

3次元形状計測手法の開発

山崎 裕一郎*, 阿部 和夫, 木村 浩二, 鶴我 靖子, 野間 孝幸, 岡田 真一,
濱口 晶*, 鈴木 等, 高地 伸夫, 小池 紘民
* (株)東芝セミコンダクター社, (株)トプコン

1.はじめに

半導体製造プロセスの微細化にともない、パターンの二次元寸法（CD）管理だけでなく、高さ、側壁のスロープ角度などの3次元形状計測の必要性が高まってきている。従来、3次元寸法管理はデバイス断面を TEM 等で観察する破壊測長が主であり非破壊で測定精度の良い方法がなかった。そこで我々は非破壊による SEM 観察像から、3次元計測を行なう手法を開発してきた。

画像処理による3次元計測では、2つ以上の方向からの観察像から3次元画像を再構築する方法が一般的である。半導体パターンの線幅測定に広く利用されている電子ビーム測長機（CD-SEM）では、試料ステージを傾斜させるか、あるいは試料に入射する一次電子ビームを傾斜させることによって、傾斜像を得ることが可能である。しかし試料ステージを傾斜させる方法では、スループットの低下や振動の問題があるため、我々は後者のビームを傾斜させる方法を採用し、本地域結集型研究事業において傾斜観察時の分解能の低下を抑制する T-MOL(Tilting and Moving Objective Lens)方式による電子光学系を開発と、取得した傾斜観察像から3次元形状を計測するためのアルゴリズム開発を行ってきた。

本報告ではトプコン製 CD-SEM MI-5080 に静電偏向器を組み込むことにより、当初の目標である傾斜角度 10° で分解能 4nm を上

回る、傾斜角度 10° , 分解能 3nm の像が得られたことと、この装置で取得した画像から、実用性のある計測ができたことを報告する。

2.T-MOL 技術の開発

T-MOL は図1に示すように、対物レンズの収束磁場に『補正場』を重ね合わせることで、偏向器で傾斜された電子ビームの傾斜角度に合わせて対物レンズを電氣的に傾斜・移動させることによりビームが電氣的に傾斜した対物レンズの軸上を通るような電子光学系である。

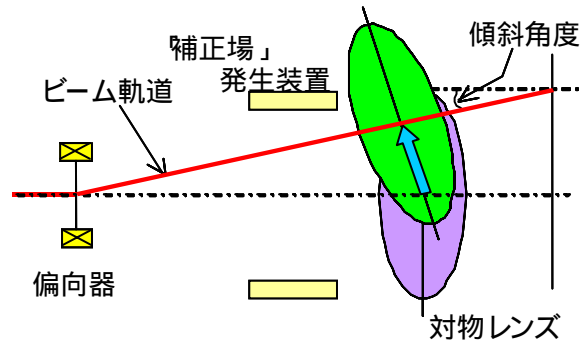


図1 T-MOL の概要

このような電子光学系を実現するための『補正場』は、対物レンズの軸上磁場を $B(z)$ とすれば

$$B(z)w'(z) + \frac{1}{2}B'(z)w(z)$$

で与えられる。ここで、 $w(z)$ は電子ビームの近軸軌道で、 $w(z) = x(z) + iy(z)$ ($I^2 = -1$) である。

このような「補正場」を実現するために、

MI-5080 の対物レンズ先端に静電偏向器を組み込んで実験を行った。当初は4極の静電偏向器を組み込んで傾斜角度 3.1° を達成し、その後シミュレーションに基づく対物レンズおよび静電偏向器の最適設計を行い、図 2 の八極子偏向器を組み込んだ電子光学系で、傾斜角度 10° で分解能 3nm の像が得られることを確認した。コンピュータシミュレーションによる電子光学系の解析と実験結果との比較を図 3 に示す。このグラフから、製造誤差等を考慮すると、シミュレーションと実験結果は良く一致している。



図 2 八極子偏向器外観

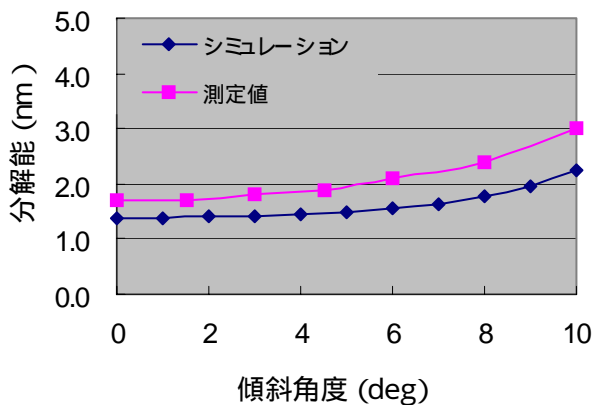
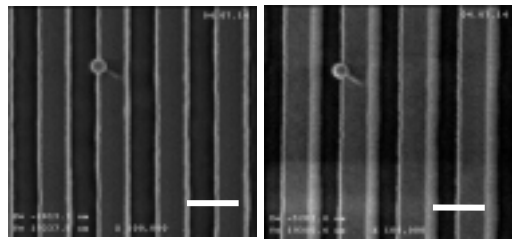


図 3 シミュレーションと実験結果の比較

ライン幅 150nm のフォトリソパターンを用いて傾斜観察を行った結果を図 4 に、フォトリソパターンで、8 方向の傾斜画像を取得した結果を図 5 に示す。図 5 から、どの方向に対しても、同等の画質が得られることを確認した。



(A) トップダウン像 (B) 10° 傾斜像

図 4 T-MOL による傾斜観察像(白線 : 300nm)

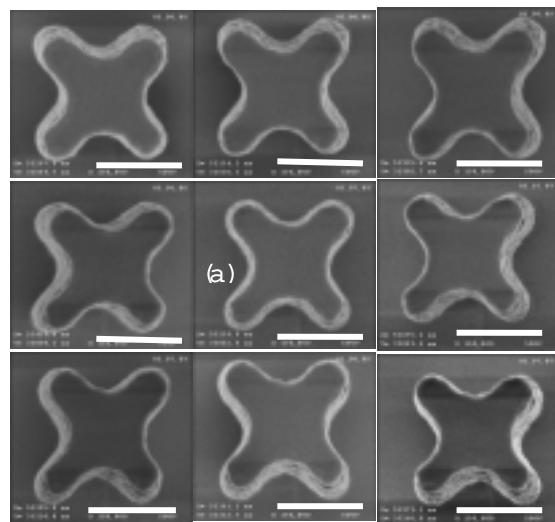


図 5 レジスパターン 8 方向傾斜像
(a) 0deg (トップダウン像)
傾斜角度 5deg (8 方向)
(白線 500nm)

3. 3次元計測アルゴリズムの開発

CD-SEM で得られた傾斜画像から、3次元計測を行うには、

キャリブレーション (倍率/傾斜角度)

画像のステレオマッチング

3次元形状計測 (3次元画像再構築)

の手順で解析を行う必要がある。

3.1 ステレオスコープ法

SEM 像から3次元計測を行う手法は多種多様提案されているが、特に複数枚の画像を用いたステレオスコープ法が知られている。

図 6 にステレオスコープ法の原理を示す。物体 A の任意の特徴点 P(X,Y,Z) は、Y 軸を回転軸として時計と反対周りに θ 回転したとすると、カメラ面では二次元表記になるため点 P は点 P'(x,y)、原点 O は O' で表現することができる。なお、この二次元の座標軸は X 軸を同じく θ 回転させた X' 軸で表記するものとする。この場合、点 P'(x,y) は(2)式で表すことができる。

$$x = X \times \cos\theta + Z \times \sin\theta \quad (2)$$

$$y = Y$$

今、点 P を θ 回転しカメラで得られる点を P1(x₁,y₁)、 $-\theta$ 回転して得られる点を P2(x₂,y₂) とすると次式で表すことができる。

$$x_1 = X \times \cos\theta + Z \times \sin\theta \quad (3)$$

$$y_1 = Y$$

$$x_2 = X \times \cos\theta - Z \times \sin\theta \quad (4)$$

$$y_2 = Y$$

よって物体 A の点 P(X,Y,Z) は、点 P1、P2 の二次元座標が既知であるならば(5)式で表わすことが可能となる。

$$X = (x_1 + x_2) / 2 \cos\theta$$

$$Z = (x_1 - x_2) / 2 \sin\theta \quad (5)$$

$$Y = Y_1 = Y_2$$

この方法により、傾斜角度の分かっている 2 枚の SEM 像を用いれば3次元形状再構築が可能となる。

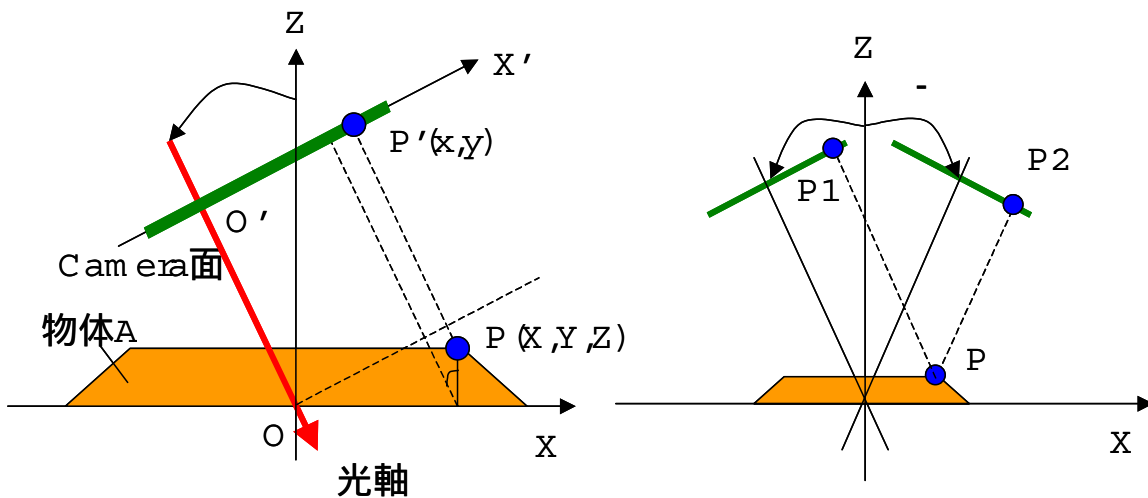


図 6 ステレオスコープ法の原理

3.2 画像のキャリブレーション

画像から計測を行うには、CD-SEM 像の倍率と傾斜角度の正確な値が必要となるため、あらかじめ標準試料を別の方法で測定した結果と、T-MOL での傾斜観察の結果を比較して、キャリブレーションを行う必要がある。今回は適当な標準試料が入手できなかったため、実デバイスの L/S パターン試料のピッチ間隔、高さ、テーパ角（側壁のスロープ角度）を CD-AFM で測定しておき、CD-SEM の 2 枚の傾斜観察像からピッチ間隔と側面幅を求め、CD-AFM の測定データを基準値として、SEM 画像の倍率と傾斜角度を算出した。

測定に使用した試料の CD-AFM 計測結果を図 7 に示す。また、CD-SEM 像のピッチ間隔、側面幅は、図 8 のように元画像を画像処理によりエッジ抽出を行なった後、約 200 箇所測定し、その平均値をとり倍率、傾斜角度を算出した（結果は表 1）。

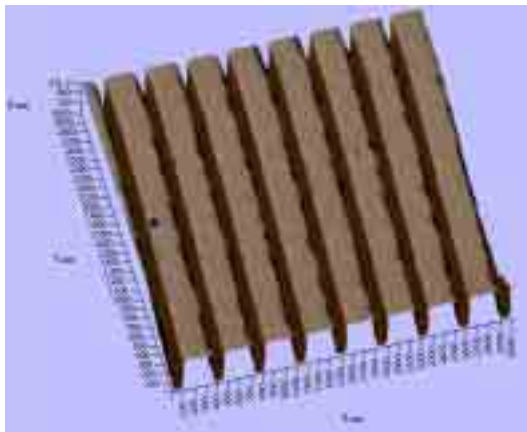


図 7 CD-AFM による試料測定

平均値
ピッチ間隔 : 400.47nm
テーパ角 : 88.15°
高さ : 335.97nm

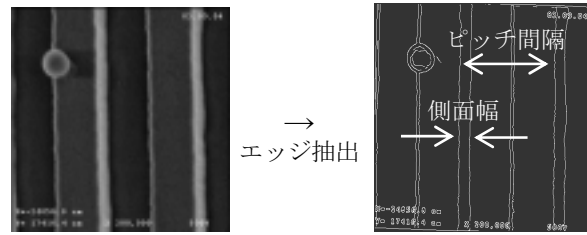


図 8 CD-SEM 画像による測定

元画像からエッジを抽出して測定
⇒ 観察倍率 : 15 万倍, 傾斜角 : 6°

3.3 ステレオマッチング

ステレオマッチングとは、複数枚のステレオ画像を用いて各々の対応点を求める処理をいう。半導体パターンの画像に関しては、視野全体が同じパターンの繰り返しであることが多く、特徴点が少ないためステレオマッチングのアルゴリズムが非常に重要である。我々はマッチング点数を増やすために、従来用いられている相関法に加え、粗密探索法ならびにバックマッチング法を採用した。

粗密探索法は、取得画像を任意の率で圧縮しそれぞれの圧縮率の画像でマッチングを行う方法である。各々の圧縮率の画像毎に相関法を適用し、そこで得られた相関係数の積を求めることで、積の値が大きいものほどマッチングが良い特徴点ということになる。これによりノイズの影響を低減できるためマッチング精度の向上が可能となる。さらには、圧縮率の高い画像から圧縮率の低い画像へと段階的にマッチングを行うことにより、マッチング探索範囲を絞り込めるため解析時間の短縮という利点がある。

バックマッチング法は、マッチングを行う 2 枚の画像について、基準画像と比較対象画像を交互に入れ替え 2 回マッチングを行うことである。これにより mismatching 点を除去することが容易になる。

3.4 計測結果

CD-SEM で得られた 2 枚の傾斜観察像の、キャリブレーション後の倍率, 傾斜角度を表 1 に示す。

	傾斜観察像 1	傾斜観察像 2
倍率	159092	157987
角度(deg)	2.55	6.12

表 1 キャリブレーション後の倍率, 傾斜角度

この 2 枚の画像でステレオマッチングを行ない, L/S パターンの高さ, テーパー角度の計測を行なった。ステレオマッチングによる 3 次元画像構築の結果を図 9 に, また, 画像処理による計測値と CD-AFM による測定値の比較を表 2 に示す。

	CD-AFM	CD-SEM (T-MOL)	差分
高さ (nm)	336.0	333.6	2.4
テーパー角度(deg)	88.2	88.0	0.2

表 2 計測結果

今回 CD-AFM の測定値を基に, 同一試料の SEM 画像の倍率と傾斜角度のキャリブレーション後, 画像処理による 3 次元計測を行った。その結果, 表 2 に示すように画像処理による計測値と CD-AFM の測定結果がほぼ一致していることから, ステレオマッチングによる 3 次元計測が可能であることを検証できた。

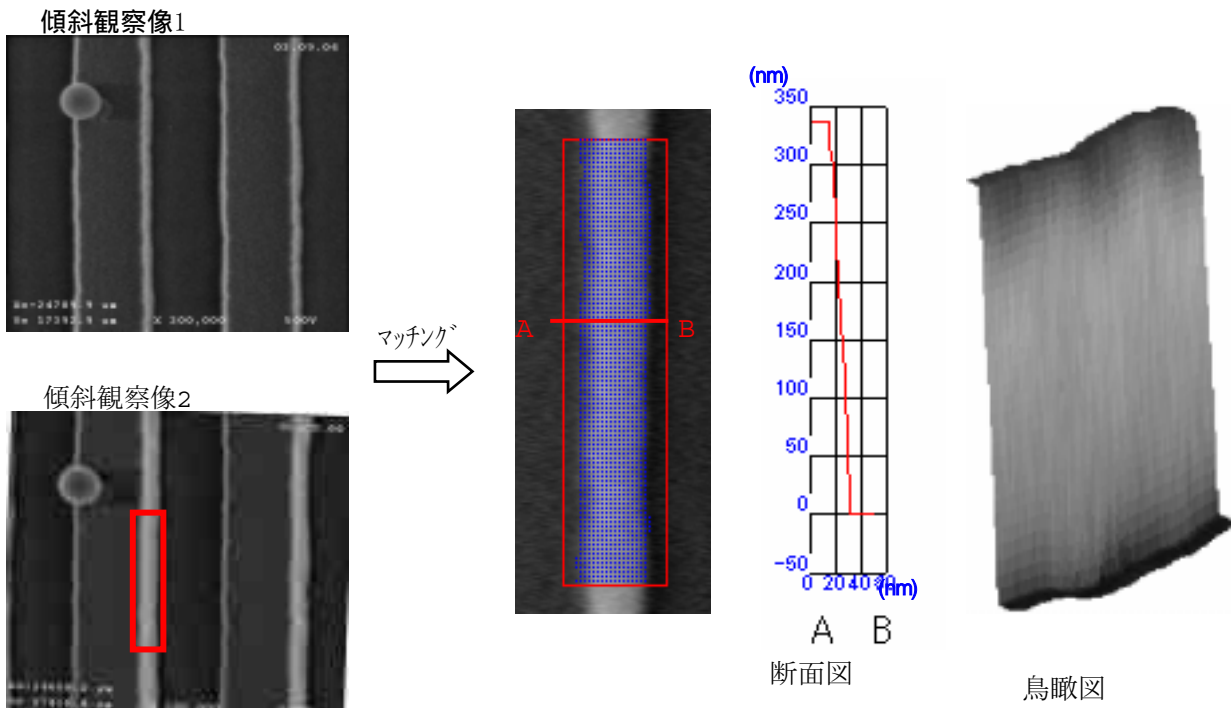


図 9 ステレオマッチングによる三次元画像構築

4.まとめ

CD-SEMでの傾斜観察時における分解能の劣化の問題を解決するため、新対物レンズと八極子偏向器とからなる T-MOL 電子光学系を既存の CD-SEM に搭載し、傾斜角度 $\pm 10^\circ$ で分解能 3nm の傾斜画像を得ることができ、当初の目標である、傾斜角度 10° 、分解能 4nm を達成した。

画像処理の 3次元計測アルゴリズムについては、ステレオマッチングアルゴリズムを改良した結果、半導体試料のマッチング精度上とキャリブレーション技術の併用によって計測精度を向上させることができた。本地域結集型共同研究事業による T-MOL 技術と 3次元形状計測アルゴリズムの開発により、CD-SEM を用いたインラインでの半導体パターンの 3次元形状計測の実現性が見えてきた。今後は、装置の長期安定性の評価、および画像のキャリブレーション技術の確立とユーザインターフェースの開発などを実施し、商品化に向けて装置の完成度を高めて行く予定である。