

65 nmプロセスノード対応の測長SEM

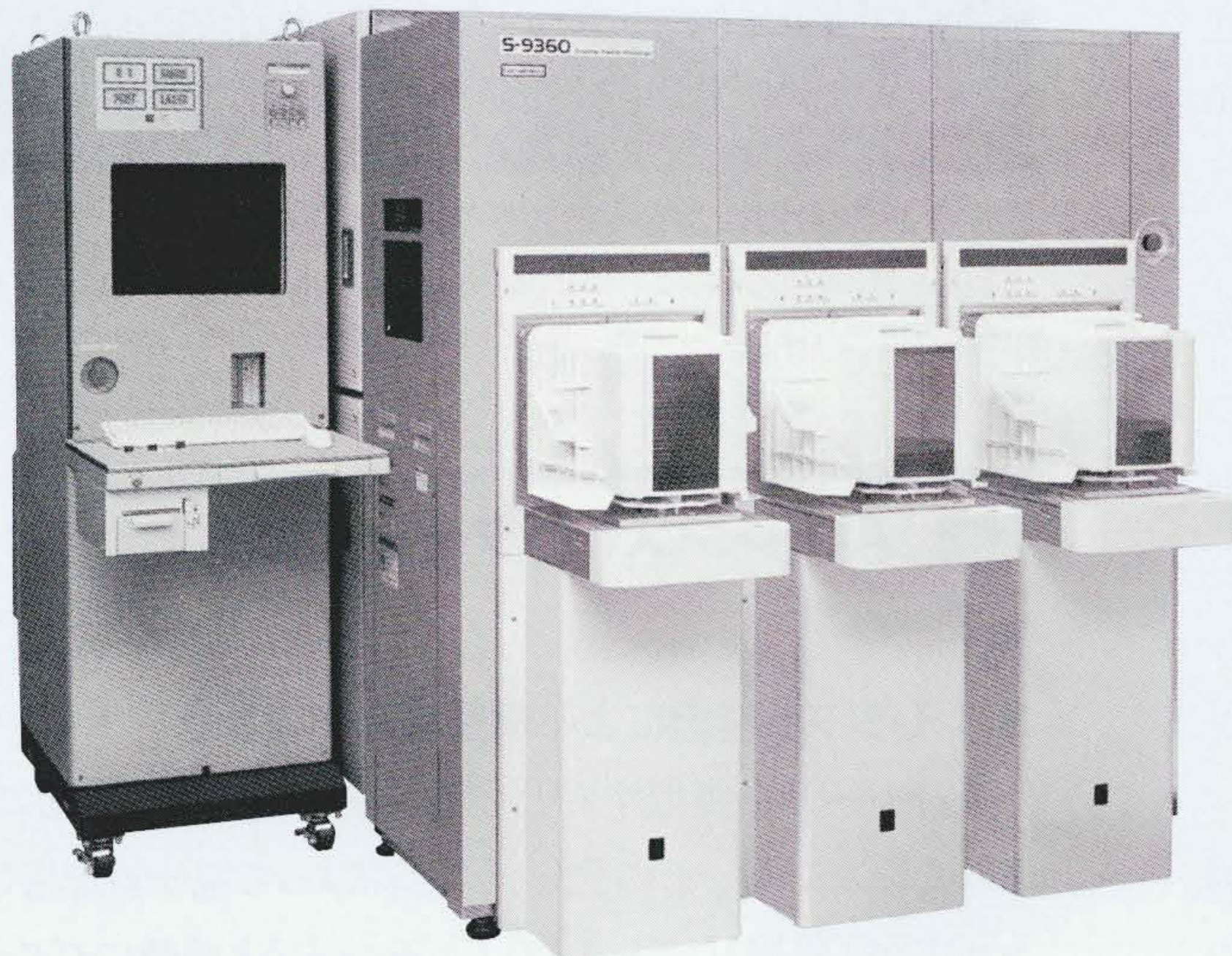
CD-SEM for 65 nm Process Node

川田 洋揮 Hiroki Kawada

諸熊 秀俊 Hidetoshi Morokuma

高見 尚 Shô Takami

野副 真理 Mari Nozoe



S-9360形の特徴

- 測長再現性:スタティック 2 nm (3 σ)
- 加速電圧範囲:300~1,600 V
- 分解能:3 nm
- スループット:55ウェーハ/h
- MAMタイム:<6 s
- 視野位置決め精度: $\pm 1 \mu\text{m}$
- FOUP対応ミニエンバイロメントシステム
- ソフトウェア:標準Ver.17搭載
- 安全規格:SEMI S2-0200適合

注:略語説明 MAM(Move, Acquire, Measure), FOUP(Front Opening Unified Pod), SEMI(Semiconductor Equipment and Materials Institute)

新形の測長SEM「S-9360形」

300 mmウェーハ対応測長SEM(走査電子顕微鏡)の最新機種は、90~65 nmデザインルールでのプロセスの開発と量産に適合する装置として開発したものである。

90 nmプロセスノード以降、検査装置には観察能力の向上だけでなく、測長再現性のさらなる向上が求められている。また、微細化に伴って登場したArF(フッ化アルゴン)レジストプロセスやプロセスモニタリングなどの新しい機能へのニーズが高まってきた。

日立グループが開発した測長SEM「S-9360形」では、これらのプロセスに対応するため、(1)「S-9000シ

リーズ」共通の電子光学系による優れた観察能力を持ち、(2) 測長再現性、スループットなどの基本性能の向上を図り、(3) ArF系レジストの測長や表面帯電試料の測定などの新しいプロセスへの対応機能、(4) 充実したプロセス変動モニタ機能、(5) 装置性能の保守管理を支援する機能などを搭載し、次世代の半導体製造工程に適応した測長環境を確立する。

1 はじめに

測長SEM(Scanning Electron Microscope)は、半導体プロセスで形成される微細パターンの寸法を計測し、品質の高い半導体素子を製造するものである。

半導体製造プロセスの技術動向と測長SEMにおける市場の要求についてはITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)がまとめており、測長SEMへのニーズをあげると以下になる。

- (1) 高アスペクト比の微細パターンを観察し、高精度で安定した測定が短時間で行えること
- (2) 90 nm以下の世代のプロセスに対応できること
- (3) パターンの形状変化を測定し、製造プロセスが検出できること
- (4) 自動化による生産性の向上と効率化に対応できること

ここでは、以上のような要求にこたえるために開発した新形の測長SEM「S-9360形」の基本性能と、新規開発技術のトピック、および今後の展望について述べる。

2 S-9360形の基本性能

微細化プロセスに対応するため、S-9360形は23ページの図に示すような基本性能を持つ。

(1) 像分解能

S-9360形の電子光学系は、3 nmの像分解能を持ち、100 nm以下のライン・スペース、ホールパターンに対応する。観察例を図1、2に示す。

(2) 測長再現性

真空試料室の清浄化による試料汚染の低減と、画像認識のパターン検出精度の改善によって測長再現性を向上し、10回繰返し測定の実現精度では3 σ で2 nmを達成している。

(3) スループット

新型の搬送ロボットによる大気中でのウェーハハンドリング時間や、粗引きポンプの最適化による真空排気時間、および新たな画像処理装置やステージ制御方式の採用による処理時間をそれぞれ短縮し、MAM(Move, Acquire, Measure)タイムの短縮を図った。これらにより、55ウェーハ/h(5点測長、日立グループの標準ウェーハによる。)のスループットを実現した。

また、プロセス立ち上げ時の解析・条件出しに有効な、測長レシピ内での画像保存時間についても、高速画像転送の技術を導入することによって従来機種比 $\frac{1}{4}$ に短縮した。

(4) 視野位置決め精度

パターンの微細化に伴ってアドレッシングを実行する倍率が高くなることから、その分視野が狭くなり、視野位置決め精度の向上が求められる。そのため、ステージ位置決め補正を自動化し、補正に用いるウェーハマップ上の補正データを細かく取得できるようにした。また、ウェーハホルダを改良し、視野位置決め精度を $\pm 1 \mu\text{m}$ に向上した。

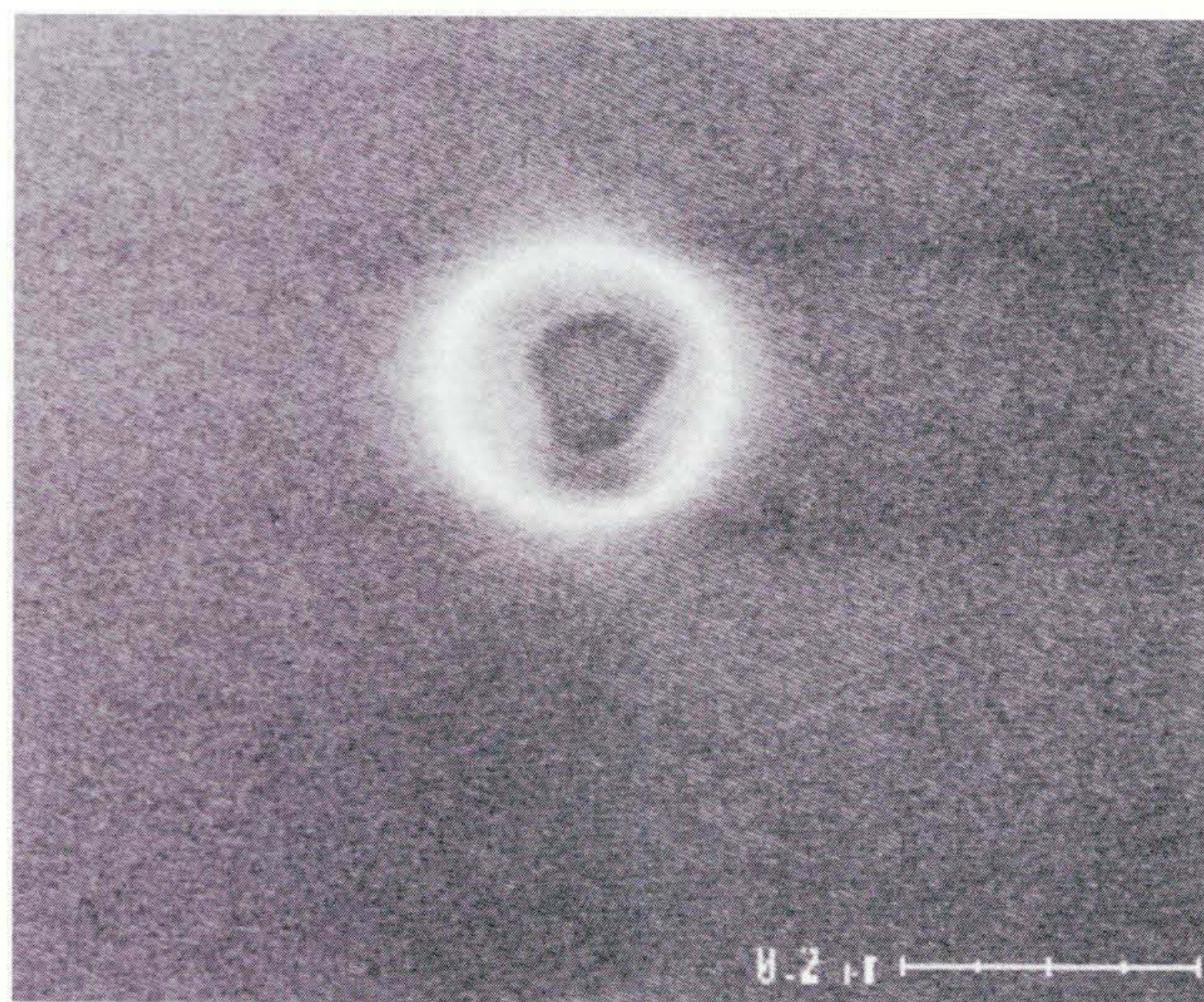


図2 S-9360形による高アスペクト比ホールの観察例

2.0 μm 厚のBPSG(Boro Phospho Silicate Glass)膜に形成されたアスペクト比「 ~ 20 」のホール像である。底部が明るく観察できるのがわかる。

3 ArFレジストパターンの測長

3.1 レジスト起因による測長値の不確かさ

ArFレーザを使用するリソグラフィープロセスのために形成されたレジストは、その化学的特質によって電子線を浴びるとシュリンク(収縮)してしまうので、測長すると同時にパターンがシュリンクし、測長値に誤差が生じる。

一つのパターンを10回連続して測長したときの測長値の減少を図3に示す。従来の測長再現性の評価方式では、10回の測長値のばらつきを3 σ 値で評価しているのので、測長精度は1.9 nmとなる。これは、主にシュリンクによる測長値減少に起因する。

しかし、これらの変動に加えて、測長開始前からの変動も加わる。すなわち、1回目の測長値はすでにシュリンクしてし

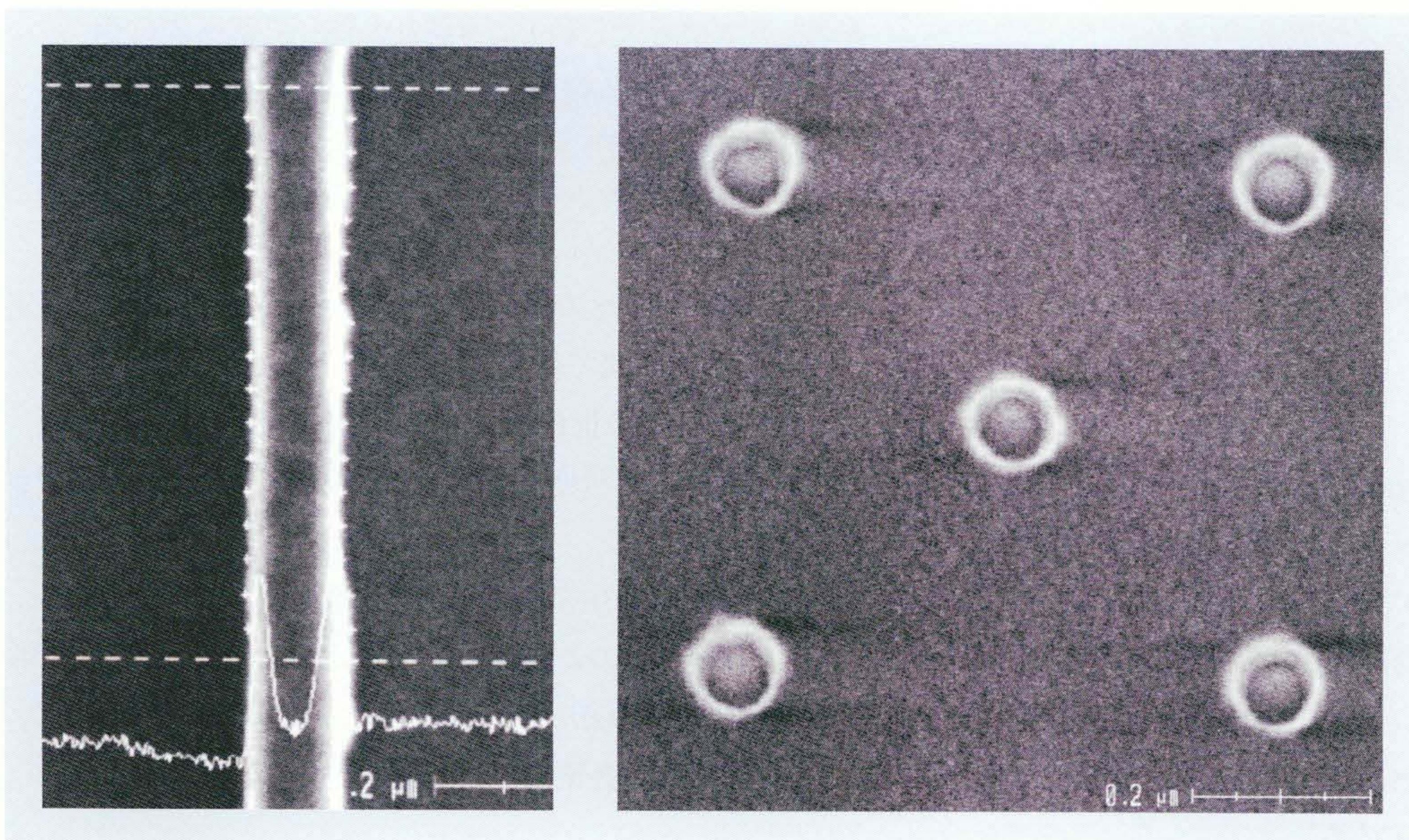


図1 S-9360形による微細パターンの観察例

幅69 nmのラインと径64 nmのホールの観察例を示す(0.5 μm 厚の電子線レジスト)。

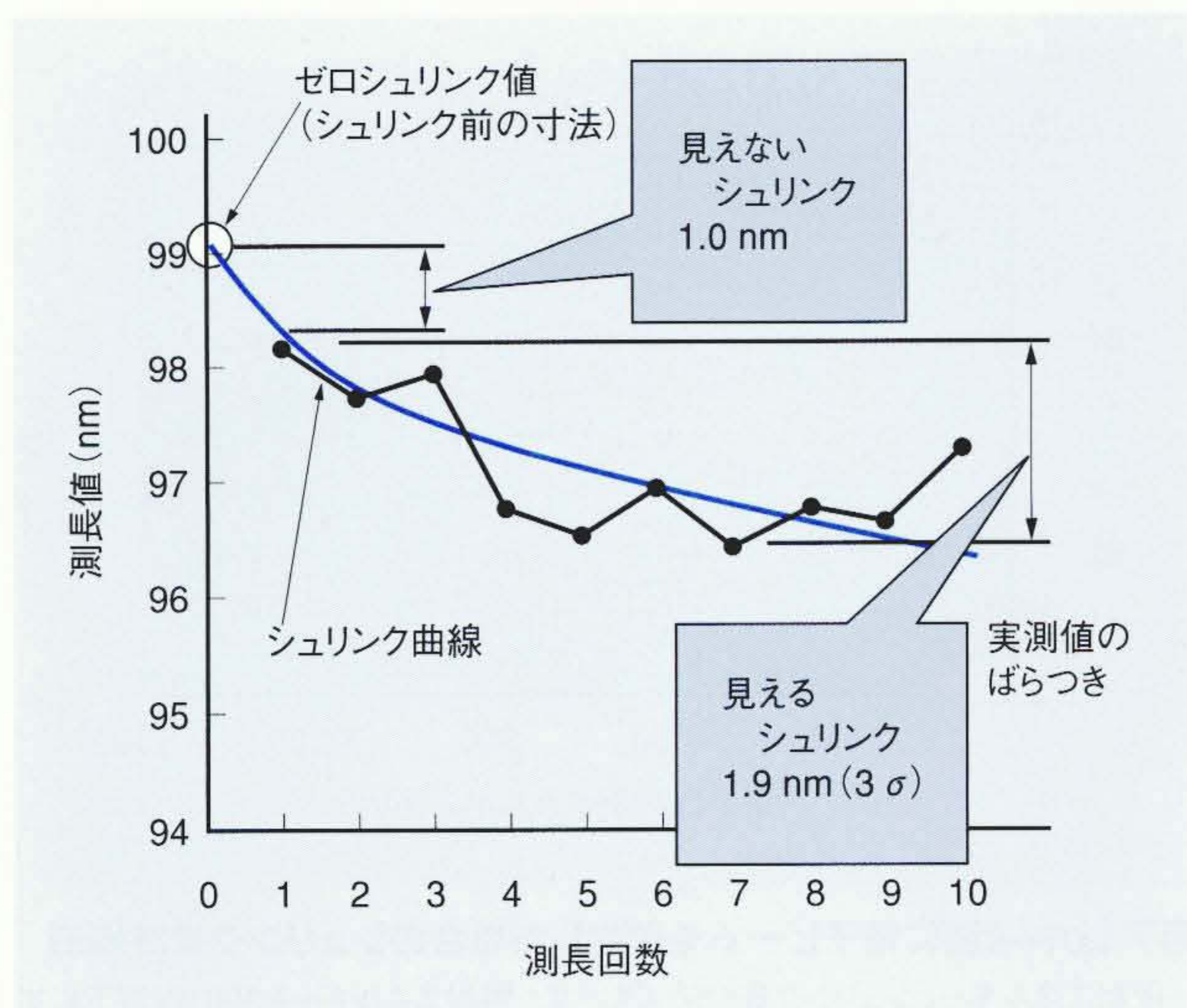


図3 レジストパターンのシュリンクを示す測長値の減少

1回目の測長値はすでにシュリンクした値である。したがって、測長値の変動が示す「見えるシュリンク」だけでなく、ゼロシュリンク値が示す「見えないシュリンク」を評価しないと、シュリンク前のパターン寸法は求められない。

まった後の寸法であるから、この分も加えなければならない。1回目の測長にシュリンクが生じているのは、2回目以降の測長と同様な電子線を照射していることから明らかである。ここで、0回目から1回目の間のシュリンク量が最も大きいと考えられる。これは、電子線照射の初期に近いほど、シュリンク量が大きいからである。

この0回目から1回目の間のシュリンク量がわかれば、1回目の測長値から、シュリンク前のパターン寸法を推定することができる。ところが、0回目から1回目の間に生じているシュリンクは、「見えないシュリンク」であり、測長データの「ばらつき」を見るだけでは定量化できない。また、シュリンクの状態は、レジスト材料や溶媒、パターン形状、パターンの大きさなどの影響を受けると考えられ、0回目から1回目の間に生じるシュリンク量は、同じ装置で測長してもパターンが変われば一定にはならない。

3.2 シュリンク前寸法の測定

「見えないシュリンク」量を推定するために、パターン寸法のシュリンク状態を表すシュリンク曲線を求め、これをゼロ点に外挿してシュリンク前のCD (Critical Dimension) 値 (以下、ゼロシュリンク値と言う。) を求めた。これを0回目の測長値として「見えるシュリンク」量を推定すると、1.0 nmであった。これは、実測値ばらつきから求めた「見えるシュリンク」量1.9 nmの約半分に相当する。パターンの寸法管理やシュリンク量評価をナノメートルレベルで行わねばならない65 nmプロセスでは、無視できない量であり、ゼロシュリンク値による測長管理が重要であることを示している。

この「見えるシュリンク量」を算出するのに使われるシュリンク曲線は、以下に述べる考え方で求められる。

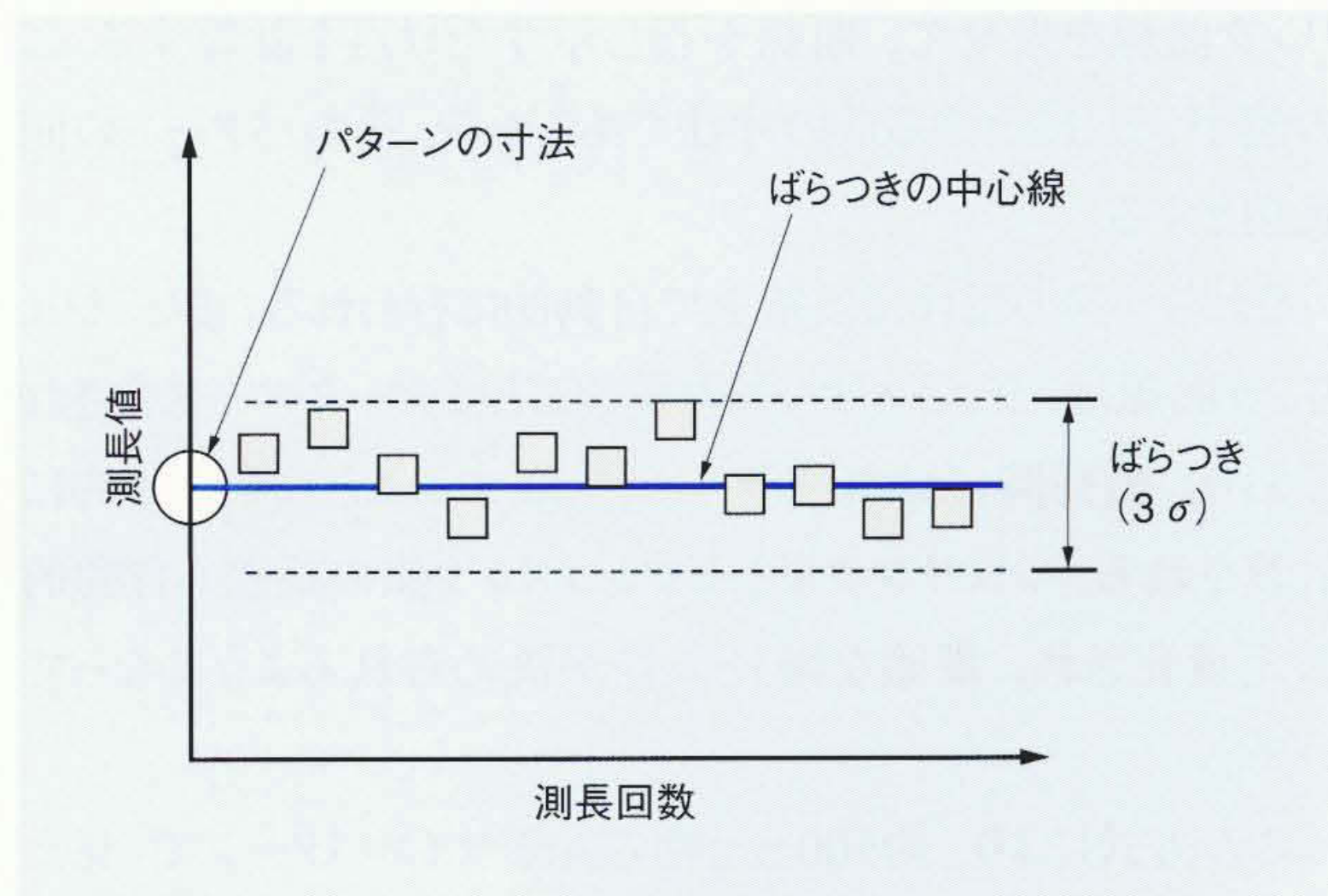


図4 シュリンクの無いパターンを測長した例

測長回数を増やしていけば測長値の平均値がパターンの真の寸法に限りなく近づき、高い精度での測長が十分に可能になる。

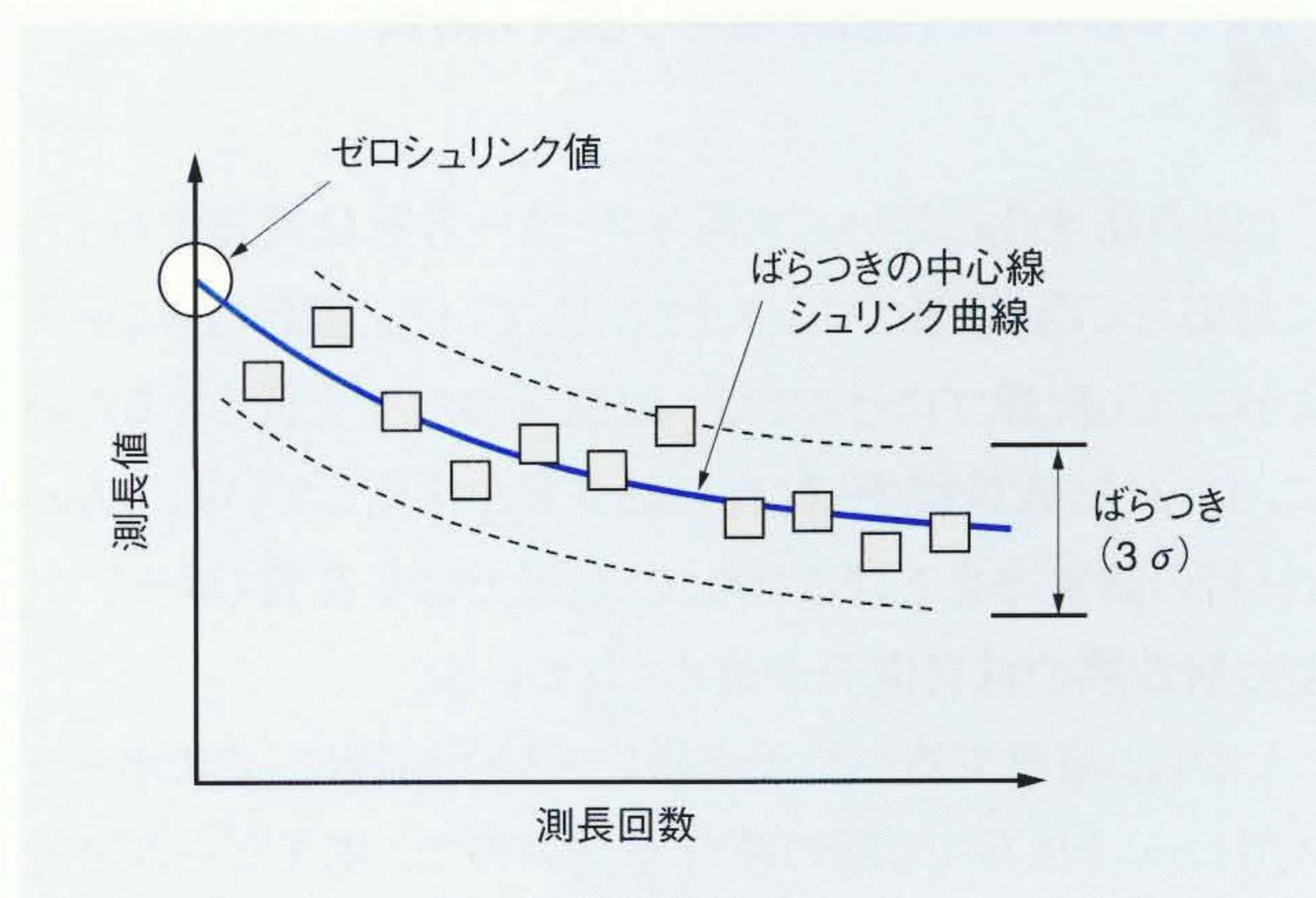


図5 シュリンクするパターンを測長した例

シュリンクの無いパターンと同様に、測長回数を増やしていくほどシュリンク曲線がパターンの真の寸法に近づく。これにより、曲線が指し示すゼロシュリンク値も、シュリンク前の寸法に近づいていくことがわかる。

シュリンクの無いパターンを測長したときの状況を図4に示す。この場合、測長値は平均値を中心にしてばらついており、ばらつきの範囲を表す3σ値が測長再現性である。もし、S/N (Signal to Noise) 比が低い場合には、測長値のばらつきが大きくなるが、測長回数を増やしていくことにより、測長値の平均値がパターンの真の寸法に限りなく近づき、高い精度の測長が十分に可能になる。

シュリンクの生じるパターンを測長した場合を図5に示す。測長回数ごとにシュリンクして小さくなっていくパターン寸法を表しているのがシュリンク曲線である。この曲線を中心にして測長値がばらつくのは、シュリンクの無い場合を示した図4の場合と同様である。また、測長回数を増やすほど、ばらつきの中心であるシュリンク曲線が、真値に近づいていくのも同様である。そして、シュリンク曲線が指し示すゼロシュリンク値もまた、真値に近づいていくと考えられる。

以上により、実際の測長では、最初に図5で示した方法によってレジストパターンのシュリンク曲線を決定する。そして、通常のパターン測長時には2〜3回程度測長し、その値にシュ

リンク曲線を乗せて、曲線が指し示すゼロ点を計算する。この値がシュリンクする前の寸法であるから、そのパターンの測長値とする。

これら一連の動作は装置上で自動的に行われる。また、シュリンク曲線はレジストパターンの種類ごとにデータベース化されており、測長時にはユーザーが意識することなく自動的に計算される。シュリンク量とゼロシュリンク値の誤差も自動的に定量化され、最適な測長条件が決められるようになっている。

この方式により、約100 nm幅のArFラインパターンで「見えないシュリンク量」を含めたシュリンク量を1.0 nmに抑え、シュリンク前寸法の測長精度を1 nmにできる測長条件も得ている。

4 Low-k(低誘電率)膜の測長

LSIの高速化に伴い、半導体メーカー各社は高速デバイスに対応してCu配線プロセスを採用している。図6(a)に示すように、Cu配線プロセスでは、配線間の容量を低くするために、Low-k(低誘電率)材料の層間膜を採用している。Low-k材料の誘電率を下げるために、最近では多孔質(ポーラス)型の層間膜の開発が進められている。

しかし、前章で述べたArF用レジストと同様に、このポーラス型Low-k材料でも膜の結合が弱いので、電子ビーム照射によるシュリンクが発生する。その事例を図6(b)に示す。層間膜がシュリンクすると、単に測長精度が低下するだけでなく、その後の配線形成時に層間膜との密着性が低下するなどの問題を引き起こす。そのため、シュリンクおよび変質の量を最小限にするための電子線照射方法を検討した。

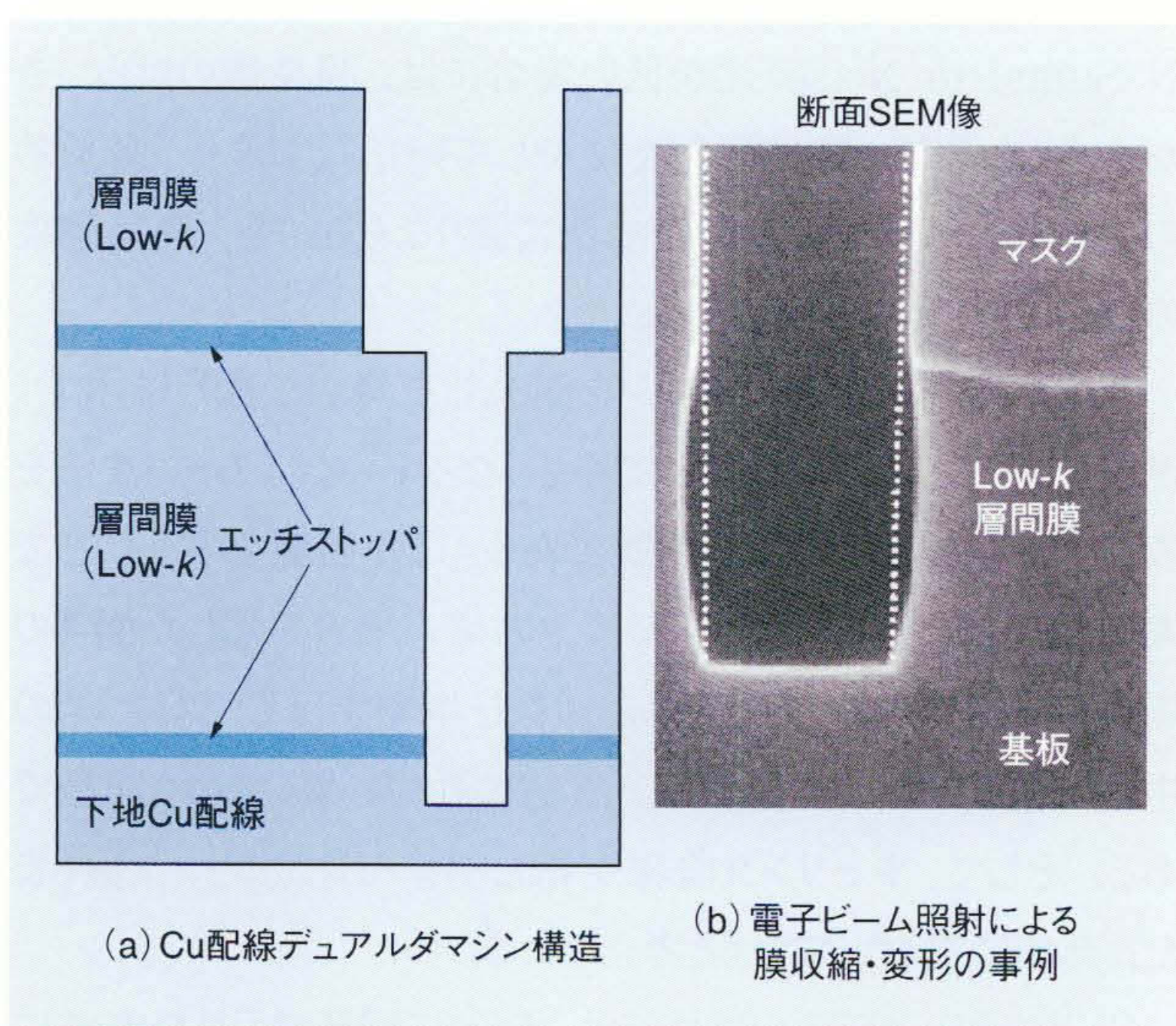


図6 Cu配線デュアルダマシン構造およびシュリンクの事例

Low-k層間膜の断面をSEMで観察した結果、膜がシュリンクして樽形に変形した(白い破線が元の形状)。

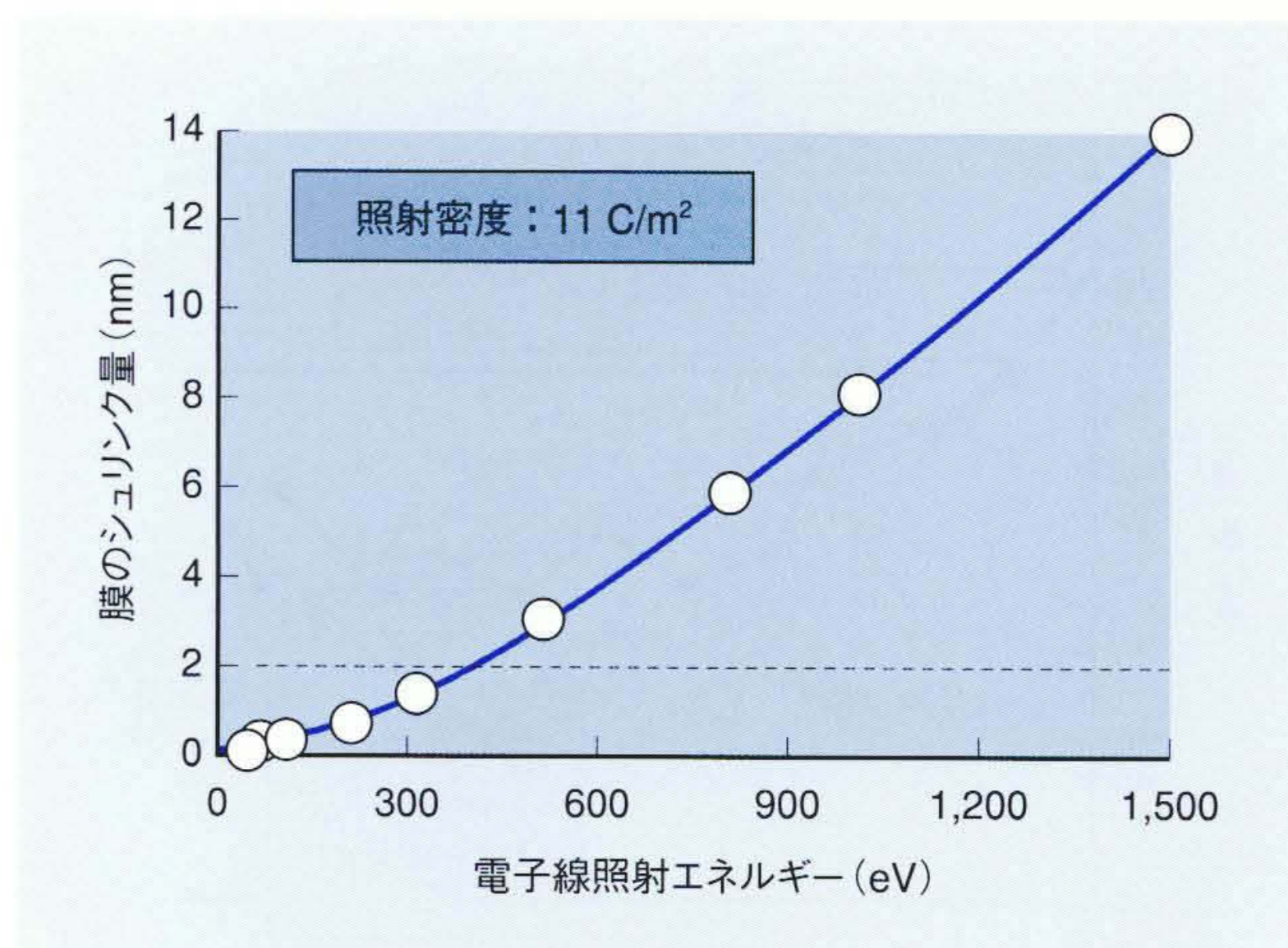


図7 Low-k膜に電子ビームを照射した場合のシュリンク量評価例

照射エネルギーとシュリンク量の関係を示す。照射エネルギーを300 eV以下にすることにより、シュリンク量を1.4 nmに抑制することができる。

その一例として、ポーラス型Low-k材料に電子ビームを照射した際の、照射エネルギーとシュリンク量の関係を図7に示す。電子ビームの照射エネルギーを小さくすることによってシュリンク量も減少し、照射エネルギーを300 eVにすれば、シュリンク量は2 nm以下に抑えることができる。

さらに、電子ビームで照射した領域の組成分析や、電子ビーム照射による熱発生モデル計算により、シュリンクや変質のメカニズムを解明し、ここに示した以外の電子線照射のパラメータについてもシュリンク・変質との関係を評価している。

このように、さまざまな新材料や構造について、電子ビームとの相互作用、ダメージの評価やメカニズム解明が、今後ますます重要になると予想される。

5 プロセスモニタリング機能

デザインルールの微細化に伴ってCD-SEMへのニーズは多様化している。特に、「プロセスの変化を立体的に計測する機能」へのニーズが高まっている。

日立グループのCD-SEMはこのようなニーズにこたえるために、次のような新しいプロセスモニタリング機能を提供する。

(1) フォト工程モニタ機能

フォト工程の制御では、露光機の線量とフォーカス(焦点)値を最適化することが重要である。線量の誤差はCD-SEMを使用した従来のパターン寸法管理によって制御することができるが、フォーカス量の誤差はパターン断面の形状変化として現れるため、単純な寸法管理ではモニタすることができない。

しかし、SEM像の二次電子プロファイルには、パターン寸法以外にも断面形状(トップ部、ボトム部)の特徴を示す情報が含まれており、これらを抽出することにより、フォーカス量の変動を検出することができる(図8参照)。

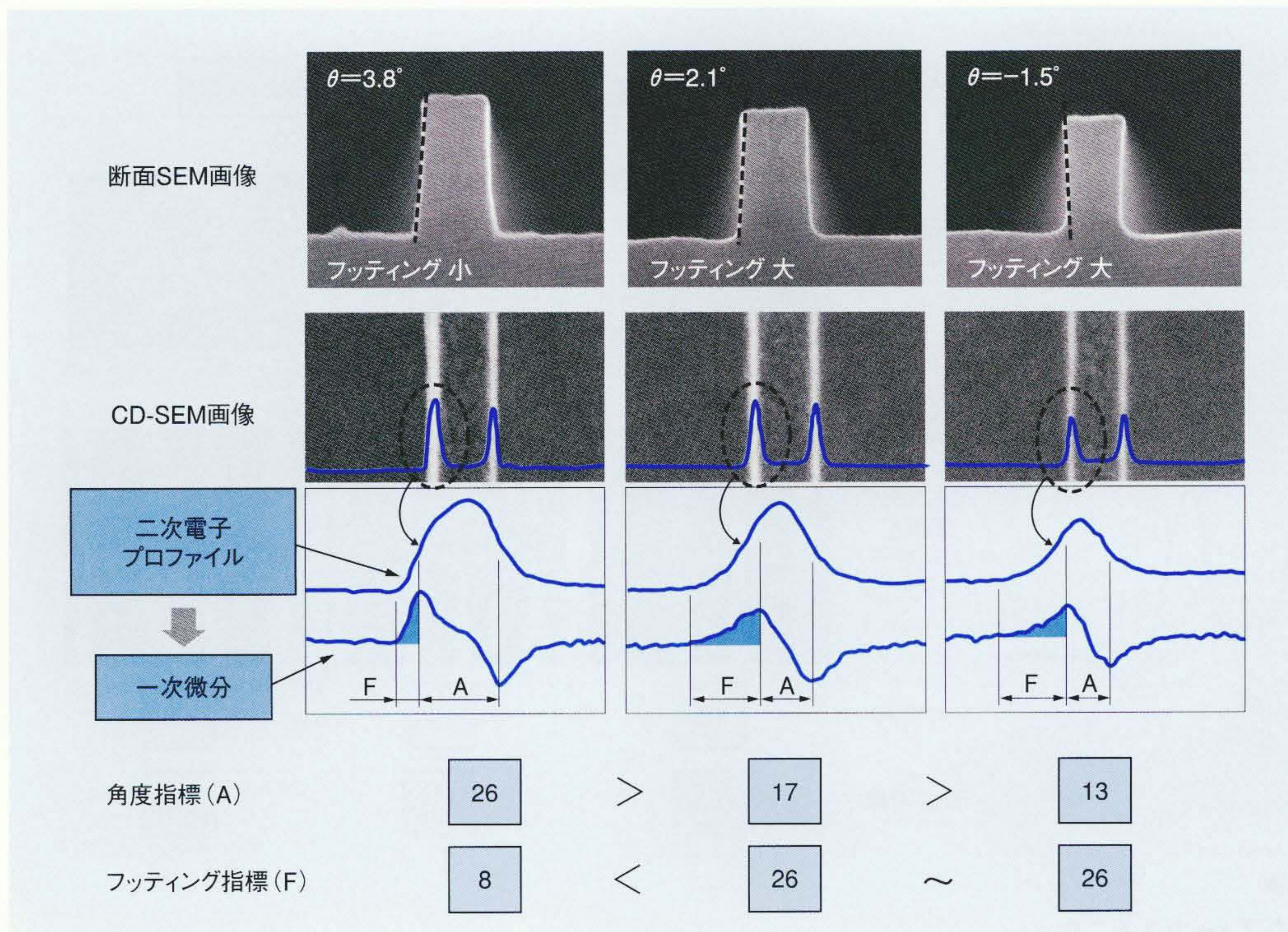


図8 エッチング工程モニタによるゲートパターンの断面形状評価例

二次電子プロファイルを一次微分したもののから、パターン側壁角の特徴量（角度指標）とボトム部の特徴量（フットイング指標）が抽出できる。

(2) エッチング工程モニタ機能

エッチング工程でも、パターン断面形状の計測は重要である。従来、パターン断面形状は主に断面SEMで計測しているが、断面観察は破壊検査であり、また、時間もコストもかかるため量産プロセスには適さない。

しかし、先に述べたようにSEM像の二次電子プロファイルにはパターンの断面形状についてのさまざまな情報が含まれている。例えば、ゲートパターンのSEM像の二次電子プロファイルを一次微分することにより、断面形状の側壁角の特徴量（角度指標）とボトム形状の特徴量（フットイング指標）が抽出できる。これらの指標値を利用してゲートパターンの断面形状の変化を非破壊でモニタすることができる（図9参照）。

(3) ビームチルト機能との組み合わせ

ここで述べたフォト工程用、エッチング工程用のモニタリング機能は、いずれもCD-SEMのトップダウン画像の二次電子プロファイルを利用していることを特徴とする。これは既納品への機能追加や、CD-SEMのスループット維持という点で、非常に有利である。しかし、パターン形状が垂直に近い場合や逆テーパー（図8の $\theta=-1.5^\circ$ を参照）になっている場合は、トップダウン像だけではプロセスの変動を十分に検出できない。

そのため、CD-SEMのビームチルト機能（電子ビームを傾けることにより、サンプルを斜め方向から観察する機能）を組み合わせ、垂直パターンや逆テーパーパターンのモニタリング能力を向上させる。

6 自動化・効率化への対応

(1) 光学系性能のモニタ機能

軸調整や非点収差のずれなどを総合的にモニタする機能を装備した。モニタに使用する標準試料には、日立グループ独自の寸法値校正試料である「マイクロスケール」を用いる。マイクロスケールは、レーザ干渉縞露光とSi単結晶の異方性エッチングを利用して、正確なピッチ（240 nm）でライン・スペースパターンを形成した素子である。“X, Y”2方向のマイクロスケール画像をフーリエ変換し、像質評価値を算出する。評価値はあらかじめ記録した「標準画像」との比として表示され、時系列グラフによって経時変化の管理も行える。これにより、光学系の状態がモニタでき、軸調整のタイミングを判断することができるようになる。

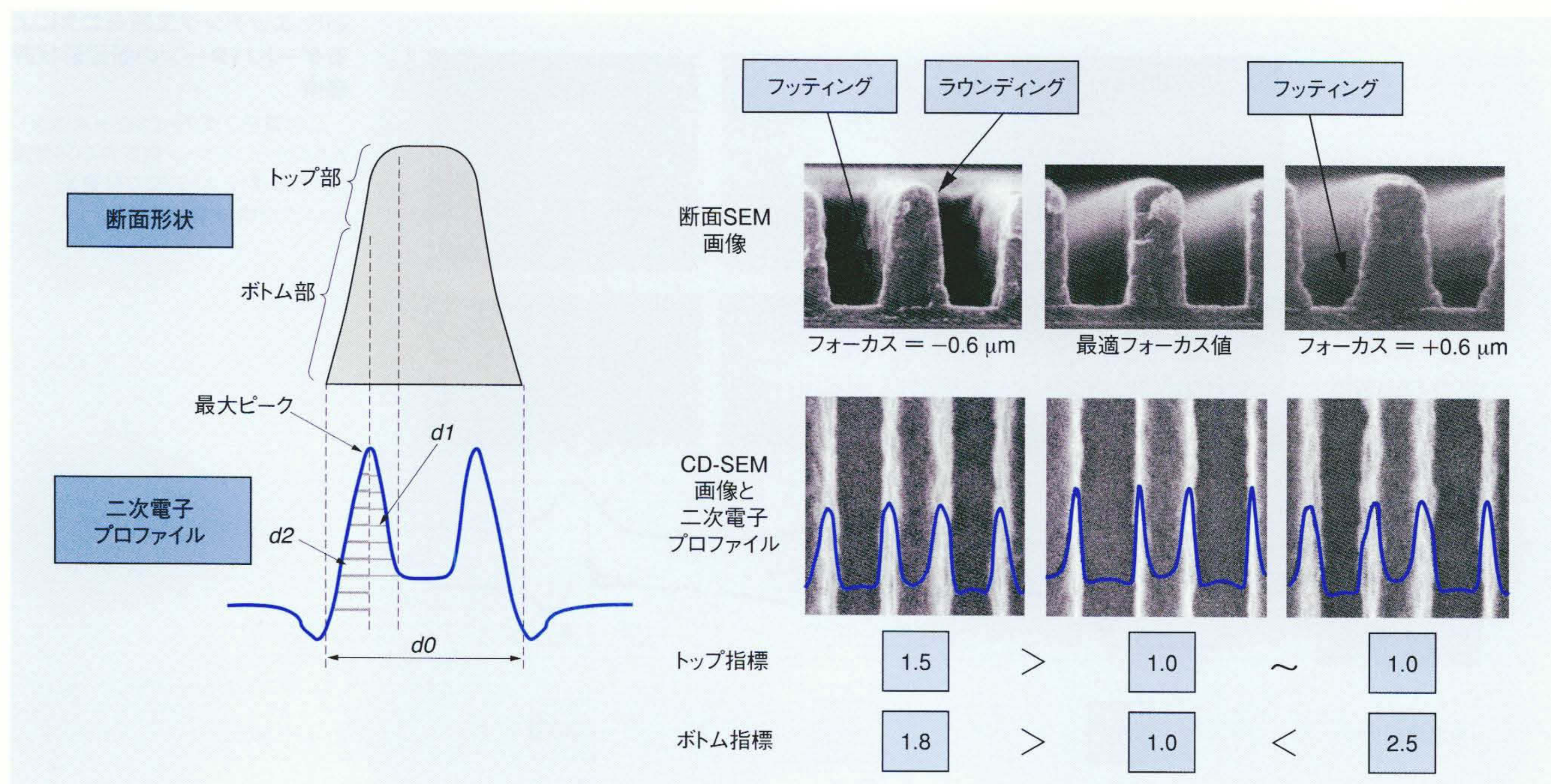
(2) 電子光学系の自動軸調整機能

従来はユーザーが定期的、あるいは像質低下時に手で電子光学系の軸調整を行っていた。S-9360形では、画像処理による自動軸調整機能を搭載し、操作者に依存しない適切な軸調整を短時間で行えるようにした。

(3) 300 mmライン自動化への対応

すでに自動材料搬送システムやプロセスジョブオブジェクトなど、300 mm系SEMI規格に準拠しており、300 mmライン自動化に必要な機能は十分整備されている。

今後は、装置稼動状態監視、装置性能トラッキング、リモート診断機能の対応を進めていく。



注: $d0$ (線幅), $d1$ (トップ指標), $d2$ (ボトム指標)

図9 トップ指標とボトム指標を使ったフォーカスモニタ

二次電子プロファイルのトップ指標とボトム指標を使ってラウンディングとフットイングをモニタすることにより、CD-SEMのトップ・ダウンSEM画像からフォト工程(露光条件)のフォーカス値の誤差を推定することができる。

7 おわりに

ここでは、半導体製造での技術革新に貢献する、新形の測長SEM「S-9360形」について述べた。

S-9360形は、90 nm以降の半導体製造プロセスの市場ニーズにこたえることができる特長を持つ装置であり、65 nmの世代に対応することができる。

日立グループは、微細プロセスへの対応として、(1) 分解能、測長再現性の向上、(2) さらなるレジストシュリンクへの対応、(3) 二次元、三次元計測のブラッシュアップ、(4) APC

技術(測長SEMなどの計測装置により、プロセス変動を検知し、プロセスにフィードバック・フィードフォワードする技術)の導入などに取り組んでいく。また、CoO (Cost of Ownership) のいっそうの向上を図る、ユーザーフレンドリーな装置の開発を進めていく考えである。

参考文献

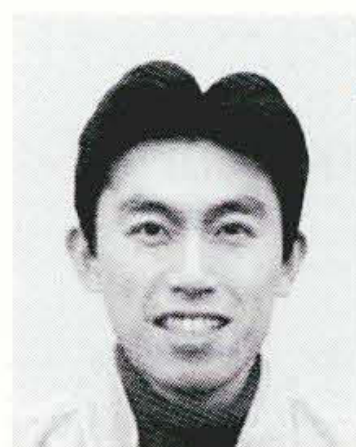
- 1) T. Kudo, et al.: Mechanistic Studies on the CD Degradation of 193 nm Resists during SEM Inspection, J. Photopolymer Sci. Technol., 14(3), 407-417 (2001)

執筆者紹介



川田 洋揮

1986年日立製作所入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 設計・製造統括本部 那珂事業所 エレクトロニクスシステム 第一設計部 所属
現在、電子線装置の設計・開発に従事
日本真空協会会員、American Vacuum Society会員
E-mail: kawada-hiroki @ naka.hitachi-hitec.com



諸熊 秀俊

1991年日立製作所入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 設計・製造統括本部 那珂事業所 エレクトロニクスシステム 第一設計部 所属
現在、電子線装置の設計・開発に従事
E-mail: morokuma-hidetoshi @ naka.hitachi-hitec.com



高見 尚

1985年日立製作所入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 設計・製造統括本部 那珂事業所 エレクトロニクスシステム 第一設計部 所属
現在、電子線装置の設計・開発に従事
E-mail: takami-sho @ naka.hitachi-hitec.com



野副 真理

1986年日立製作所入社、中央研究所 ソリューションLSI開発 センタ 先端技術開発部 所属
現在、電子ビームを用いた半導体の検査・解析技術の開発に従事
応用物理学会会員
E-mail: mnozoe @ crl.hitachi.co.jp