設計データに基づく測長 SEM 計測レシピの自動生成*

宮 本 敦** 西 浦 朋 史***

Automatic Generation of Measurement Recipe for CD-SEM Using Design Data

Atsushi MIYAMOTO and Tomofumi NISHIURA

Critical Dimension Scanning Electron Microscope (CD-SEM) is widely used as a measurement tool of semiconductor patterns. It is necessary to set an image processing range for the measurement and to register the setting with a recipe every evaluation point. With increase of the number of the measurement points by the pattern miniaturization, burdens of the recipe creation increased. We propose a technique to generate the measurement recipe automatically based on design data of the pattern layout. The proposed method extracts all measurable pattern candidates by evaluating the positional relationship between each segment pair of design data. Next, the most suitable pattern for the measurement is decided relatively from the candidates. The proposed method was verified with 662 evaluation points and correct ratio of recipe generation and measurement using CD-SEM was 100% (662/662) compared with a manual operation. The recipe generation time for all evaluation points by the proposed method was 8 minutes. A large time shortening can be realized whereas the processing time of the manual operation was 3.5 hours.

Key words: CD-SEM, semiconductor device, automation, design data, measurement box

1. 序 論

半導体市場では民生機器の多機能化・高性能化を実現すべく、回路パターンの微細化が進んでいる¹⁾。フォトリソグラフィ工程では、微細化を実現するための超解像露光技術として、光近接効果補正 (Optical Proximity Correction : OPC) や光源マスク同時最適化 (Source Mask co-Optimization : SMO) が導入されてきた²⁾³⁾。一方、これに伴うフォトマスク形状の複雑化は転写されるパターン形状のシミュレーション予測を困難にし、特にデバイス開発時におけるパターン寸法の評価点数を飛躍的に増加させた。評価点としては、OPC 最適化のためのテストパターンや EDA (Electronic Design Automation) ツールから出力されるホットスポットと呼ばれるデバイス不良が発生しやすい危険箇所が挙げられ、評価点数は数百ないし数千点に及ぶこともある。

半導体デバイスのパターン寸法計測には測長 SEM (Critical Dimension Scanning Electron Microscope : CD-SEM) が広く用いられている⁴⁾⁵⁾。測長 SEM は評価点の電子顕微鏡画像からパターン寸法をサブナノメートルオーダーで計測する装置である。一方、高精度な寸法値を得るためには対象パターンを高倍率・高精細に撮像し、適切な画像計測を行う必要がある。このような撮像シーケンスと画像計測方法はそれぞれ撮像レシピ、計測レシピと呼ばれる設定ファイルにより評価点毎に指定する。しかしながら、評価点数の増加に伴ってレシピ作成作業は SEM オペレータにとって大きな負担となった。また、作業中は SEM を占有するため、SEM 装置の稼働率低下をまねくことになった。

こうした検査工程での新たな課題に対処するため、我々は回

路パターンの設計データを活用したレシピ生成のオフライン化 (SEM 撮像不要化)・自動化の取り組みを推進している。本論文では、設計データのパターンレイアウト情報を基に、計測レシピをオフラインで自動生成する手法を提案する。文献 6) の撮像レシピ自動生成技術と提案法を併せることで、撮像から計測に至る一連の作業が自動化され、評価点の指定だけで、膨大な評価点に対する自動測長が実現する。

半導体製造ラインの早期立ち上げ、安定生産にはパターンの検査・計測技術が欠かせない。一方、民生機器の短命化によって半導体デバイスの多品種少量生産の傾向が強くなり、レシピ生成の頻度と負荷は増大している。そのため、測長 SEM の自動化技術は、半導体製造を支える要素技術として重要である。

本論文の構成は次の通りである。2. において、測長 SEM における撮像・計測レシピについて整理した後、提案する計測レシピの自動生成アルゴリズムについて詳細を説明する。3. は検証結果、4. はまとめである。

2. 計測レシピ自動生成

2.1 撮像・計測レシピ

ウェーハ上の任意の評価点 (Evaluation Point : EP) を高倍率・高精細に撮像するための測長 SEM の撮像シーケンスについて図 1 を用いて簡単に説明する。SEM オペレータは評価点 (図 1 中の ③) の近傍から、アドレッシング点 (以降、AP と呼ぶ) と呼ばれる撮像ずれ推定用のユニークなパターン (図 1 中の ①) と、オートフォーカス点 (以降、AF と呼ぶ) と呼ばれる収束電子ビームの合焦条件算出用のパターン (図 1 中の ②) を予め選択し、撮像レシピに登録する。測長 SEM は撮像レシピに従い、AP、AF の撮像後に評価点を撮像する。すなわち、AP で求めた撮像ずれをキャンセルするように評価点に視野移動し、AF で求めた合焦条件で評価点を撮像する。撮像が成功するためにはそれぞれの処理に適したパターンを AP、AF として登録する必要があり、従来、撮像レシピ生成は SEM 装置

* 原稿受付 平成 27 年 4 月 14 日

掲載決定 平成 27 年 5 月 29 日

** 正 会 員 (株) 日立製作所 研究開発グループ
(神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292)

*** 日立アロカメディカル (株) (東京都国分寺市東恋ヶ窪 3-1-1)

Fig.1 Imaging sequence

や画像処理に関する知識が要求される作業であった。これに対し、文献 6) では設計データを基に AP, AF を自動選択する手法を提案している。

次に、前述の撮像シーケンスにより撮像した評価点の SEM 画像からパターン寸法を求める画像計測について説明する。図 2 (a) にラインパターンを撮像した評価点の SEM 画像を示す。計測対象となるパターン寸法には様々なバリエーションが存在するが、ここではパターンの線幅 (図 2 (a) 中の ①) を計測する例を取り上げる。パターン両端の配線エッジをある探索範囲 (図 2 (a) 中の ②) でそれぞれ検出し、そのエッジ間の距離を計測することで線幅を求めることができる。エッジ位置は露光条件の変動等に起因するパターン変形によって移動する可能性があるため、このような探索範囲を設ける必要がある。SEM 画像上での配線エッジは、いわゆるエッジ効果により顕在化され、ホワイトバンドとして観測されるため、数ピクセルオーダーでの位置検出には都合がよい⁷⁾⁸⁾。一方、低 S/N な SEM 画像においてサブピクセルオーダーで再現性の高いエッジ位置を求めることは困難である。また、露光パターンは LER (Line Edge Roughness) と呼ばれる微小なうねりを含むことがある⁴⁾。そこで、ある積算範囲 (図 2 (a) 中の ③) で信号プロファイルを加算平均し (同図では y 方向に加算平均)、得られた平均プロファイルからエッジ検出を行う。上記の探索・積算範囲で定義される画像処理範囲を以降、測長 box (図 2 (a) 中の ④) と呼ぶ。また、測長 box 間の中心を計測点 (Measurement Point: MP) と呼ぶ (図 2 (b) 中の ⑤)。一般に計測対象パターンを画像の中心に捉えるように評価点は設定されるため、計測点と評価点の中心 (同図の画像中心) はおよそ一致する。測長 box の位置・形状と測長 box 内での画像処理方法は計測レシピに登録し、測長 SEM は計測レシピに従って画像計測を行う。

従来、測長 box の配置は評価点毎に SEM 画像上の計測対象パターンに合わせて行っていた。そのため、撮像レシピの自動生成により撮像の自動化を実現しても、計測レシピの生成がボトルネックとなり、測長 SEM の立上げ全体に要するコストを劇的に減少させることは困難であった。

2.2 計測レシピ自動生成アルゴリズム

2.2.1 概要

評価点の座標と設計データから、前節で述べた計測レシピを自動生成する手法を提案する。すなわち、図 2 (a) で説明した SEM 画像上での測長 box の配置を、図 2 (b) に示すように設計データに対して行うことで、計測レシピ生成のオフライ

(a) Long boxes in SEM image

(b) Long boxes in design data

Fig.2 CD measurement (line width)

ン化、自動化を実現する。設計データにおいて回路パターンの輪郭線は線分の座標データとして表現され、図 2 (b) では頂点 $p_1 \sim p_4$ からなる長方形によりラインパターンが表現されている。設計データの活用により、実際にウェーハを撮像しなくても、パターンのレイアウト情報を得ることができる。一方、露光条件や光近接効果の影響によって実パターン形状は変化するため、設計データに対して形状差がある。線幅の違いや角の丸まり、ライン端の後退等は代表的な形状差である。例として、図 2 (a) 中の ① に示す実パターンの線幅に比べて、図 2 (b) 中の ①' に示す線幅の設計寸法は大きい。設計データの活用においてはこのような不確定な形状差が発生することを考慮する必要がある。

以降の説明で用いるため、設計データにおける線分あるいは頂点の方向を下地からパターン内部に向かう方向と定義する。図 2 (b) において線分 p_1-p_2 , p_2-p_3 , p_3-p_4 , p_4-p_1 の方向はそれぞれ、右、上、左、下であり、頂点 $p_1 \sim p_4$ の方向はそれぞれ、右下、右上、左上、左下である。計測時は評価点の SEM 画像と設計データとをマッチングし、両者の相対的な位置関係を求めることにより、設計データに対して設定した測長 box を SEM 画像に対して配置することができる。SEM 画像と設計データとのマッチングについては文献 9) 等の手法を用いることができる。

図 2 は計測の一例であり、提案法においては計測バリエーションとして後述する 3 つの測長 box (Long, Short, Corner),

Fig.3 Short boxes in design data

Fig.4 Corner boxes in design data

3つの計測寸法 (Line, Space, Pitch) を扱う。提案法は計測可能な計測候補をルールベースの判定によって全て抽出した後、抽出候補間の相対評価により解を一意に決定する。これにより、評価点内に複数の計測候補が存在する場合も、その中からより適切な解を選択することができる。

2.2.2 アルゴリズム詳細

計測レシピに登録する測長 box の位置・形状と測長 box 内での画像処理方法を決定するアルゴリズムを提案する。以下、任意の評価点における具体的な処理フローについて説明する。

Step 1: 評価点と設計データの入力

入力情報として評価点の座標と設計データを与える。設計データは評価点の撮像範囲で切出す。なお、提案法で扱う設計データのパターン輪郭線は x あるいは y 方向の線分とする。

Step 2: 測長 box の候補抽出

設計データ内の線分集合 $\{s_a\}$ ($a \in R_s, R_s$: 線分の ID 集合) から、測長 box を配置可能な線分あるいは線分の組み合わせを抽出する。ただし、評価点の撮像範囲の端部に近い線分はエッジ検出が困難なため、抽出対象から除外する。下記、3種類の測長 box を考え、各条件を満たすものを全て抽出する。

Step 2-1: Long box 抽出

図 2 (b) で説明したように、画像処理範囲内でパターンエッジが x あるいは y 方向に直線的に延びており、エッジが延びる方向に積算したプロファイルから平均的なエッジ位置を検出する測長 box を Long box と呼ぶ。計測対象である線分 p_1-p_2 あるいは線分 p_3-p_4 の一部に対応する SEM 画像上のエッジを検出する。

線分集合 $\{s_a\}$ に含まれる線分 s_i ($i \in R_s$) が下記条件を満たす場合、 s_i を計測対象線分として Long box 候補に加える。Long box の方向は線分 s_i の方向とする。

条件 1: 線分 s_i の長さ $l_{s,i}$ が $L_{\min}^{(\text{long})}$ 以上。

Fig.5 Measurement type

Long box において、パターンは積算方向に直線的に延びている必要があり、 $L_{\min}^{(\text{long})}$ はその最低線分長を定めるパラメータである。

Step 2-2: Short box 抽出

図 3 に示すように線幅の狭いパターンの端部は露光時の光近接効果により一般に形状が丸まる。このようなパターンの端部を安定に検出するためには、丸まりに沿って抽出した複数の輪郭点に対する曲線フィッティングが有効である。同図の左側の測長 box 1 において計測対象線分は p_2-p_3 とその隣接する線分 p_1-p_2 , p_3-p_4 の一部である。図 3 に示したこのような測長 box を、以降、Short box と呼ぶ。

線分集合 $\{s_a\}$ に含まれる繋がった 3 線分の組み合わせ (s_i, s_j, s_k) ($i, j, k \in R_s$) が下記条件を満たす場合、同 3 線分を計測対象線分として Short box 候補に加える。Short box の方向は中央の線分 s_j の方向とする。

条件 2: 3 線分 s_i, s_j, s_k の長さ $l_{s,i}, l_{s,j}, l_{s,k}$ がいずれも $L_{\min}^{(\text{meas})}$ 以上、かつ、 $l_{s,j}$ の長さは $L_{\min}^{(\text{long})}$ より短い。

条件 3: 2 線分 s_i, s_k の線分方向が異なる (3 線分が階段形状でない)。

ここで、 $L_{\min}^{(\text{meas})}$ は計測可能な最低線分長を定めるパラメータである。

Step 2-3: Corner box 抽出

パターンの端部と同様、図 4 に示すようにパターンの角も一般に形状が丸まるため、エッジ検出においては曲線フィッティングが有効である。同図の左側の測長 box 1 において計測対象線分は p_1-p_2 , p_2-p_3 の一部である。図 4 に示したこのような測長 box を、以降、Corner box と呼ぶ。

線分集合 $\{s_a\}$ に含まれる繋がった 2 線分の組み合わせ (s_i, s_j) ($i, j \in R_s$) が下記条件を満たす場合、同 2 線分を計測対象線分として Corner box 候補に加える。Corner box の方向は 2 線分を結び頂点 p_2 の方向とする。

条件 4: 2 線分 s_i, s_j の長さ $l_{s,i}, l_{s,j}$ がいずれも $L_{\min}^{(\text{meas})}$ 以上。

条件 5: 線分 s_i, s_j は共に Short box 候補における中央の計測対象線分ではない。

Step 3: 計測寸法の候補抽出

Step 2 で抽出した測長 box の候補群 $\{b_c\}$ ($c \in R_b, R_b$: 測長 box 候補の ID 集合) から、計測可能な 2 つの測長 box の組み合わせ (b_t, b_u) ($t, u \in R_b$) を計測寸法の候補として抽出する。2 つの測長 box の方向の組み合わせにより、3 種類の計測寸法に分類する。これを、Line, Space, Pitch と呼び、それぞれ下記条件 6~8 を満たすものとする。Line, Space, Pitch の例を、それぞれ図 5 (a)~(c) に示す。

条件 6: 計測寸法の両端の測長 box の方向が正対。

条件 7: 計測寸法の両端の測長 box の方向が背反。

条件 8: 計測寸法の両端の測長 box の方向が同一。

ここで、Short box と Corner box との組み合わせに限り、条件 6~8 における Corner box の方向は 2 つの計測対象線分のいずれの方向でもよいとする。また、Long box と Corner box の組み合わせは計測対象となるケースがないため除外する。

Step 4: 測長 box の形状決定

Step 3 で抽出した計測寸法の各候補において、それぞれ 2 つの測長 box の形状を決定する。具体的には、図 2 (b), 図 3, 4 に示した測長 box 1 におけるエッジの探索範囲 $d_2 \sim d_{11}$, 信号プロファイルの積算範囲 d_1 の決定である。測長 box の形状は、次の条件 9~11 を満たした上で可能な限り大きく設定する。これにより、設計データと実パターンの形状が乖離しても、多少であれば測長 box 内にエッジを捉えることができる。

条件 9: 測長 box の境界線は計測対象外の線分から距離 D_{seg} 離す。また、測長 box の境界線は一連の計測対象線分の両端の頂点から距離 D_{corner} 離す (図 2 (b) の p_1, p_2 , 図 3 の p_1, p_4 , 図 4 の p_1, p_3 が測長 box 1 における一連の計測対象線分の両端の頂点)。

条件 10: 探索範囲と積算範囲はそれぞれ $D_{\text{max}}^{(\text{search})}$, $D_{\text{max}}^{(\text{integ})}$ 以下。

条件 11: Short box において測長 box の方向に直交する方向の 2 つの探索範囲 (例えば、図 3 の d_6, d_7) は同じ大きさ。また、Corner box においてパターン内の 2 つの探索範囲 (例えば、図 4 の d_8, d_9) とパターン外の 2 つの探索範囲 (例えば、図 4 の d_{10}, d_{11}) はそれぞれ同じ大きさ。

条件 9 において、 D_{seg} は測長 box と計測対象外の線分との間隔を定めるパラメータであり、形状変形により計測対象外の線分が測長 box 内に含まれるのを防ぐ。例えば、図 4 の測長 box 1 の右端は線分 $p_4 \sim p_5$ から D_{seg} 離れている。また、 D_{corner} は測長 box と計測対象外の頂点との間隔を定めるパラメータである。コーナ部は実パターンにおいて丸まり等の形状変形が起きやすく、計測対象外のコーナ部が測長 box 内に含まれるのを防ぐ。例えば、図 4 の測長 box 1 の下端は頂点 p_1 から D_{corner} 離れている。条件 10 において、 $D_{\text{max}}^{(\text{search})}$, $D_{\text{max}}^{(\text{integ})}$ は探索範囲と積算範囲の上限を定めるパラメータである。

Step 5: 計測寸法の決定

計測寸法の候補群 $\{m_s\}$ ($s \in R_m$, R_m : 計測寸法の候補群の ID 集合) の中から、最終的な計測寸法 m_{s^*} を次式により決定する。

$$s^* = \arg \max_{s \in R_m} (E_s)$$

$$E_s = w * N_1(E_{1,s}) + (1 - w) * N_2(E_{2,s}) \quad (1)$$

$$N_e(E) = (E_{\text{max},e} - E) / (E_{\text{max},e} - E_{\text{min},e})$$

ここで、 E_s は s 番目の計測寸法の候補の良否を判定する指標値であり、二つの要素指標値 $E_{1,s}, E_{2,s}$ から計算される。 $E_{1,s}$ は s 番目の計測寸法の候補における計測点 (図 2 (b) 中の ⑤) と評価点の中心 (同図中の画像中心) との距離であり、 $E_{2,s}$ は測長 box 間の距離 (同図中の ①') である。共に小さい程、計測寸法に適していると考えられる。 $N_e(E)$ は指標値 E の最良値を 1, 最悪値を 0 に正規化する関数であり、 $E_{\text{max},e}, E_{\text{min},e}$

Table1 Processing condition

Size of evaluation point	900nm
$L_{\text{min}}^{(\text{long})}, L_{\text{min}}^{(\text{meas})}$ in condition 1 and 2	100nm, 20nm
$D_{\text{seg}}, D_{\text{corner}}$ in condition 9	30nm, 30nm
$D_{\text{max}}^{(\text{search})}, D_{\text{max}}^{(\text{integ})}$ in condition 10	100nm, 250nm
w in eq. (1)	0.7
$E_{\text{max},1}, E_{\text{min},1}$ in eq. (1)	900nm, 0nm
$E_{\text{max},2}, E_{\text{min},2}$ in eq. (1)	900nm, 0nm

は e 番目の要素指標値の最大値, 最小値である。また、 w は要素指標値間の重みである。

3. 検証実験

提案法の有効性を検証するため、提案法による計測レシピの自動生成、ならびに測長 SEM 実機での撮像・計測実験を行った。検証に用いたデータは、ロジックパターン、テストパターンを含む計 662 点の評価点である。表 1 に本実験において用いた提案法の処理パラメータを示す。エッジ探索範囲等のパラメータは、露光条件や光近接効果により発生しうる最大のパターン変形量を見積って設定した。検証データに対する最適値を厳密に求めたわけではなく、今後、良好な結果が得られない場合は積極的にパラメータを最適化することも考えられる。また、実機評価では文献 6) の手法により撮像レシピに関しても設計データから自動生成を行った。これにより、評価点の指定と設計データの入力だけで自動測長を実現することができる。

結論として、提案法による計測レシピの自動生成の成功率は 100% (662 / 662) を達成した。正解判定は、SEM オペレータが手動で作成した計測レシピと同等であるかという観点から目視で行い、オペレータの作業が提案法により代替可能であることを確認した。また、実際の画像計測においてもエッジ誤検出・未検出等の失敗例はなく、計測成功率 100% を達成した。図 6 (a)~(g) に代表的な評価点を示す。同図の上段、下段はそれぞれ評価点における設計データと SEM 画像であり、提案法により配置した測長 box と計測寸法を重ねて表示している。図 6 (a)~(c) は計測寸法の種類が、それぞれ Line, Space, Pitch の例である。3 者のパターンレイアウトはほぼ同一であり、 x 方向の撮像位置のみがシフトしているが、計測中心と評価点の中心が近づくように計測寸法の種類を変えて Long box を配置している。また、同図 (a), (d), (e) は線幅の異なる Line の計測例であるが、どの Long Box も計測対象とすべき線分のみを含むように生成されており、線幅の違いに合わせて適切に Long box を配置していることが分かる。同図 (f), (g) はそれぞれ Short box, Corner box の配置例である。共に設計データと実パターンの形状乖離が大きい例であるが、実際の画像計測において計測対象エッジを検出することができた。パターン形状の変形を見込んで、他の線分と干渉しない範囲で余裕のある測長 box を配置することで、形状乖離に対してロバストな計測を実現している。

図 7 に全評価点 (662 点) に対する撮像・計測レシピの作成時間を示す (CPU: Intel Core2 Duo 2.66GHz)。同図左のグラフは従来法として文献 6) の手法により撮像レシピのみ自動生成した場合の処理時間であり、約 3.5 時間を要する。内訳は、撮像レシピの自動生成に約 7 分 (同図中の ①)、計測レシピ生成用の評価点の SEM 画像撮像に約 40 分 (同図中の ②)、計測

Fig.6 Examples of generated measurement boxes (Box type/CD type)

Fig.7 Processing time

レシピのマニュアル生成に約2.8時間(同図中の③)であった。③に関しては1点に要する時間を15秒として求めた概算値である。本作業を全て手作業で行った場合、作業時間は10時間弱にも及ぶとの見積りから、撮像レシピの自動生成は作業時間の短縮に有効である。一方、残る計測レシピの作成に多くの作業時間を要していることも分かる。これに対し、提案法による処理時間を同図右に示す。処理時間は大幅に短縮され、約8分で処理を完了している。内訳は、従来法と同じく撮像レシピの自動生成に約7分(同図中の①)、計測レシピの自動生成に約30秒(同図中の③')であった。更に、前述の8分は全てオフラインでの処理時間であり、この間、SEMを占有することはない。すなわち、従来法の撮像時間(同図中の②)に相当する項目は提案法にはなく、設計データが完成するテープアウト時にはレシピ生成を開始することができる。そのため、ウェーハ完成時にはすぐに撮像・測長に着手することができ、測長SEMの稼働率向上が期待される。

4. 結 論

本研究では、撮像準備まで含めた総合的な測長SEMのスケルプト向上を目的として、以下の結論を得た。

- 1) 評価点の設計データを基に測長SEMの計測レシピをオフラインで自動生成する手法を提案した。提案法は、設計データにおけるパターンレイアウト情報を基に、測長boxの位置・形状と測長box内での画像処理方法を決定する。
- 2) ロジックパターン、テストパターンを含む計662点の評価点について、提案法による計測レシピの自動生成、ならびに測長SEM実機での計測実験を行った。共に成功率100%(662/662)を達成し、提案法が測長SEMの自動化に有効であることを示した。
- 3) 提案法による撮像・計測レシピ生成全体の処理時間は8分であった。計測レシピをマニュアル作成していた従来法の処理時間は3.5時間であり、大幅な短縮を実現した。また、提案法における自動生成はオフライン処理であり、この間、SEMを占有することはない。

本報で述べた計測レシピ自動生成技術により、撮像から計測に至る一連の作業が自動化され、評価点の指定だけで、膨大な評価点に対する自動測長が実現する。今後の展開として、提案法をデバイスメーカー各社に導入して大量評価を行う必要がある。多様なプロセスやパターンルールの違いに対する適用可能性の検証を行い、本技術の実用化に向けた取り組みを推進する。

参 考 文 献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors 2013, Metrology (2013).
- 2) S. Maeda, H. Nosato, T. Matsunawa, M. Miyairi, S. Nojima, S. Tanaka, H. Sakanashi, M. Murakawa, T. Saito, T. Higuchi, and S. Inoue: Ultimately accurate SRAF replacement for practical phases using an adaptive search algorithm based on the optimal gradient method, Proc. of SPIE, **7640** (2010) 764018.
- 3) T. Matsuyama, T. Ogata, Y. Mizuno, and Y. Ohmura: Imaging optics setup and optimization on scanner for SMO generation, Proc. of SPIE, **8326** (2012) 83260N.
- 4) A. Yamaguchi, H. Fukuda, H. Kawada, and T. Iizumi: Impact of Long-Period Line-Edge Roughness (LER) on Accuracy in CD Measurement, Proc. of SPIE, **5752** (2005) 1362.
- 5) Y. Choi, M. Kim, and O. Han: The study to enhance the mask global CD uniformity by removing local CD variation, Proc. of SPIE, **6518** (2007) 65183E.
- 6) 宮本敦, 松岡良一: 設計データに基づく測長SEM撮像シーケンス自動生成, 電学論C, **135**, 4 (2015) 444.
- 7) J. Goldstein, D. Newbury, D. Joy, C. Lyman, P. Echlin, E. Lifshin, L. Sawyer, and J. Michael: Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis 3rd Ed., Kluwer Academic/Plenum Publishers (2003).
- 8) 宮本敦, 本田敏文: SEM-ADC用膜上/膜下異物分類アルゴリズムの開発, 信学論D, **J91-D**, 6 (2008) 1604.
- 9) H. Morokuma, A. Sugiyama, Y. Toyoda, W. Nagatomo, T. Sutani, and R. Matsuoka: A new matching engine between design layout and SEM image of semiconductor device, Proc. of SPIE, **5752** (2005) 546.