較を, 装置内部で処理できるようにしている。

しかし, 他の製造装置, 検査装置とのデータからプロセス

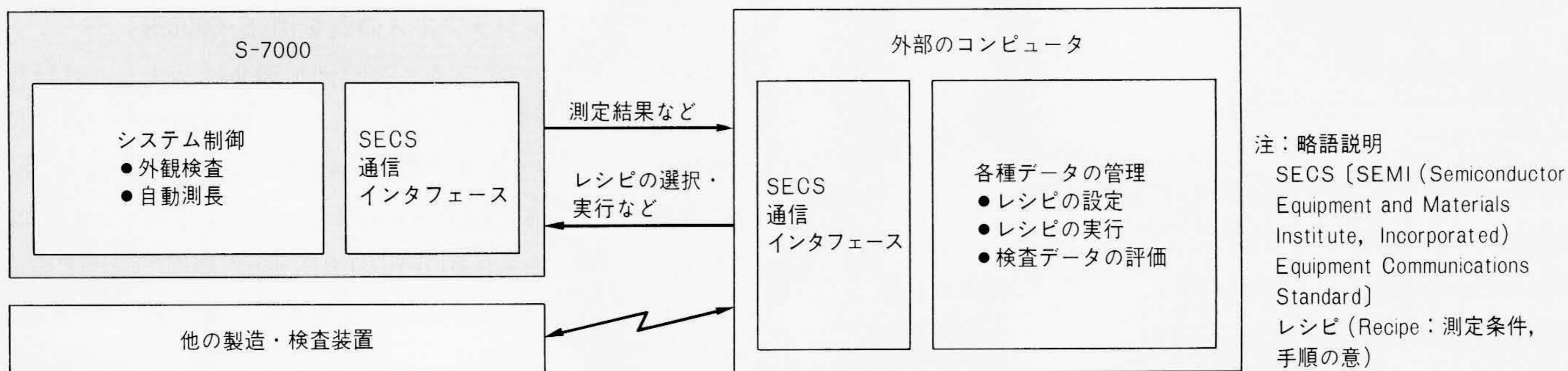


図7 SECS通信によるプロセス評価データの管理 外観検査やパターン測長の結果は、プロセスの評価・管理に重要なデータであり、外部の上位コンピュータによって管理することが多い。

を総合的に評価・管理するには、検査データを外部の上位コンピュータに送信するSECS [SEMI (Semiconductor Equipment and Materials Institute, Incorporated) Equipment Communications Standard] 通信が必要である。図7に示すように、S-7000形では外観検査結果、パターンの測長結果などを外部コンピュータに送信できる。また逆に、外部コンピュータからS-7000形に対し、検査条件、検査手順の選択・実行などを指令することができる。このように構成することによって、プロセスの進捗管理をしているコンピュータとリンクすることができ、操作者が検査条件などを選択、あるいは入力することが不必要となり、作業を自動化することができる。

4 その他のプロセス評価装置

4.1 S-6000形電子ビーム測長装置¹⁾

S-6000形は、前述したS-7000形が高角度試料傾斜機能を持っているのに対し、試料傾斜機能を持たず、試料を水平にした状態でパターンの寸法測長を主としたインライン形プロセス管理装置である。試料の高角度傾斜による観察機能を除いた基本的な性能は、S-7000形と同様である。

4.2 電界放射形走査電子顕微鏡

露光装置によるリソグラフィーの条件出しや、エッチングプロセスあるいはスパッタリングによる成膜など、各加工工程での厳密な評価には、断面SEM法がよく用いられている。これはデバイスを割って断面を作り、この断面から加工形状評価を行う。こうした評価を行う装置として、電界放射形電子銃を用いた走査電子顕微鏡があり、超高分解能形としてS-900形走査電子顕微鏡(最高分解能: 7 nm)、高性能形としてS-4000形、S-800形がある。

デバイスを割って評価するので、破壊検査となるが、断面形状と加工表面を同時に観察することができるので、成膜厚さの均一性や、加工形状など厳密な評価のための装置として利用される。

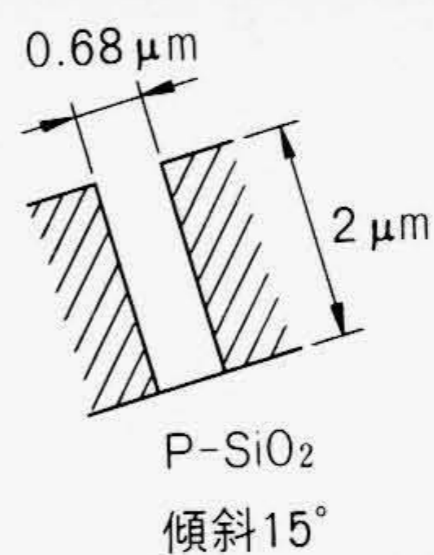
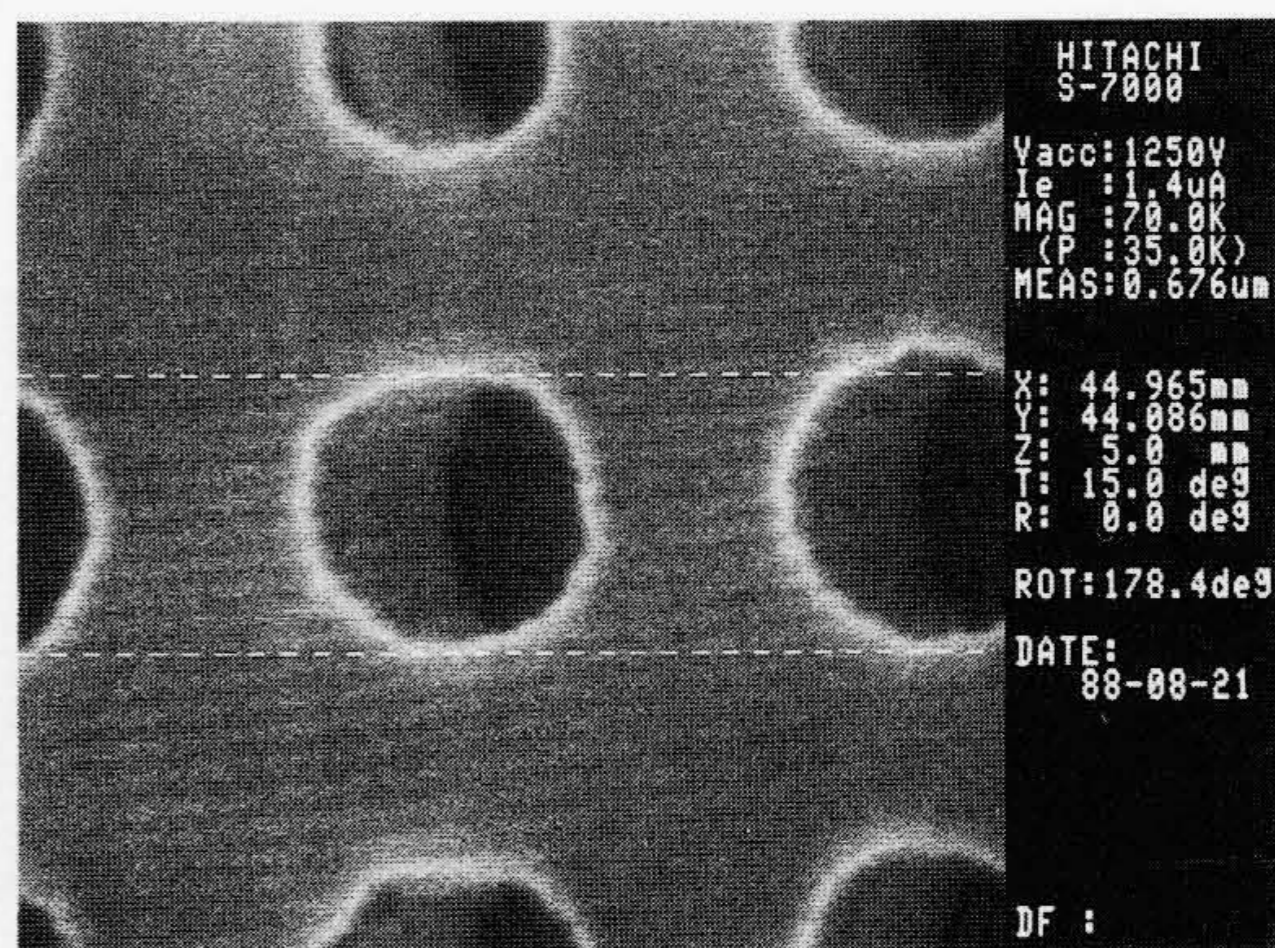
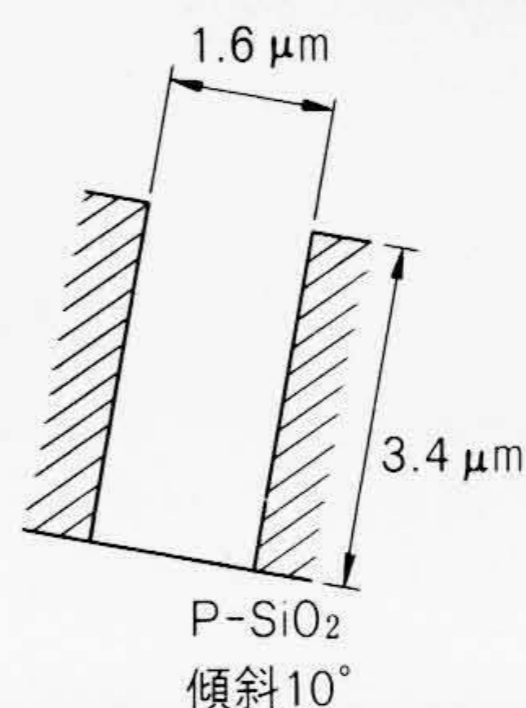
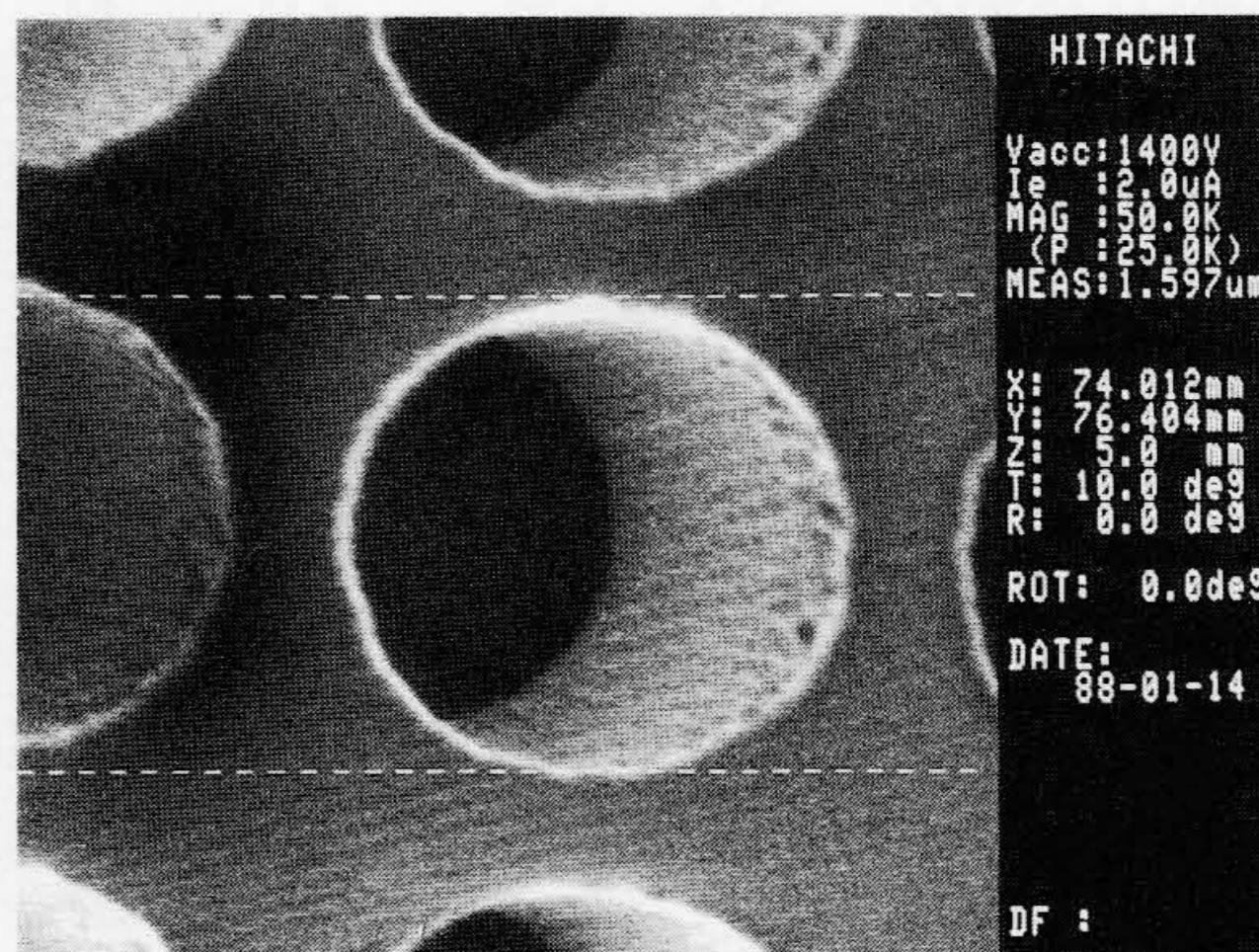


図8 深穴観察例 試料を傾斜することによって、レジスト深穴のエッチング形状がよくわかる。画像はリアルタイムでテレビジョン画像で表示される(S-7000形)。

5 応用例

5.1 深穴観察例(S-7000形)

SiO₂上のレジストパターンの深穴観察例を図8に示す。試料を傾斜することによって、穴パターンの側壁や底部のエッチングの良否が容易に判定できる。同時に穴径の測定や、試料の傾斜角を入力することによって、パターンの深さも測定することができる。

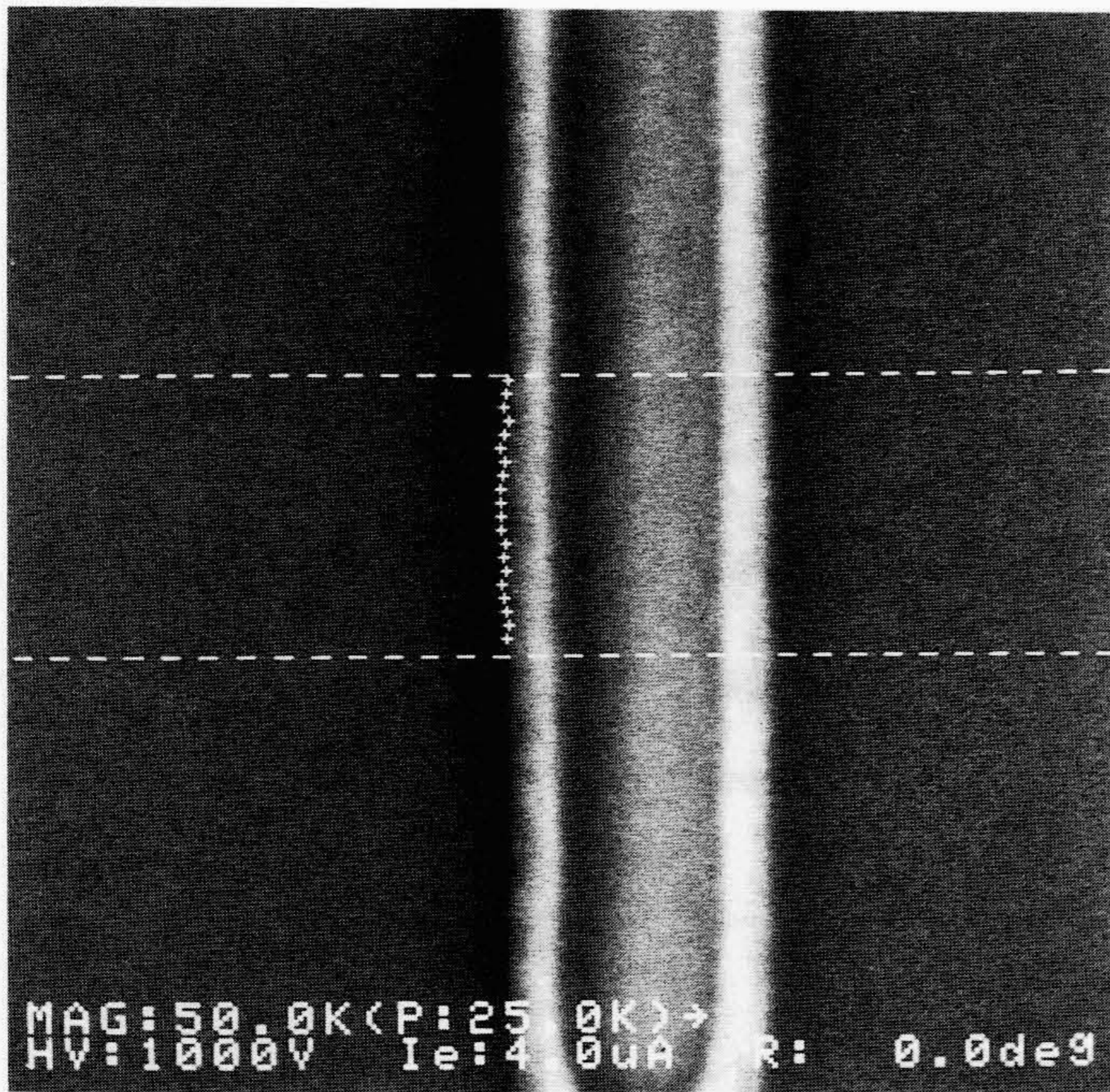


図9 エッジラフネスの測定例 パターンエッジのうねりが定量的に評価でき、0.01 μmから0.015 μmの範囲であることがわかる。

5.2 パターンエッジラフネスの測定例(S-6000形)

パターンエッジのラフネス測定例を図9に示す。これは指定した領域内のパターンについてエッジ部の凹凸(うねり)量を数値化する機能であり、露光工程やエッチング工程での管理に有効である。同図は0.8 μm幅のレジストラインパターンであり、最大、最小で0.01 μm, 0.015 μmの範囲で荒れていることがわかる。結果はプリントアウトされる。

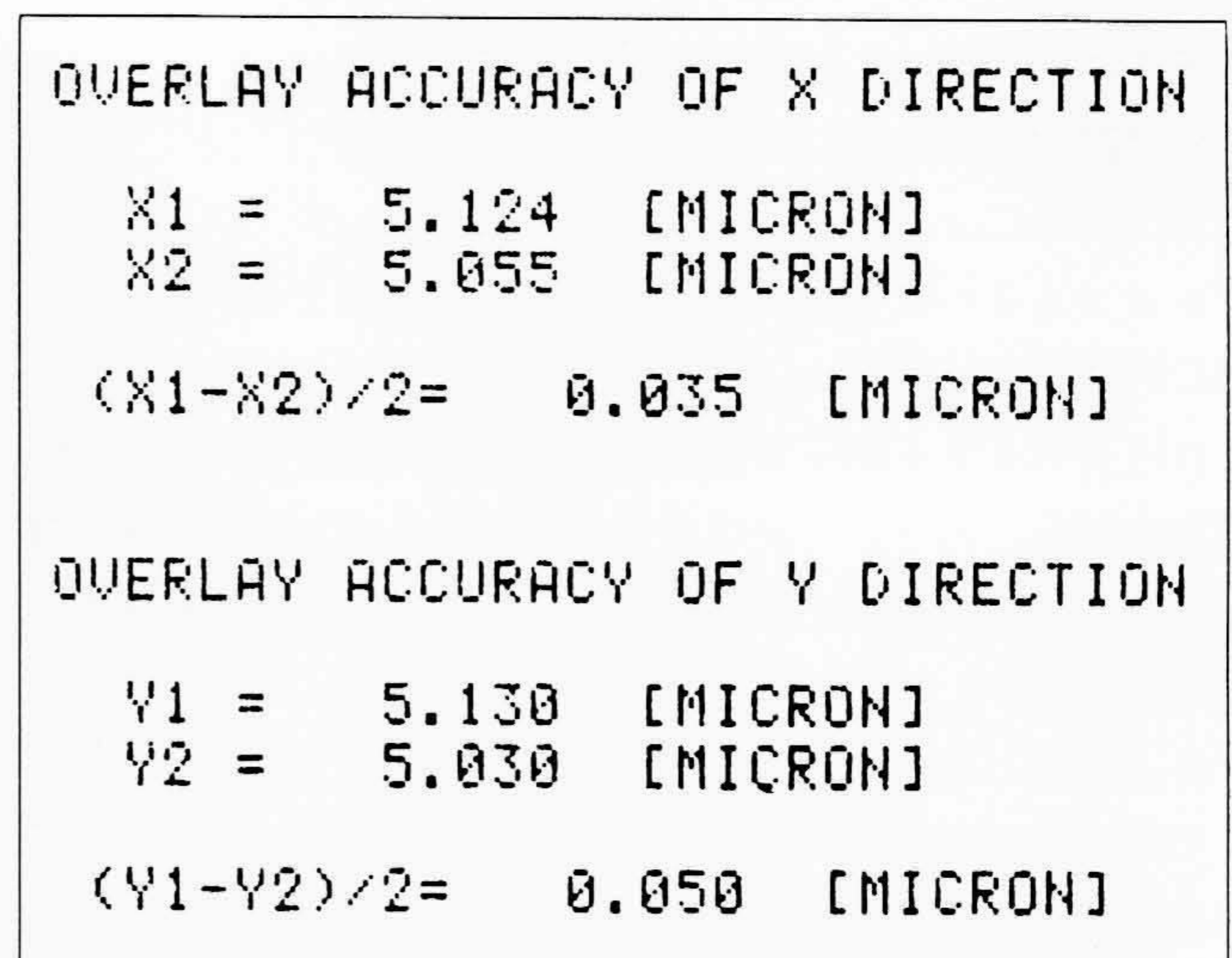
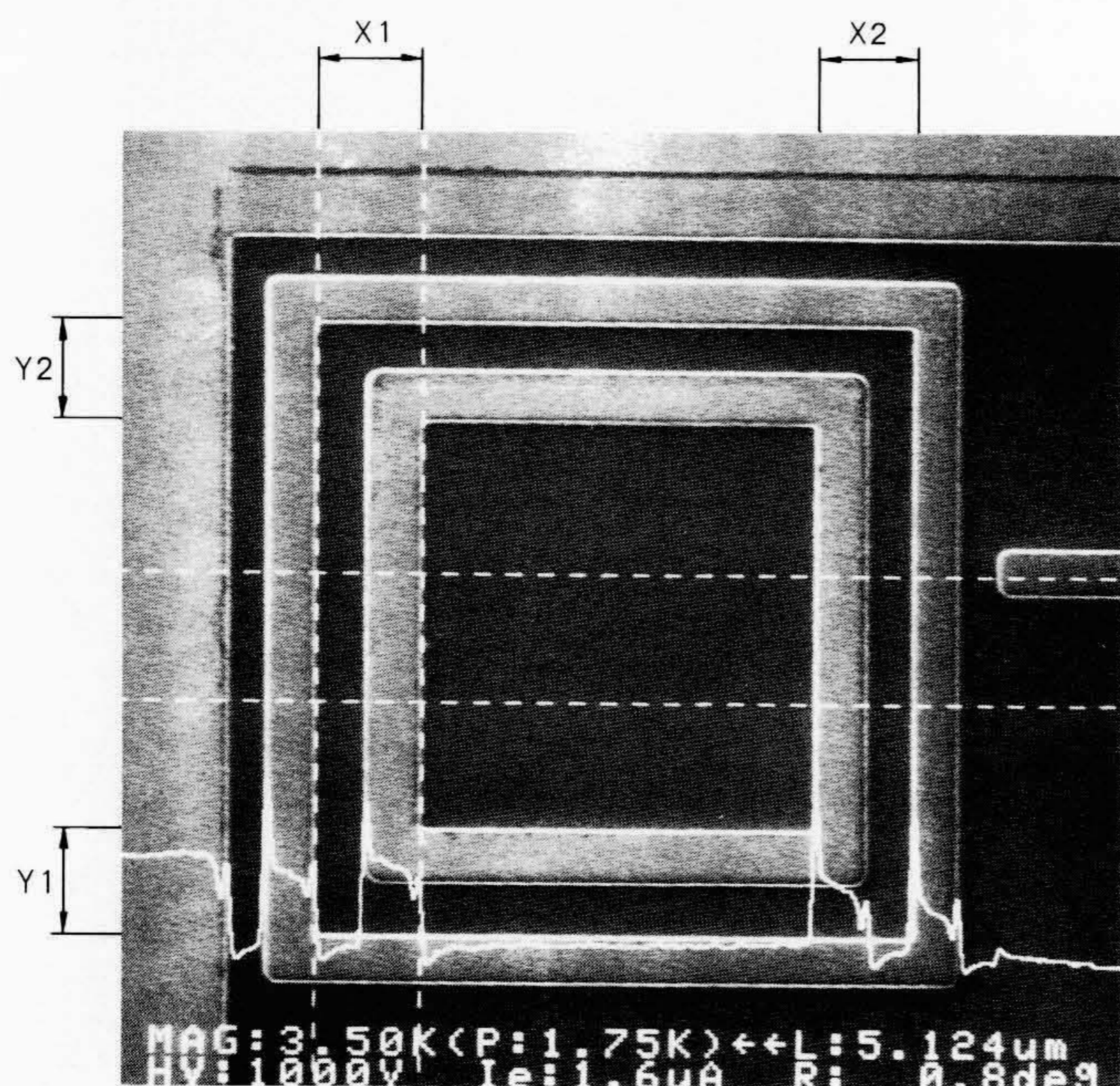
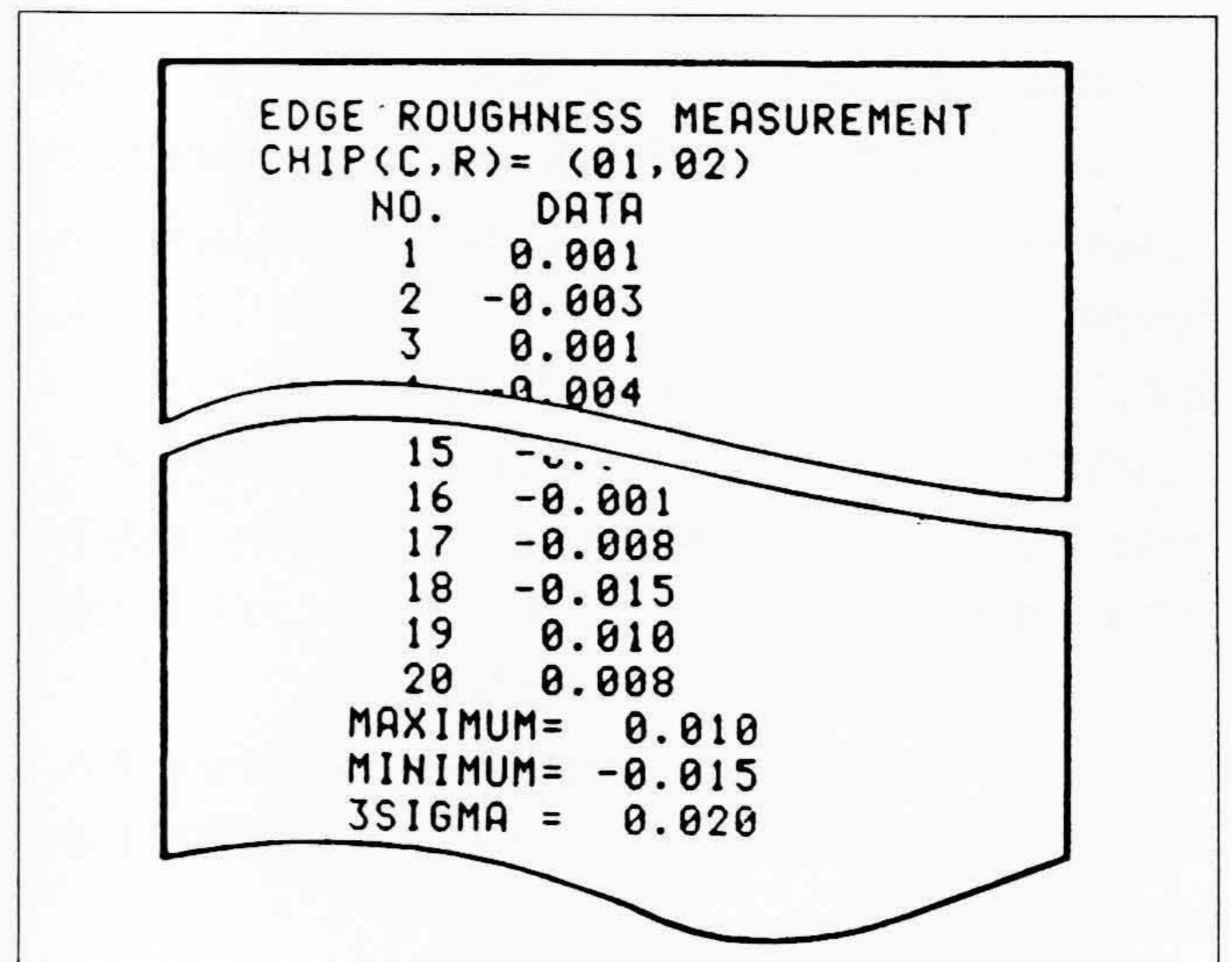
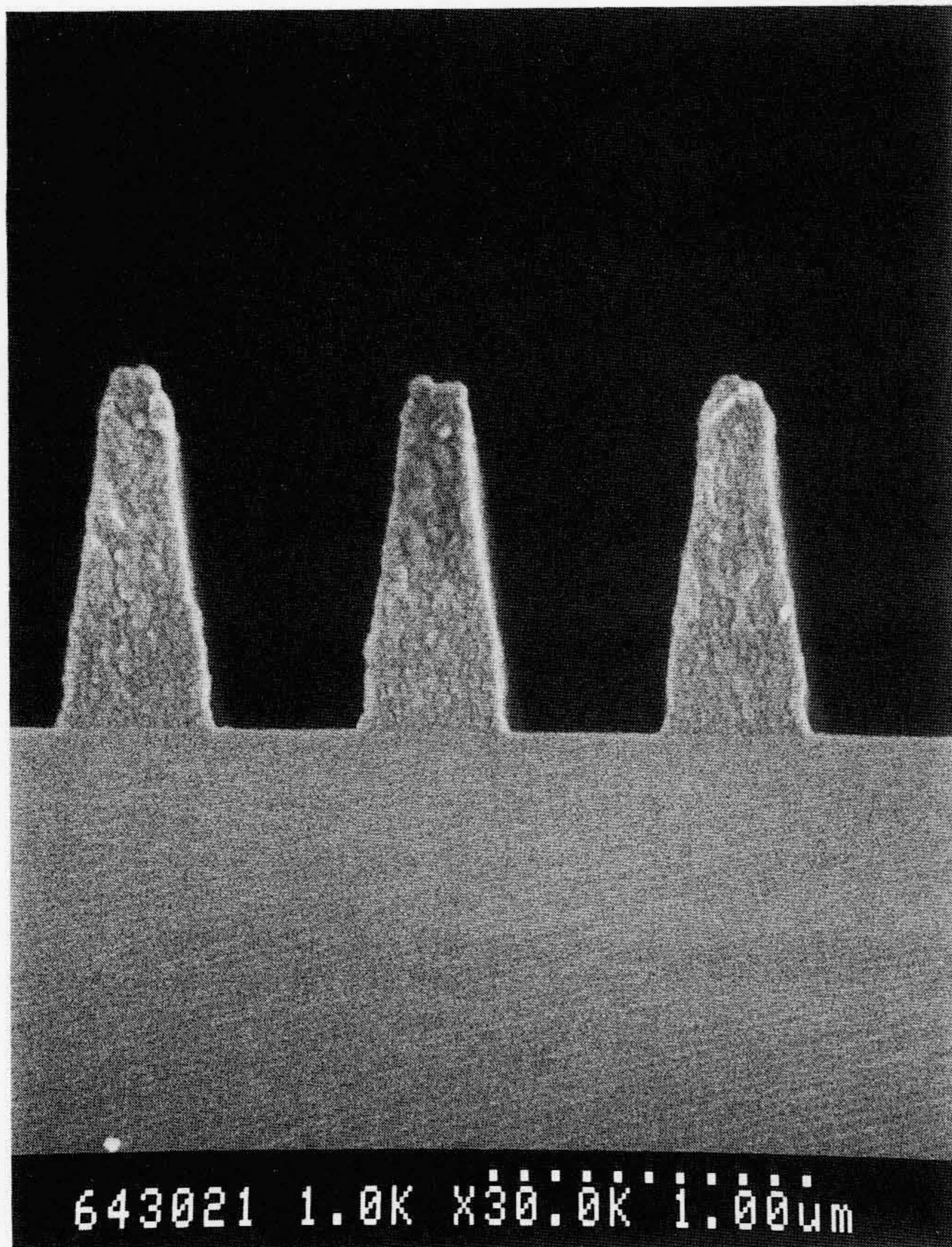
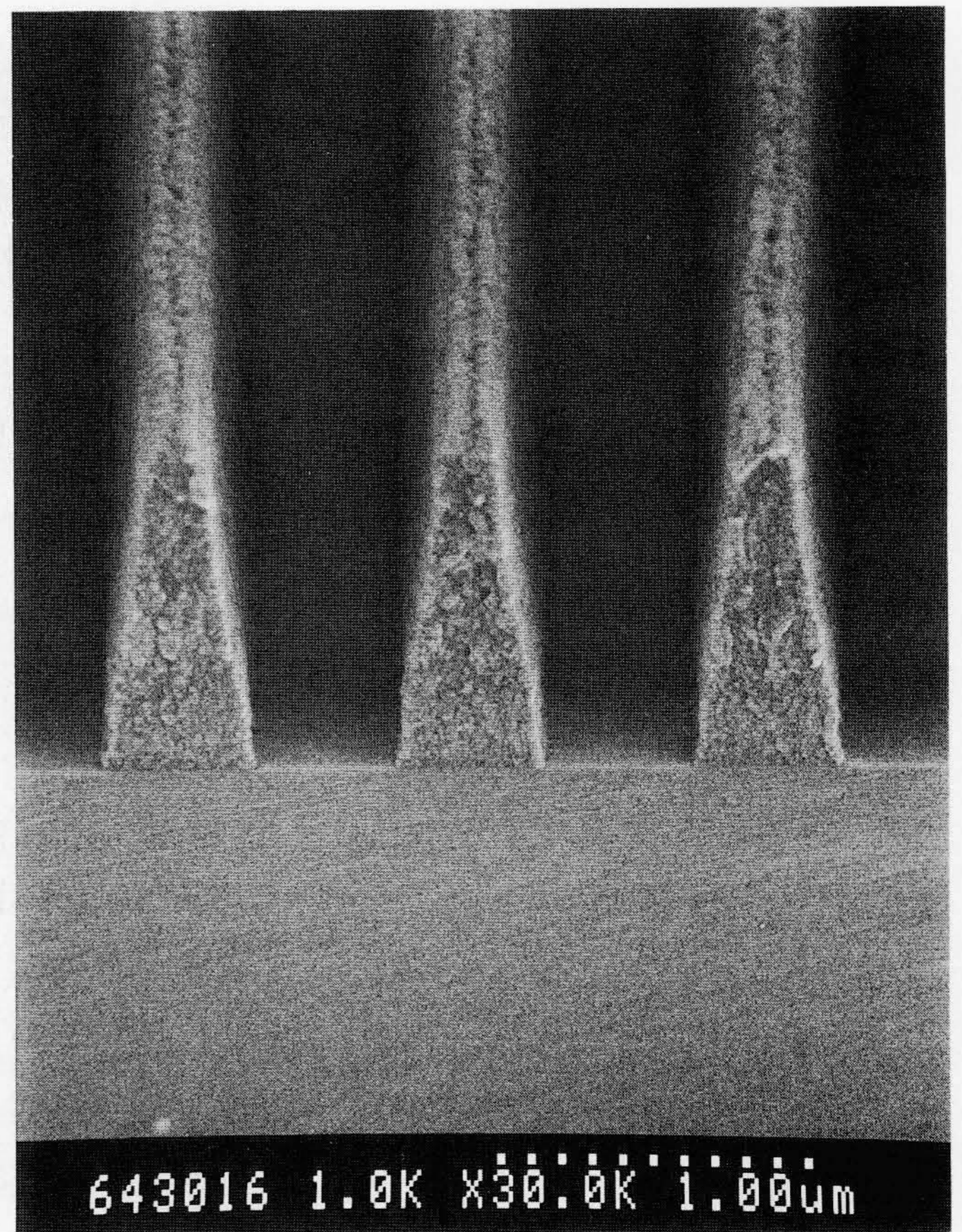


図10 重ね合わせ精度の測定例 X1, X2を自動測長し、X方向の重ね合わせ精度を計算し出力する(Y方向についても同様に実施し出力する)。



(a) 90°傾斜



(b) 60°傾斜

図11 レジストパターンの断面評価例(S-900形) 0.45 μm のL/Sのパターンの断面形状が明瞭(りょう)に観察される(LD-5010i線縮小投影露光装置によって作成)。

5.3 重ね合わせ精度の測定例(S-6000形)

重ね合わせ精度の測定例を図10に示す。S-6000・S-7000形では四則演算、統計計算などのコマンドが用意され、自動測長機能と組み合わせることによって、種々の処理を施すことができる。同図の例では、メモリ画像上の重ね合わせパターンから2か所の測長を自動的に行い、その結果から、X方向、Y方向の重ね合わせ精度を計算し出力する。この例では、重ね合わせ精度で0.05 μm 以下であることがわかる。

5.4 レジストパターンの断面評価例(S-900形)

レジストパターンを断面にし、断面SEM法で評価した例を図11に示す。加速電圧は1.0 kVで低加速電圧にし、直接観察している。パターン幅は約0.45 μm である。このようにパターンの形状から容易に判断できるので、露光装置やエッチング装置のプロセス条件決定のために有効に利用される。

6 結 言

超微細化する加工パターンの外観評価と寸法計測の双方を兼ね備えたS-7000形を中心に、電子ビームによるプロセス評価装置の概要と応用例について述べた。

今後とも微細化はいつそう進み、0.5 μm プロセス、0.3 μm

プロセスへとトレンドが予測されており、パターンの高アスペクト比化に伴う外観形状検査、パターン寸法管理の精度向上を図るうえで、電子ビームによるプロセス評価が不可欠と思われる。これらの評価装置が、製造プロセスでのプロセス条件決定や品質の向上など、それぞれの目的に合った検査方法、検査装置として、プロセス技術と一体となって発展していくものと思われる。

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) T. Ohtaka, et al.: Hitachi S-6000 Field Emission C-D Measurement SEM, Proceeding of SPIE, Vol.565, SPIE, 205~208(1985)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 高本, 外: 高精度EB外観検査装置の開発, 日本学術振興会132委員会第105回研究会資料, p.123~128(1988)

論文抄録

パツファ式ガス遮断器の電流遮断直後の極間過渡絶縁回復特性

日立製作所 中川由岐夫・築紫正範・他 2名

電気学会論文誌B
108B, 11, 541~547(昭63-11)

ガス遮断器の大電流遮断時の過酷な遮断責務の一つにBTF(端子短絡故障)遮断がある。BTF遮断は、電流遮断後数百マイクロ秒という時間領域で高い過渡回復電圧に耐えることが要求される。この大電流遮断直後の極間過渡絶縁回復を高めることは、遮断器の1遮断点当たりの電圧を高め、小形高性能化を図る上で重要な研究課題の一つである。

ここでは、従来十分知られていなかった電流遮断直後の絶縁回復特性を、遮断電流の大きさ、電流遮断時のストローク位置などを変えて詳細に調べた。その結果、絶縁回復特性はデータのばらつきがあって複雑な様相を示すこと、電流遮断後200 μ s付近までの回復は速いが、その後の回復は緩やかな二つの領域から成り立っていること、遮断電流が小さいと絶縁回復が速いが、ノズル閉塞(そく)の生ずる電流域では絶縁の回復が大幅に遅れることなどがわかった。

地形適応機能を備えた実建屋内移動機構の開発

日立製作所 岩本大郎・山本広志・他 1名

日本ロボット学会誌
6, 1, 67~74(昭63-2)

クローラの形状変化を利用して地形の変化に積極的に適応し、走行できる実用的なロボット用移動機構を開発した。

移動ロボットは2足歩行する人間の移動に適するように整備された環境を、安定して、すばやく移動しなければならない。また、エネルギーの消費が少なく、小形・軽量でなければならない。本移動機構は大きな地形変化(段差:500 mm)に対しては、クローラの形状を変えることによって能動的に適応して踏破性能を高め、小さな地形変化(段差: ± 20 mm)に対してはイコライザ機構によって受動的に適応して安定性を確保する。また、旋回時には接地寸法を縮小してエネルギーの浪費を53%に抑え、高トルクを必要とする階段(傾斜角45度)移動時と高速性(2.2 km/h)を要求される平地移動時で、出力特性を変える変速機構を持つ。また、主要構造材としてCFRPを多用し、小形・軽量化(170 kg)を図った。

アナログセグメント記録方式VTRの時間軸処理高速化の検討

日立製作所 降旗 隆・尾鷲仁朗

テレビジョン学会誌
42, 1, 63~69(昭63-1)

アナログセグメント記録方式高品位VTR用の時間軸処理方式として、時間軸補正の高精度化と安定性、高速性を両立できるフィードフォワード制御形式のバーストインジェクション時間軸補正方式を提案した。

設計の一手法を確立するために、非線形動作のインジェクション発振器を基本周波数にだけ着目して線形モデル化し、インジェクション信号に対する位相応答解析を行い、発振器のQとインジェクション信号の瞬断による位相過渡応答との相関、および系の耐雑音特性を求めた。発振器のQの最適化と定位相制御形PLLの併用により、バースト期間1 μ s以内で定常位相偏差を5 ns以下に整定でき、映像信号のSN比が25 dB程度に低下しても、ノイズ性ジッタを5 ns以下に抑圧できることを確認し、耐雑音の良好な高速・高精度の時間軸処理が実現可能なことを示した。

タービン段落内の三次元圧縮性乱流解析

日立製作所 鹿野芳雄・池川昌弘・他 2名

日本機械学会論文誌B
53, 496, 3622~3628(昭62-12)

タービン段落内では、静翼と動翼の翼間流れが互いに干渉する流れとなる。このような翼間流れを数値計算で予測する場合、静翼と動翼の翼間流れを同時に解析することが望ましい。また、実際の流れのほとんどが乱流であることから、乱流の影響を考慮できる解析手法が予測精度向上を図る上で重要となる。

本論文では、静翼と動翼の三次元翼間流れを定常干渉流の仮定に基づいて、同時に乱流解析する方法を提案した。空間の離散化には、著者らが開発したコントロールボリューム法とボディフィット型曲線座標系を組み合わせる手法を採用し、乱流の影響は2方程式乱流モデルにより考慮した。計算結果は動翼翼間内部に発生する二次流れ渦の三次元流動現象を明確にとらえたとともに、実験結果とも比較的良好な一致を示し、タービン内部流れの詳細把握が可能との見通しを得た。

低圧トランスファーマ成形用エポキシ樹脂の管内流動と熱伝導

日立製作所 佐伯準一・金田愛三・他 1名

高分子論文集
45, 2, 97~103(昭63-2)

円管流路およびEMMIスパイラルフロー金型の半円管流路内での低圧トランスファーマ成形用エポキシ樹脂の流動と伝熱の解析を行った。

樹脂圧力とプランジャ変位の検出器を備えた成形装置を用いて、流動中の樹脂の平均見掛け粘度を求めた。管軸に直交する断面での非定常熱伝導式を数値解析し、各流路内の樹脂の温度変化を算出した。製造工程に用いる金型のランナと同程度の断面積を持つ円管流路内では、樹脂の温度上昇が遅く、粘度は低下を続ける。断面積が非常に小さいEMMIスパイラルフロー金型の流路内では、樹脂の温度上昇がきわめて速く、流動開始後数秒で最低熔融粘度に達し、流動時間のほとんどが粘度の上昇域にある。

Thermal management of electronic equipment : A review of technology and research topics

日立製作所 中山 恒

Applied Mechanics Reviews(ASME)
39, 12, 1847~1968(昭61-12)

集積回路の微細化と高密度化、チップ寸法の増大、表面実装などに見られる新しい電気接続形態など、急速に進んでいるこれらの実装技術の展開は、電子機器の熱管理に厳しい要求を課しつつある。

この分野で伝熱研究が果たすべき役割は、熱設計の仕様に関する物理的根拠を明らかにすること、および熱設計データベースの充実である。事例を引用しながら、重要な技術課題を解説した。

例えば、DRAMチップのパッケージ、論理チップのモジュール、間接水冷モジュールでは、それぞれ熱応力の管理、ヒートシンク的设计、接触熱抵抗の低減が重要である。さらに自然空冷、強制空冷機器での研究課題、沸騰冷却など高性能冷却法の課題を整理して示した。