

H-043

試料傾斜角の異なる複数枚 SEM 画像からの LSI 三次元形状推定
 Three-dimensional reconstruction from electron microscopic tilt series
 using object tracking based on particle filters

林 史也 御堂 義博 中前 幸治
 Fumiya Hayashi Yoshihiro Midoh Koji Nakamae

1. はじめに

LSI(Large-Scale Integration)の微細化に伴って、製造工程を管理するための計測技術に要求される精度がますます高まっている[1]。例えば、配線幅が細くなると、レジストパターンのアスペクト比が高くなり、パターンの倒れや、側壁・高さ・角の形状に不均一(ラフネス)が生じやすくなる。また、更なる集積化・高速化のために、Fin-FET(Fin-Field Effect Transistor)などの三次元的な立体構造を有する LSI デバイスが注目されている。従って、top-view の SEM(Scanning Electron Microscope)画像に基づいた従来の 2D 計測だけではなく、新たな立体的な形状計測が求められている。

一方、SEM 画像から試料形状を予測するための手法として、近年 MBL(Model-Based Library)法が報告されている[2]-[4]。MBL 法は、あらかじめ様々な形状に対する二次電子シミュレーションを実施し、形状と SEM 信号のコントラストパターンを対にしてデータベース化しておく。その後、実際に観測した画像に近いパターンをデータベースから抽出し(マッチング)、試料形状のパラメータを推定する方法である。しかし、形状計測に関する要求精度が高まると、微小な形状変化に対するシミュレーションを行う必要があり、処理時間の増加や、データベース探索空間の増大に伴う精度の劣化が懸念される。

そこで本研究では、立体構造を有する微細な試料を三次元的に計測することを目的として、MBL 法を拡張し、試料傾斜角の異なる複数枚の SEM 画像から三次元立体形状推定を試みる。傾斜によるデータベース規模の増加を抑えるために、異なる傾斜角の画像間で特徴的な点周辺のみを MBL 法を適用する。異なる傾斜角画像間の特徴点追跡には、パーティクルフィルタを用いる[5]。尤度関数に SEM コントラストの特徴を、遷移関数に傾斜角度による特徴点の移動方向・量などを考慮する。本手法を SEM モデル画像に適用し、有効性を示す。

2. 提案手法

今回モデルとして考慮したレジストパターン形状を図 1 に示す。図 1(a)に示した左右のボトム位置 x_0, x_3 、トップ位置 x_1, x_2 、パターンの高さ z 、図 1(b)に示したトップの丸みの程度 p を試料形状パラメータとして推定する。図 1(c)の SEM 画像に示すように、奥行き方向は均一と見なす。このモデルに対する提案手法の手順を図 2 に示す。パーティクルフィルタによる特徴点追跡と MBL 法による形状推定を順次適用する。データベースには、 p のみ変化さ

せた構造に対して、すべての傾斜角 $\theta_i = 10i$ [degree] ($i = -6, -5, \dots, 6$) についてトップ周辺のみシミュレータした結果を格納した。ボトム位置は p との相関が低いためパーティクルフィルタによる特徴点追跡結果から位置を決定し、トップ位置に関してのみ、MBL 法を用いて詳細な形状推定を行う。以下に手順の詳細を述べる。

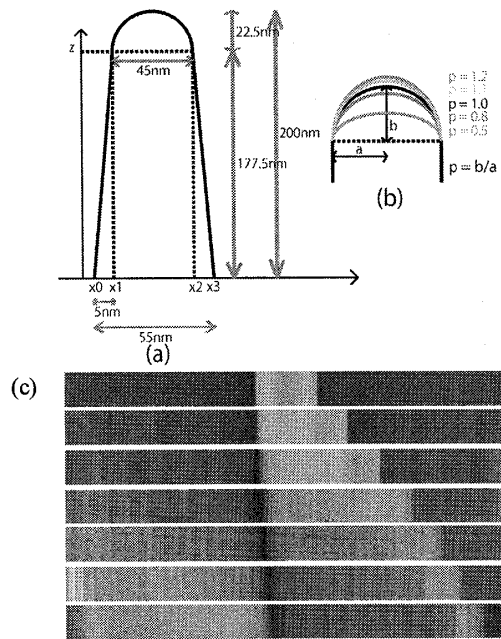


図 1 試料構造とパラメータ：(a)基準となるパターン寸法、(b)トップの丸み係数、(c) (a)の傾斜 SEM 画像 $\theta_0 \sim \theta_6$

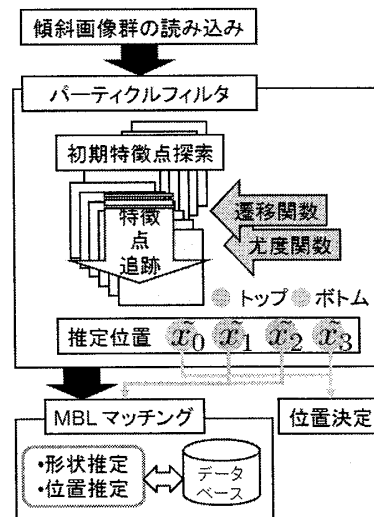
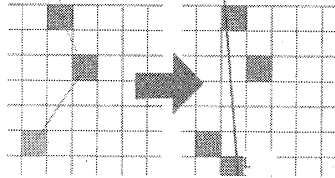


図 2 提案手法の手順

大阪大学情報科学研究科
 Graduate School of Information Science and Technology,
 Osaka University

2.1 初期特徴点探索

傾斜角 θ_0 の画像から初期特徴点を決定する。SEM 画像の原理より、トップは明るく、ボトムは暗く現れる。そこで、まず各行のラインプロファイルから極大値・極小値を特徴点候補として検出する。次に、図3に示すように、トップ2点、ボトム2点の候補点をそれぞれ下方向に連結し、最小二乗法により近似直線 L を求める。この長さが定めた閾値以上であれば L 上の点を初期特徴点とする。



(a) 次候補探索範囲 (b) 近似直線

図3 初期特徴点探索

2.2 パーティクルフィルタによる特徴点追跡

パーティクルフィルタによる特徴点追跡を行い、パターン中の位置 x_0, x_1, x_2, x_3 を推定する(マイナス方向の傾斜は左ボトムが、プラス方向の傾斜は右ボトムが画像に現れなくなるため除く)。遷移関数 $p(x_i|x_{i-1})$ は高さと同様に傾斜による特徴点移動量から定めた。傾斜角 θ_i でのボトム位置 $A_{xi}(x_0 \text{ or } x_3)$ 、トップ位置 $B_{xi}(x_1 \text{ or } x_2)$ 、傾斜0度と θ_i から推定されたトップ位置の高さ B_{z0}^i とすると、傾斜0度から θ_i までの高さ推定値 B_z^i が式(1)、(2)で与えられる。

$$B_{z0}^i = \frac{(B_{xi} - A_{xi}) - (B_{x0} - A_{x0}) \cos \theta_i}{\sin \theta_i} \quad (1)$$

$$B_z^i = \frac{i-1}{i} B_z^{i-1} + \frac{1}{i} B_{z0}^i \quad (2)$$

B_z^i の三角関数から遷移先を予測しパーティクルを発生させる。構造高さは追跡毎に更新される。次に、リサンプリングにおける重み(尤度)は、図4に示すようにラインに垂直な向き M に沿った周辺輝度情報から定めた。尤度 w_k は特徴点における輝度 I (ボトムの場合は $w_1 = 255 - I$) と輝度勾配情報を示し、これらの尤度を掛け合わせ重み W_i を更新する。フィルタは $\theta_0 \sim \theta_6$, $\theta_0 \sim \theta_6$ に順次適用する。

$$W_i = W_{i-1} \times \prod_{k=1,2,3} w_k$$

$$w_1 = I, w_2 = |\phi_i^1 + \phi_i^2|, w_3 = \max(\phi_i^{1-1}, \phi_i^{2-1}) \quad (3)$$

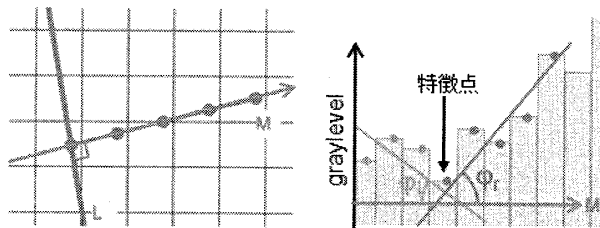


図4 勾配情報と尤度

2.3 MBL法による形状推定

パーティクルフィルタで得られたトップ位置 (x_1, x_2) 周辺において MBL 法による形状推定を行う。マッチングの類似度として正規化相互相関を用いる。以下の手順で形状パラメータを推定する。

まず、丸みパラメータ p を推定する。各傾斜画像に対して、データベース中の SEM 信号のずれ幅と信号長(スケール)をある一定幅内で変化させながら、類似度が最も高い丸み係数に投票する。次に、全傾斜角を通して最も多く投票されたパラメータを持つ信号を丸み推定値とする。続いて、推定された丸み係数の信号セットを用いて、類似度に基づいてトップ位置推定値 (x_1, x_2) を更新する。

3. 実験結果

図1(c)の傾斜 SEM 画像13枚(-60~60度の間を10度間隔で傾斜、幅256[pixel]、1.53[nm/pixel])に提案手法を適用した。表1にトップ位置周辺とデータベース信号との類似度を、表2に各傾斜像に対する真値と推定値の位置誤差を示す。特徴点を得られれば、2枚の異なる傾斜角 θ_i, θ_j の画像から高さ z が次式で与えられる。

$$z = \frac{(B_{xi} - A_{xi}) - (B_{xj} - A_{xj}) \cos(\theta_i - \theta_j)}{\sin(\theta_i - \theta_j) \cos \theta_j} + (B_{x0} - A_{x0}) \tan \theta_j$$

すべての傾斜角の組合せから推定された高さの平均値は175.48nmであり、真値との誤差は2.02nmであった。

4. まとめ

実験により、高さ成分の推定誤差は小さく提案手法の有効性を示すことができた。トップ部分のみで計測を行うことができるため、従来の全領域に対する MBL 法よりも速度の向上が期待できる。今後さらに詳細な計測パラメータへの対応を図る予定である。

なお、本研究は(独)科学技術振興機構 先端計測分析技術・機器開発事業により得られた結果である。

表1 各傾斜像に対するデータベース信号との類似度

$p \backslash \theta_i$	0 [deg]	10	20	30	40	50	60
0.5	0.151	0.866	0.911	0.781	0.914	0.911	0.928
0.8	0.689	0.669	0.858	0.926	0.894	0.824	0.805
1.0	0.987	0.974	0.960	0.935	0.911	0.824	0.915
1.1	0.955	0.943	0.901	0.853	0.713	0.875	0.897
1.2	0.934	0.943	0.930	0.929	0.794	0.795	0.739

表2 特徴点の測定誤差

傾斜角 [deg]	Δx_0 [nm]	Δx_1	Δx_2	Δx_3
-60		-0.373	-1.468	-1.644
-50		-4.175	-5.584	-1.78
-40		-0.994	-2.672	-0.832
-30		0.724	-1.173	-0.306
-20		-1.622	-3.68	0.578
-10		0.103	-2.055	1.863
0	-2.922	0.111	-2.08	3.093
10	-3.594	2.055	-0.104	
20	-2.054	2.194	0.091	
30	-1.39	-0.358	-2.255	
40	-0.402	1.141	-0.537	
50	0.831	2.52	1.112	
60	0.131	1.486	0.373	

参考文献

[1] International Technology Roadmap for Semiconductor (ITRS) 2009.
 [2] J. S. Villarrubia et al., "Dimensional Metrology of Resist Lines using a SEM Model-Based Library Approach," SPIE 5375, 199 (2004).
 [3] C. G. Frase et al., "Model-based SEM for dimensional metrology tasks in semiconductor and mask industry," J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 183001 (2009).
 [4] N. Yasui et al., "Application of model-based library approach to photoresist pattern shape measurement in advanced lithography," SPIE Advanced Lithography, 7638, pp. 7638-95 (2010).
 [5] 八木康史, 斎藤英雄(編), "コンピュータビジョン最前線ガイド1", アドコムメディア (2009).