

1Xnm半導体プロセスの工業計測

—新型測長SEM「CG5000」と計測アプリケーション—

Development of New CD-SEM CG5000 and Metrology Applications for 1Xnm Process

小室 修 川野 源 山口 敦子
 Komuro Osamu Kawano Hajime Yamaguchi Atsuko
 宮本 敦 豊田 康隆 高見 尚
 Miyamoto Atsushi Toyoda Yasutaka Takami Sho

測長SEMは、IEEEマイルストーンに認定された「電界放出形電子顕微鏡の実用化」の一製品として開発され、1984年に製品化された。これまで、日立グループはユーザーの「測る」ニーズを満たす計測システムの提供をコンセプトに、世界中のユーザーやコンソーシアムの研究機関、装置メーカーと連携して、装置の性能向上と同時に計測ソリューションの開発を進めてきた。

今回開発した1Xnmの最先端微細プロセスに対応した新型の測長装置「CG5000」は、電子光学系をコア技術としてプラットフォームを一新し、高精度化と高生産性を実現した。また、1Xnm世代で要求される計測技術として、露光装置を管理する計測技術やダブルパターニングの計測技術、輪郭線応用計測に関する計測ソリューション技術を開発した。

1. はじめに

2012年1月に「IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) マイルストーン」に認定された「電界放出形電子顕微鏡の実用化」の一製品である測長SEM (Scanning Electron Microscope: 走査電子顕微鏡) の開発について簡単に述べる。

1980年代初頭、半導体の線幅寸法計測には光学顕微鏡

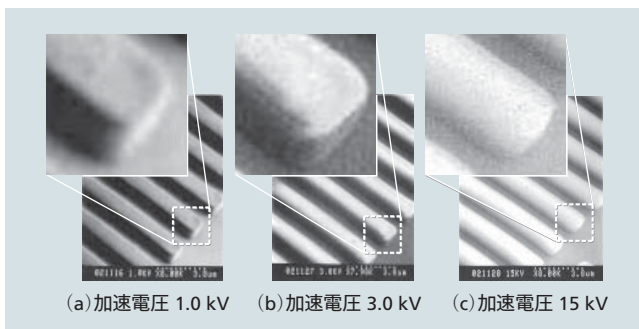


図1 | 熱電子源によるレジストパターンの観察例

熱電子源は、加速電圧を高めると帯電現象を起こし、加速電圧を下げることで分解能が低下する。

が用いられていたが、線幅寸法が1.3 μmを切る世代になると光学顕微鏡の分解能が限界に達し、新たな計測手法が求められていた。当時、すでにSEMが半導体観察に用いられていた。しかし、絶縁物材料からなる半導体のパターンを観察するためには、帯電を防止する導電性金属膜の蒸着が不可欠であるが、蒸着をすると半導体を破壊するという課題があった¹⁾(図1参照)。

無蒸着で電子線の帯電を防ぐには、電子線の加速電圧を1 keV以下に下げる必要があるが、当時使用されていた熱電子源〔タングステンフィラメントや六ホウ化ランタン(LaB₆)〕では、光源としての輝度が低く、エネルギー幅が大きいため、加速電圧を下げると分解能が低下してSEM像が劣化していた。これを解決する手段として、日立グループが実用化を始めたFE (Field Emission: 電界放出) 形の電子源を採用した。FE電子源は、熱電子源と比較して輝度が100倍以上高く、エネルギー幅も約1/10と小さいことから、低加速電圧で高分解能の観察に適していた(図2参照)。

タイプ	LaB ₆	FE電子源
SEM像		
輝度	10 ⁶ Acm ⁻² rad ⁻²	10 ⁸ Acm ⁻² rad ⁻²
エネルギー幅	2~3 eV	0.2~0.3 eV

注: 略語説明 SEM (Scanning Electron Microscope: 走査電子顕微鏡), LaB₆ (六ホウ化ランタン), FE (Field Emission)

図2 | 電子源の比較

FE電子源は、輝度が高く、エネルギー幅が小さいために、半導体デバイスの観察に適している。

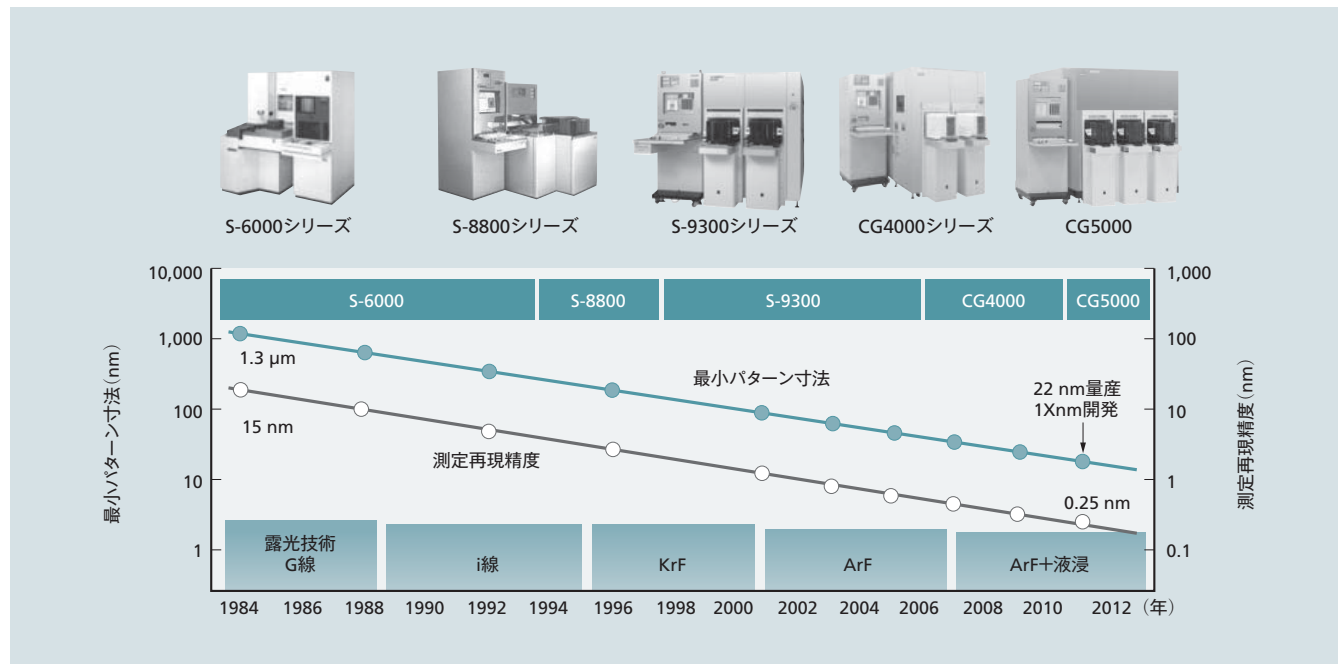


図3 | 半導体デバイスのロードマップと測長SEMの製品シリーズ化

ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) によるロードマップでは、2011年に1Xnmの開発と22 nmの量産が計画されている。

FE電子源の採用で分解能が格段に向上したことにより、測長SEMは半導体パターンの計測にイノベーションを起こした。測長SEM「S-6000形」が1984年に世界に先駆けて製品化され^{2),3)}、これ以降、測長SEMが半導体パターンの計測装置として広く利用されるようになった。

一方、半導体デバイスは、1980年代以降、「ムーアの法則」に従って高集積化と微細化が進んでおり、現在も進行している。このような半導体デバイスの微細化に伴って要求される計測ニーズに対して、日立グループは「計測ソリューションを提供する」というコンセプトの下、測長SEMの性能向上を続けてきた^{4),5)}。

ここでは、1Xnm世代の要求に対応した新型測長SEM「CG5000」と、計測アプリケーションの開発について述べる。

2. 新型測長SEM「CG5000」の開発

ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors: 国際半導体技術ロードマップ) 委員会が発行するロードマップによれば、2011年以降、1Xnm世代のプロセス開発と22 nm世代のデバイスの量産開始が予定され、これに従って測長SEMにも微細化に対応する高性能化が求められた⁶⁾ (図3参照)。

今回開発したCG5000は、次世代のデバイスで要求される多様な計測ニーズに対応するために、コア技術である電子線技術と画像処理技術を高め、さらにウェーハ搬送系のプラットフォームを一新することで、業界最高レベルの計測精度と高生産性を実現した (図4参照)。

CG5000の開発にあたり、技術革新の激しい半導体デバイスの計測ニーズを把握するためには、従来行っていたような、デバイスメーカー(顧客)の情報収集だけでは不十分であると判断した。それは、(1) 微細化する次世代デバイスの開発コストを軽減するために、実質的な開発をデバイスメーカーの共同体であるコンソーシアムが担うようになったこと、(2) 製造プロセスは半導体装置メーカー、材料メーカー、EDA (Electronic Design Automation) によって支えられ、次世代製造プロセスを管理するための計測ニーズはこれらのメーカーが熟知しているからである。このため、株式会社日立ハイテクノロジーズは、2006年か



図4 | 新型測長SEM「CG5000」

1Xnm世代のプロセス開発と22 nm世代のデバイスの量産に対応した新型測長SEMの外観を示す。

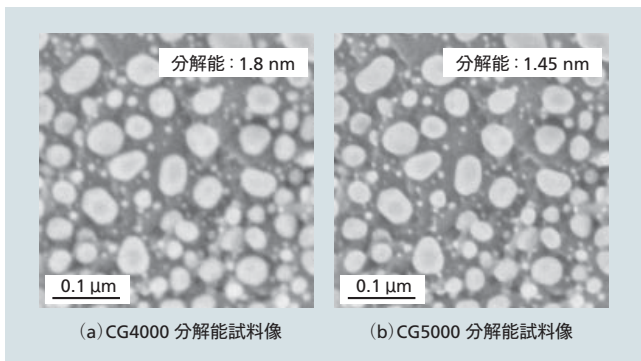


図5 | 「CG4000」(従来機)と「CG5000」の分解能比較
CG5000では、信号処理によってノイズを低減し、分解能を向上した。

ら半導体開発のコンソーシアムであるIMEC (Inter-university Microelectronics Center) に、また2008年からIBM社の共同研究体ANT (Albany Nano Tech) に、それぞれ計測メーカーとして参画している。さらに国内外の露光装置メーカー、成膜・加工メーカーや材料メーカーとも共同開発を進めることで、次世代プロセスの計測ニーズを的確に収集してきた。

以下では、CG5000の開発内容について述べる。

2.1 パターン微細化への対応

微細化する半導体デバイスにおいて測長SEMに求められる最大の要求事項は、微細パターンが「観(み)えて測れること」である。1Xnm世代に対するITRSの分解能の要求値は2011年に2.2 nm、2015年に1.5 nmである⁶⁾。一方、半導体デバイスは高段差の構造を持つため、高分解能であることと同時に、深い焦点深度が求められる。

この要求に対応するため、CG5000の開発では、二次電子の軌道を高精度にシミュレーションし、その結果を基に検出光学系を改良して二次電子信号量を改善した。また、二次電子の信号に重畳したノイズを低減する信号処理手法を開発し、焦点深度を劣化させることなく、分解能を従来機の1.8 nmから1.45 nmに向上した。

CG5000と従来機の分解能試料のSEM像を図5に示す。

2.2 測定再現精度向上への対応

半導体デバイスの微細化に伴って、厳しいプロセス管理が要求される。いかにプロセスで発生する変動を精度よく迅速にモニタリングするかが鍵であり、測定再現精度とスループットが重要になる。この要求を背景に、精度よく高速に計測するツールとして光を用いた計測器であるスカトロメトリー/OCD (Optical Critical Dimension) 計測がリソグラフィ工程、エッチング工程の一部において利用され始めた。CG5000では、OCDに対抗できるよう、測定再現精度の向上とスループットの向上に努めた。

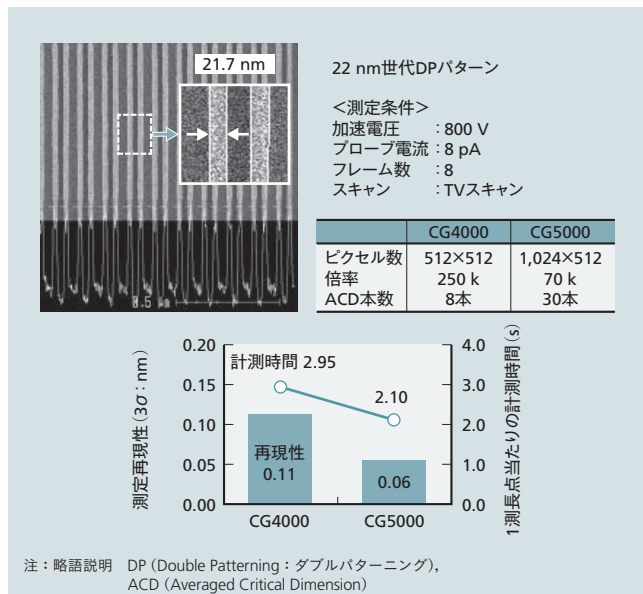


図6 | 測定再現精度の評価結果

CG5000では、測定再現精度とスループットの両立を図り、多ピクセル像取得機能、可変ピクセル機能、高速スキャン機能を開発した。

まず、画素数を増したSEM像の取得機能を強化し、最大2,048ピクセルまでの画像を取得可能とした。また、平均化計測機能であるACD (Averaged Critical Dimension) 機能を用いることで、スカトロメトリー計測と同等級以上の測定再現精度を得ている (図6参照)。

一方、ピクセル数が増えると画像取得時間が延びるため、計測に必要な部分だけを撮像できるように、X方向およびY方向ごとに自由なピクセル数を選択できる可変ピクセル機能を搭載した。CG5000では、単純な繰り返しパターンだけでなく、OCDでは計測できない複雑な形状のパターンや、下地のあるエッチング後パターンであっても高速・高精度に計測することができる。

2.3 二次元パターン計測への対応

半導体デバイスのパターンが露光波長よりも小さくなり、リソグラフィ装置の解像度を超えた微細パターンが形成されるようになると、マスクパターンに補正パターンを付加するOPC (Optical Proximity Correction) 技術が必要である。従来は単純な一次元パターンの寸法計測で十分であったが、半導体デバイスの微細化が進むと、パターンの輪郭線を二次元で計測することが求められるようになった。

電子線のスキャン方向と平行なパターンを測長SEMで観察すると、パターンのエッジが消失する課題があった。これは電子線の照射で発生した二次電子が、直前の電子線照射で正帯電したエッジ部に引き戻されることが原因である。これを解決するために、CG5000では4倍速のTVスキャンレートを採用した。高速スキャンによる横エッジ部

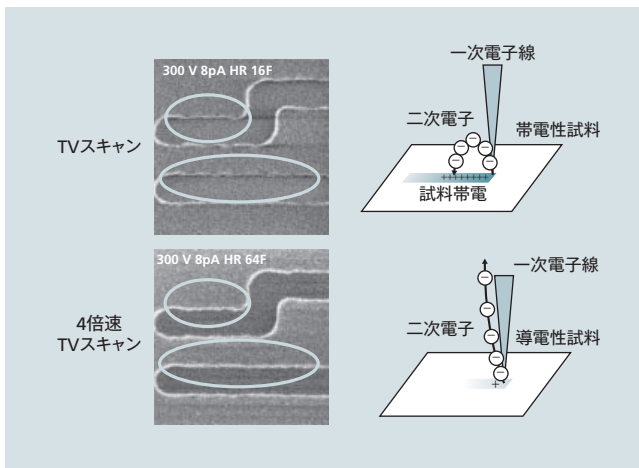


図7 | 電子線照射時の横エッジ消失と高速スキャンによる改善効果
4倍速スキャンでは、エッジ部の帯電が緩和されることから、横エッジの消失が改善される。

のコントラストの改善効果を図7に示す。この機能と輪郭線抽出機能を組み合わせたシステムソリューションを提供することで、顧客のデバイス開発期間の短縮が可能である。

3. 新しい計測アプリケーション

3.1 SEM像からの露光パラメータ推定

最新のリソグラフィ装置では、高度な制御技術によって各種補正を実現し、プロセスマージンを確保している。主要パラメータであるフォーカスおよびドーズについては、露光ショット内位置に対して高次の補正が可能であるが、これらを活用するには、ショット内数十点における露光パラメータ変動量の計測が必要である。そこで、レジストパターンのSEM像からフォーカスおよびドーズを推定する技術を開発した⁷⁾。

この技術では、パターンの形状および寸法の変化をSEM信号波形から算出した複数の特徴量で定量化する(図8参照)。これらの特徴量を、あらかじめ露光パラメータを振って作製したFEM (Focus Exposure Matrix) ウェーハから取得したモデルデータと照合することにより、

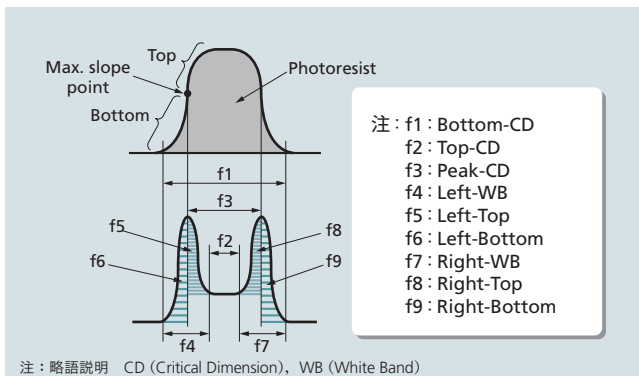


図8 | SEM像を用いたパターン形状および寸法変化の定量化
レジストパターン形状および寸法に依存して変化するSEM像プロファイルの九つの波形特徴量を算出する。

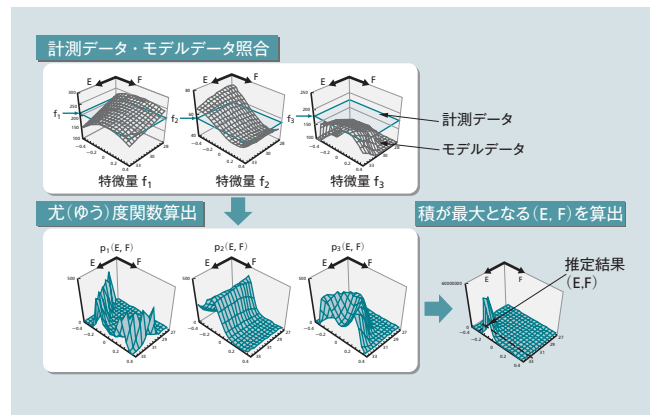


図9 | 測長SEMを用いたフォーカスドーズ計測

SEM像の特徴量を、FEM (Focus Exposure Matrix) ウェーハを用いて生成したモデルデータと照合することでパラメータを推定する。おのおのの特徴量についてフォーカス (F) とドーズ (E) の組み合わせに対する尤度を求め、すべての特徴量から求めた尤度の積が最大値をとるパラメータを推定結果とする。

フォーカスおよびドーズの推定を行う(図9参照)。

OCD計測が数十マイクロメートル角の繰り返しパターン領域を必要とするのに対し、この手法は実パターンでの計測も可能である。この手法を実ロジックデバイスの素子分離工程パターンの補正に適用した結果、10%~36%の寸法均一性向上が得られた⁸⁾。

3.2 パノラマ合成による広視野SEM像の生成

半導体パターンの微細化に伴い、パターン線幅などの局所的な寸法評価に加えて、パターンの巨視的な露光ずれ(パターンシフト)や形状変形を評価する必要がある。しかし、計測に十分な画像分解能を維持したうえで、パターンの大きな変形を捉える広視野なSEM像を得ることは困難である。そこで、所望の視野を分割撮像した複数枚のSEM像をつなぎ合わせることで1枚の広視野画像を得るパノラマ合成技術を開発した⁹⁾。

パノラマ合成技術は一般に知られた技術であるが、半導体においてはパターンが必ずしも密に存在しないため、分割撮像した画像がすべてつなぎ合わせ可能とは限らない。そこで、必ずつなぎ合わせが可能となる撮像位置を撮像前に自動で決定する手法を考案した。パターンレイアウトの設計データを用いることで隣接する二つの画像間の連結関係を求めることができ、この連結関係から全画像間の連結可否を求めることができる(図10参照)。

この手法によって決定した分割撮像位置のSEM像を合成したパノラマ画像を図11に示す。この例では、視野0.9 μm角の分割画像を90枚組み合わせることによって、視野が約8.5 μm角の高分解能画像が得られた。この画像からパターンの輪郭線を抽出することで、パターンの巨視的な形状評価を実現する。

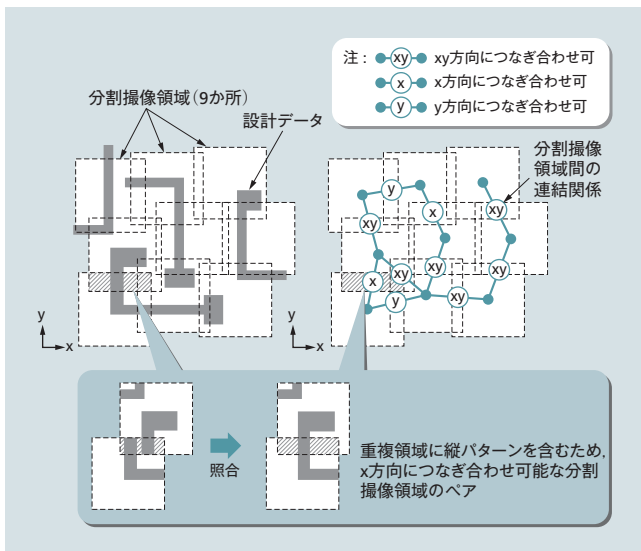


図10 | 分割撮像領域の配置

設計データを基に画像間のつながり合わせが可能となるように分割撮像領域を決定する。

3.3 ダブルパターニング向けオーバーレイ計測

次世代リソグラフィ技術の本命である EUV (Extreme Ultraviolet: 極端紫外線) 露光技術の開発に先立ち、ダブルパターニングプロセスの導入が進んでいる。ダブルパターニングでは波長限界をはるかに超えた微細パターンを形成できるが、同時に、従来見られなかった層内のパターン位置のずれが発生する。この位置ずれは2回 (あるいはそれ以上) のリソグラフィ間のオーバーレイ (重ね合わせ) 誤差である。このダブルパターニングオーバーレイは層内のパターン配置に直接影響するため、特に計測ニーズが大きい。このため、従来のようなチップの代表点ではなく実パターンで計測したいというニーズがある。

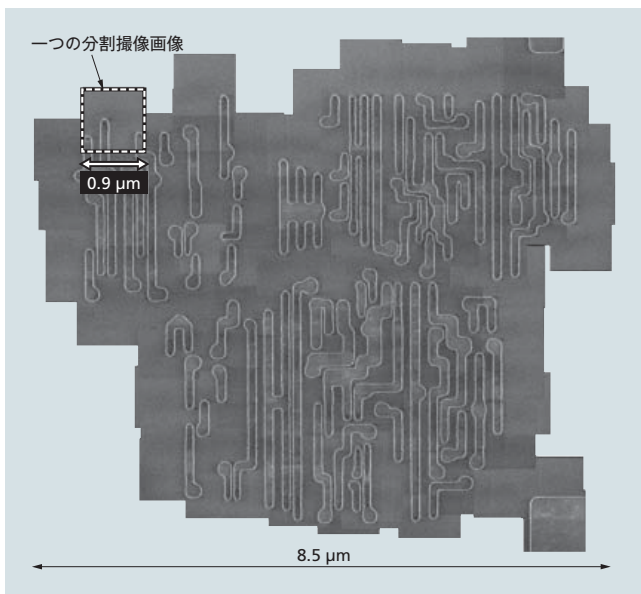


図11 | パノラマ画像生成結果

分割撮像した画像群をつなぎ合わせることで、広視野かつ高分解能な画像の取得が可能となる。

対象が一次元パターン (単純なラインアンドスペースパターン) であれば、従来の CD (Critical Dimension) 計測とピッチ計測の組み合わせでオーバーレイを算出することができる。しかし二次元パターンの場合は、新たな機能が必要になる。

そこで、重心計算を応用した二次元パターン用オーバーレイ計測技術を開発した。ダブルパターニングで作製した SRAM (Static Random Access Memory) のコンタクトホールパターン画像からオーバーレイを算出した例を図12に、図の中央白枠の部分拡大したものを図13に示す。はじめに、各ホールパターンの重心を算出する。次に1回目のリソグラフィで形成された六つのホールパターンの重心を合成し、1回目のリソグラフィの重心を求める。次に2回目のリソグラフィで形成された八つのホールパターン (縦方向に長いもの) から同様に2回目のリソグラフィの重心を求める。この重心を結ぶベクトル \vec{R} から、設計データがもともと持っていた1, 2回目のパターン重心の差分 \vec{R}_0 を差し引いて、オーバーレイベクトル \vec{R}_{OV} が得られる。また、

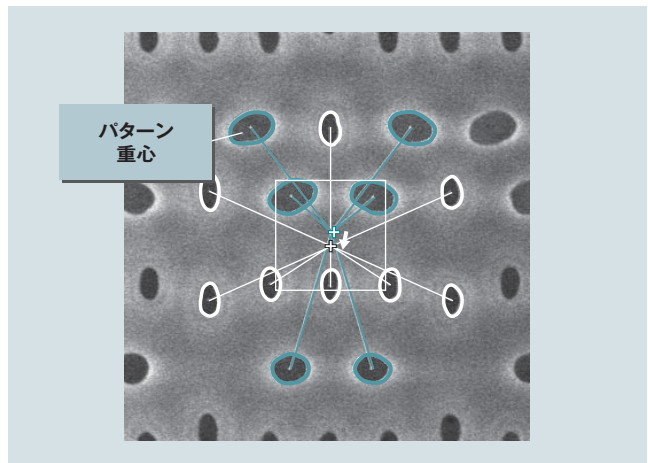


図12 | ダブルパターニングのオーバーレイ計測例

1回目リソグラフィ (青色) のホールの重心位置と、2回目リソグラフィ (白色) のホールの重心位置のずれを検出する。

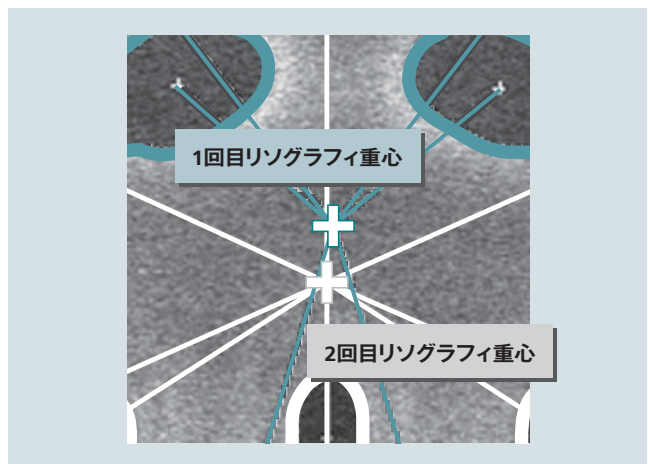


図13 | ダブルパターニングのオーバーレイ計測例 (拡大図)

1回目リソグラフィと2回目リソグラフィの重心位置のずれを、設計データと比較することで重ね合わせ誤差を計測する。

パターン配置の対称性を利用して設計データを参照せずに \bar{R}_{OV} を求める手法も開発した¹⁰⁾。これにより、ダブルパターンニング向けのオーバーレイ計測を可能にした。

4. 今後の展望

半導体産業は、高度通信化の潮流を背景に、スマートフォン、タブレットPC (Personal Computer)、クラウドコンピューティングの分野を中核に成長を続けると予測される。これにより高速で低消費電力、大記憶容量の半導体が要求され、ますます微細化と高機能化が進むものと考えられる。

微細化では、ダブルパターンニングからマルチパターンニングと呼ばれる手法の採用が検討され、さらにEUV露光技術の実用化に向けた開発が進められている。これらの微細加工技術に対応するために、高分解能、高精度再現性、および高生産性の開発を進めるとともに、計測アプリケーションを開発していく必要がある。例えば、マルチパターンニングではチップ内の合わせ誤差計測、EUV露光技術ではパターンのラフネス計測、フレア計測、などを開発していく。

また、半導体デバイスの構造がプレーナ型の平面構造から徐々に三次元構造に立体化しつつあり、微小な三次元形状をモニタリングする要求もある。そこで、上面からのTop-view観察で三次元形状を正しくモニタリングする全く新しい計測コンセプトの開発も進めている¹¹⁾。

さらに、上層レイヤと下層レイヤの位置合わせ計測は、現在主流である光学式計測が次世代には限界となることから、電子顕微鏡を用いた計測手法を提案し、新たな市場への展開を図りたいと考えている。

5. おわりに

ここでは、1Xnm世代の要求に対応した新型測長SEM「CG5000」と、計測アプリケーションの開発について述べた。

今後も半導体デバイスが微細化を続ける中で、日立グループはさらに電子顕微鏡技術を深め、半導体デバイス開発の要求に応える計測ソリューションを提供することで、引き続きマーケットリーダーとして半導体産業に貢献していく。

参考文献など

- 1) 大林：イノベーションを支える電子顕微鏡の進化，日立評論，91，11，806～811 (2009.11)
- 2) 高性能電子顕微鏡の開発，日立評論，64，1，69 (1982.1)
- 3) S-6000形 (半導体測長専用) 走査電子顕微鏡の開発，日立評論，67，1，77 (1985.1)
- 4) 池上，外：半導体用微小寸法計測システムの発展と今後の展望，日立評論，93，2，183～187 (2011.2)
- 5) 山口，外：65 nmプロセスノードに対応するCD-SEM技術，日立評論，86，7，471～476 (2004.7)
- 6) ITRS：2011年度版，
<http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm>
- 7) C. Shishido, et al. : Dose and focus estimation using top-down SEM images, Proc. SPIE, Vol. 5038, 1071-1079 (2003)
- 8) T. Fujiwara, et al. : Advanced CDU improvement for 22nm and below, Proc. SPIE, Vol. 7973, 7973-10 (2011)
- 9) R. Matsuoka, et al. : Study of shape evaluation for mask and silicon using large field of view, Proc. BACUS 2010, NO. 7823-66 (2010)
- 10) S. Hotta, et al. : Concerning the influence of pattern symmetry on CD-SEM local overlay measurements for double patterning of complex shapes, Proc. SPIE, Vol. 7638, 7638-64 (2010)
- 11) M. Isawa, et al. : Verification and extension of the MBL technique for photo resist pattern shape measurement, Proc. SPIE Vol. 7971, 7971-32 (2011)

執筆者紹介



小室 修

1991年日立製作所入社，株式会社日立ハイテクノロジーズ 電子デバイスシステム事業統括本部 評価システム設計開発本部 電子線応用システム設計部 所属
現在，半導体用測長SEMの設計開発に従事



川野 源

1991年日立製作所入社，株式会社日立ハイテクノロジーズ 研究開発本部 第一部 所属
現在，電子線応用製品の電子光学系開発に従事



山口 敦子

1992年日立製作所入社，中央研究所 エレクトロニクス研究センター 所属
現在，リソグラフィ関連の計測技術の研究に従事
理学博士
応用物理学会会員，SPIE (国際光工学会) 会員



宮本 敦

2001年日立製作所入社，横浜研究所 生産技術研究センター 検査システム研究部 所属
現在，半導体用検査・計測装置の研究開発に従事
工学博士
精密工学会会員，電子情報通信学会会員，IEEE会員



豊田 康隆

1992年日立製作所入社，日立研究所 情報制御研究センター スマートシステム研究部 所属
現在，半導体計測・検査装置の画像処理技術開発に従事
電子情報通信学会会員



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 電子デバイスシステム事業統括本部 評価システム設計開発本部 電子線応用システム設計部 所属
現在，半導体用測長SEMの設計開発に従事