

次世代デバイスの歩留り向上に寄与する CD-SEM「CG4000」と設計データ応用システム「DesignGauge」

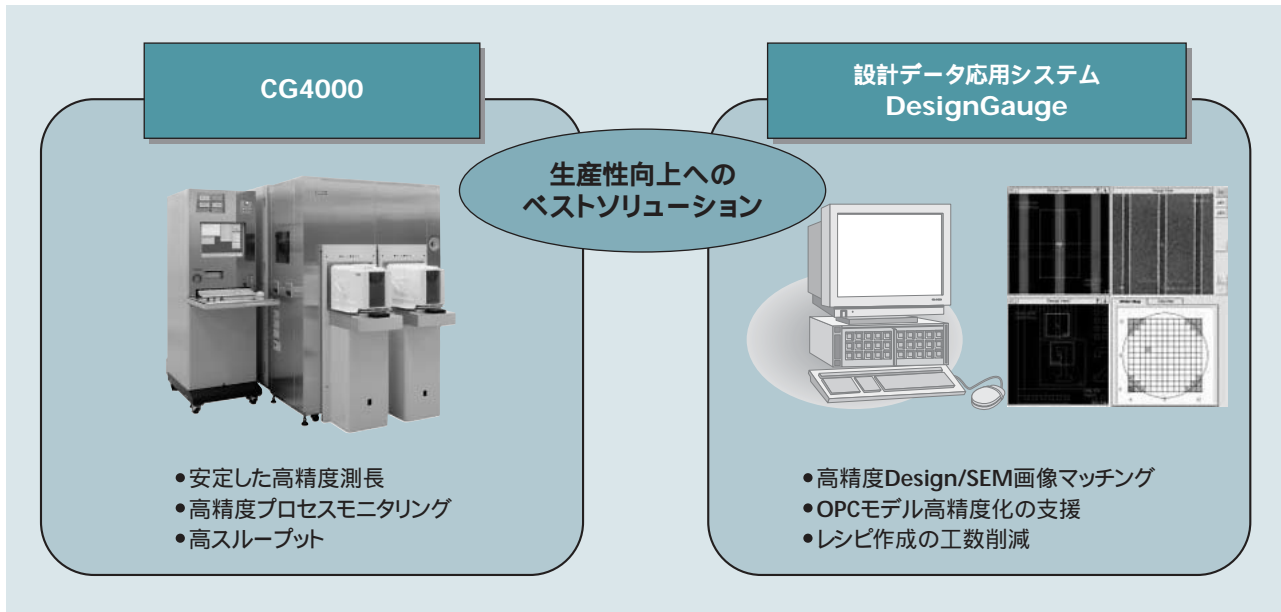
Critical Dimension-Scanning Electron Microscope "CG4000" and DesignGauge System for Utilizing Design Data for Enhancing Yield of Next-generation Devices

川田 勲 Isao Kawata

日比野 大輔 Daisuke Hibino

長谷川 昇雄 Norio Hasegawa

高見 尚 Sho Takami



注:略語説明 SEM(Scanning Electron Microscope), OPC(Optical Proximity Correction)

図1 新型CD-SEM「CG4000」と設計データ応用システム「DesignGauge」

株式会社日立ハイテクノロジーズは、次世代デバイス製造プロセスの高度な要求に対応する計測装置として新型CD-SEM「CG4000」と、半導体デバイスの設計開発効率や生産歩留りの向上に役立つ設計データ応用システム「DesignGauge」を開発し、製品化した。

次世代露光技術では、液浸技術が採用され、レンズのNA(開口数)1.0以上のHyper-NAの光学系が可能となった。さらに、Low- k_1 を実現する超解像技術や高度なOPC(光学近接効果補正)技術、ダブルパターニング技術などの採用によって極限の解像度の実現も可能となっているが、安定したパターン形成を確保するには、焦点深度やプロセス裕度の低下への対応が必須である。計測技術では、これらの先端技術に対応するため、測定精度の向上や3D形状表現の高度化を進める必要がある。

新型CD-SEM(測長走査型電子顕微鏡)「CG4000」は、このような市場の動向に対応した次世代対応のCD-SEMである。また、設計データ応用システム「DesignGauge」は次世代露光技術で必須となるOPCモデル高精度化支援、および計測点数の急激な増加傾向にも対応する。

1.はじめに

CD-SEM(Critical Dimension-Scanning Electron Microscope)は、半導体プロセスにおけるCD計測のメインツールとして幅広く用いられている。近年はデザインルールの微細化に対応した精度向上と、測定点の増大に対応した高速計測を実現してきた。また、新たな機能として、デザインデータの情報を有効に使った測定の自動化や、位置情報を用いた危険個所の計測などを実現した。

次世代露光技術では、液浸技術が採用され、レンズのNA(Numerical Aperture:開口数)1.0以上のHyper-NAの光学系が可能となった。さらに、Low- k_1 を実現する超解像技術や高度なOPC(Optical Proximity Correction)技術、ダブルパターニング技術などの採用で極限の解像度の実現も可能となっているが、安定したパターン形成を確保するには、焦点深度やプロセス裕度の低下への対応が必須である。また、デバイス構造もフィン型ゲートのような立体形状の採用や、電極貫通孔のアスペクト比の増大に伴い、これらの立体形状の安定形成

が、デバイス特性の安定化に必須な事項となっている。

また、計測技術では上記先端技術の課題に対応すべく、さらなる測定精度の向上、3D 立体形状表現の高度化を進めている²⁾。

ここでは、次世代デバイスでの要求に応える計測装置として、次世代対応CD-SEM「CG4000」、および設計データを利用した計測を行う設計データ応用システム「DesignGaug(デザインゲージ)」について述べる(図1参照)。

2. 次世代リソグラフィーでの計測技術の課題

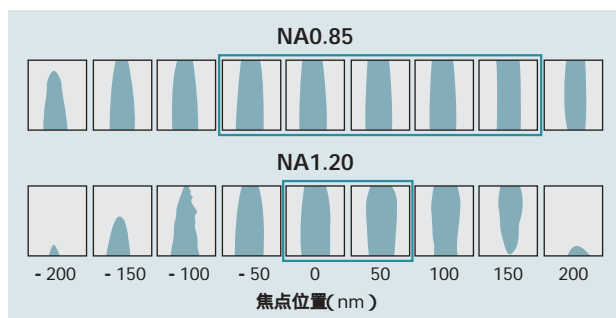
2.1 次世代リソグラフィーの課題への対応

次世代露光技術では、液浸技術が採用され、レンズのHyper-NA化とLow- k_1 化が進む。これを実現するために、超解像技術(RET:Resolution Enhancement Technologies)や高度なOPC技術、ダブルパターニング技術(DP:Double Patterning)などが採用される(図2参照)。hp(ハーフピッチ)45 nm以降では、高屈折材料を用いた液浸露光や、EUV(Extreme Ultra Violet)露光(波長13 nmの極紫外線露光)などの難易度が高い技術に進化することが必須である。レンズの高NA化による焦点深度の低下の様子を図3に示す。同図はNA0.85とNA1.20のArF液浸露光で90 nm線を解像したときのパターン断面形状のシミュレーション結果である。

NA0.85では広範囲にわたり形状の良好なパターンが得られるが、NA1.20の例では形状が安定して得られる範囲は約半分に減少していることがわかる。このように、高NA化により、解像限界の向上が実現できるが、焦点深度が大幅に低下するため、焦点深度に影響するパラメータの高精度管理が重要となる。CD-SEM計測においても単なるパターン底部の寸法のみならず、パターン断面形状、3D形状の表現が必要となる。

2.2 プロセスウインドウの評価

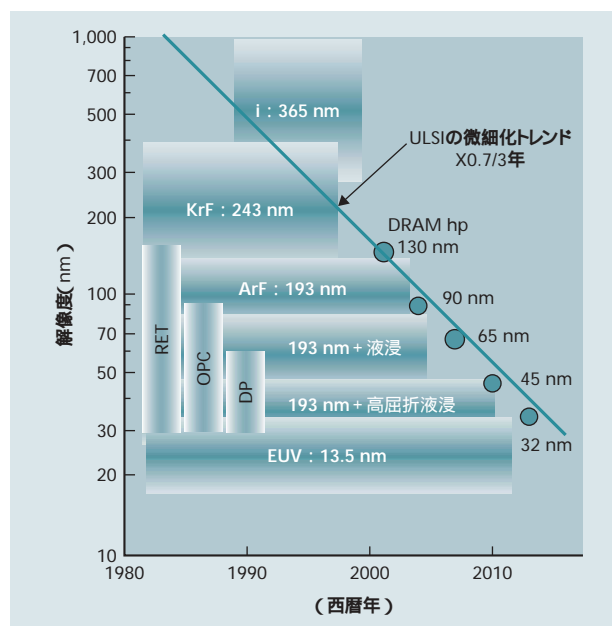
Low- k_1 リソグラフィーの実用化ではDOR(Depth of Focus)や露光裕度などのプロセス裕度の低下への対策が必要条件



注:略語説明 NA(Numerical Aperture)

図3 高NA化による焦点深度低下のシミュレーション結果(90 nm孤立ライン)

NA0.85とNA1.20のArF液浸露光で90 nm線を解像したときのパターン断面形状のシミュレーション結果を示す。



注:略語説明 RET(Resolution Enhancement Technologies)、DR(Double Patterning)、ULSI(Ultra-Large Scale Integration)、DRAM(Dynamic Random Access Memory)、hp(Half Pitch)

図2 リソグラフィー微細化の年次推移

リソグラフィープロセスでは、45 nm以降への微細化が加速している。

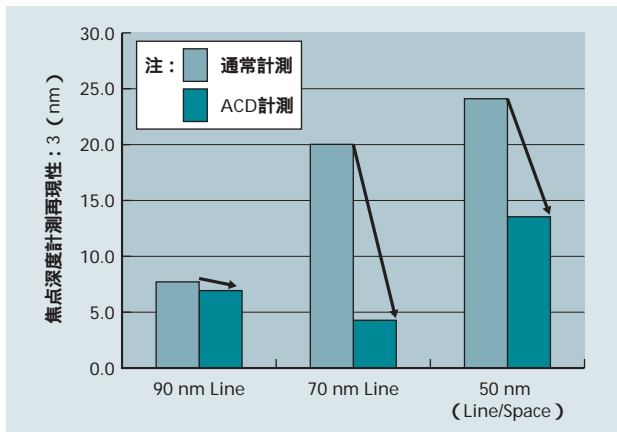
である。これを表現するPW(Process Window)の解析が重要な作業となる。PWは基本的なLine/Spaceの評価以外にも、OPCの不具合箇所や回路パターンの危険箇所の評価などに幅広く用いられ、条件の最適化や量産でのプロセス管理などで広く活用されている。以上の理由により、PWの高精度評価が計測技術の大きな課題となる。

PWは露光装置の焦点位置と露光量をマトリクスで変化させてパターンを形成し、目標寸法が得られる焦点位置と露光量の範囲を求める。このとき、パターンのCDはCD-SEMで求めるが、PWの高精度取得にはCD計測の高精度化が必須である。PW計測の高精度化の一例を図4に示す²⁾。ここでは、通常の単一パターンのCD計測と複数パターンを同時計測するACD(Averaged CD)計測を用いた場合を比較して示している。3種類のパターンについて比較したが、いずれの場合も計測再現精度の向上が確認され、特に、パターンが微細化するに従い、改善効果が高いことがわかる。このように、リソグラフィーの微細化が進むほど、形成されるパターンの形状の変化も大きくなり、計測精度の低下を引き起こす。CD計測ではこれらの変化を的確に捉(とら)えることや、変化を考慮した計測アプリケーションの開発が重要である。

3. 32 nmプロセスノード対応CD-SEM「CG4000」

3.1 次世代対応新型CD-SEM CG4000

次世代リソグラフィーにおけるCD-SEMによる計測への期待と要求はますます増大している。世界市場でトップシェア(2005年、ガートナーデータクエスト調査)を有するCD-SEM装



注:略語説明 ACD(Averaged Critical Dimension)

図4 PW(Process Window)高精度計測例(ACD計測の効果)
通常の単一パターンのCD計測と複数パターンを同時計測するACD計測との比較を示す。

置のメーカーとして、株式会社日立ハイテクノロジーズは市場の期待に応え、かつ市場ニーズをリードする新型CD-SEM CG4000を開発し、市場への供給を開始した(図5参照)。CG4000の概要を以下に述べる。

45 nmプロセスノードの量産と32 nm以降のプロセス開発に適應する次世代CD-SEMには、OPC技術や液浸露光、ダブルパターンング技術などへのアプリケーション機能が求められることはもちろんである。しかし、アプリケーション機能だけでは課題の本質的な解決は困難であり、高度に安定した高精度測長とアプリケーション機能の両立が重要である。CG4000は、hp45 nm以降のプロセスにおいて、誰でも容易に安定した高精度測長ができるCD-SEMである。

これを実現するために日立ハイテクノロジーズは、従来のシステムを全面的に見直し、さらに安定した高精度測長の実現を可能とした。

3.2 高精度測長への対応

次世代プロセスにおけるCD-SEMによる計測への期待と要求はますます増大している。パターン寸法のばらつきはデバイス特性に大きく影響するため、例えば、65 nmMPUデバイスではゲート幅:25 nm, CD制御:2.6 nm(3σ)と極めて高い精



図5 32 nmプロセスノード対応CD-SEM CG4000の外観
新型CD-SEM CG4000の外観を示す。

度が要求されている。CD-SEMへの計測再現性の要求値も、国際半導体技術ロードマップ(ITRS:International Technology Roadmap for Semiconductors)に示されているとおり、サブナノメートルレベルの極めて高い値が要求されている(表1参照)。この高い測定再現精度を達成するには、計測精度に影響する帯電現象の回避や、被測定物へのダメージの回避、SOI(Silicon on Insulator)、Low-k膜などの新材料、新プロセスおよび新構造を考慮した計測技術の開発も課題となってくる。

CG4000ではパターン寸法の計測精度を高め、800 Vにおいて最高分解能1.8 nm、ウェーハのロード/アンロードを実施するダイナミック再現性0.3 nm(3σ、日立標準ウェーハによる)を実現している(図6参照)。CG4000の測定精度はITRSの2010年以降の技術的解決策がない状態、いわゆるRed Brick Wall(技術的障壁)を解消し、半導体デバイスのさらなる微細化の推進を可能とした。

基本性能の向上を実現するために、日立ハイテクノロジーズのコアコンピタンスである電子光学系の技術のほか、SEM画像をより安定して取得するためのさまざまな技術を駆使した。これにより、さらなる分解能向上や計測再現性の向上が可能となった。このようにして実現した基本性能の上に、半導体デバイスの多様な新規材料、新プロセスに対応した測定技術、およびユーザーニーズに応えるアプリケーション技術を搭

表1 CD-SEMへの計測再現性の要求値
CD-SEMへの計測再現性は、サブナノメートルレベルの極めて高い値が要求されている。

西暦年	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
DRAM 1/2 Pitch(nm)	80	70	65	57	50	45	40	36	32	28	25	22
MPUゲート長(Physical)(nm)	32	28	25	22	20	18	16	14	13	11	10	9
寸法計測要求精度(nm) 孤立ライン 3σ	0.67	0.58	0.52	0.46	0.42	0.37	0.33	0.29	0.27	0.23	0.21	0.19
寸法計測要求精度(nm) 密集ライン 3σ	1.77	1.49	1.33	1.18	1.05	0.94	0.84	0.74	0.66	0.59	0.53	0.47
寸法計測要求精度(nm) コンタクトホール 3σ	2.08	1.76	1.57	1.40	1.25	1.10	0.98	0.88	0.78	0.69	0.61	0.56

注: [] 解決策あり [] 生産上の解決策あり [] 解決策なし

出典:ITRS(2005年版)

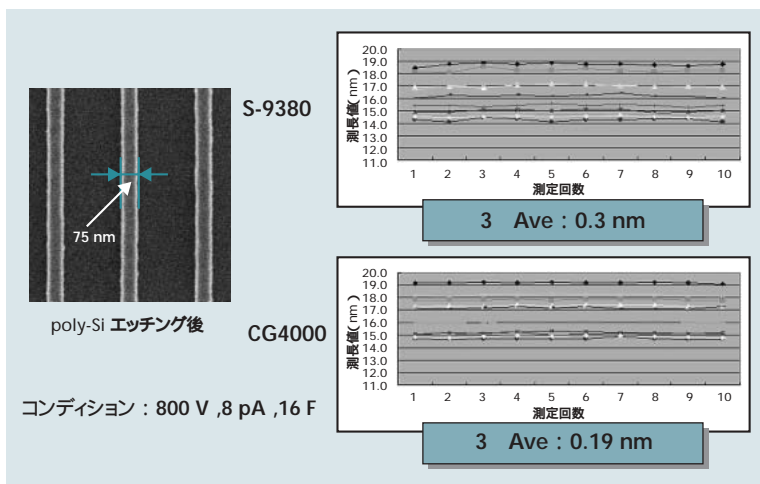


図6 ダイナミック再現性
CG4000ではパターン寸法の計測精度を高め、優れたダイナミック再現性を実現している。

載した。新たに開発した計測技術の一部について、以下に述べる。

3.3 ウェーハの帯電への対応

ウェーハの帯電は測定再現精度低下の最大の要因である。非導電材料の計測では、ウェーハ内に電荷が滞留して帯電が発生し、電子ビームを反発するためフォーカスエラーが発生する。したがって、ウェーハ内で帯電量が異なる場合はフォーカスエラーが発生し、測定精度が低下する。極端な場合は測定エラーが発生し、自動測定が困難となる場合もある。この現象は材料やプロセスによって大きく異なるため、それぞれの場合に対応するための技術開発が必要である。

CG4000の開発にあたっては、帯電現象を調査研究し、対応を検討した。帯電現象は、大きく2つのカテゴリーに分類される。帯電電荷量がウェーハ中心に対し軸対称に分布する場合と、非軸対称に分布する場合とである。これらの帯電現象に対し、CG4000ではそれぞれの現象に対応するための機能を搭載した。軸対称に帯電している場合は、電位計にて帯電量を計測し、帯電量分を曲線近似で補正する方式を踏襲し、その補正精度を向上させた。また、非軸対称に帯電している場合は、測定サイトごとの補正が必要であり、それに対応する新型オートフォーカスを搭載した。そのほか、非点が発生し、計測できない場合もあったが、新型非点補正技術も搭載しており、帯電現象に総合的に対応した。

3.4 プロセスモニタリングへの取り組み

半導体デバイスの微細化、プロセスの難化に伴い、生産管理にも種々の視点からの対応が要求されている。

DRAMおよびシステムLSIの生産において、製品の歩留り向上は非常に重要なことである。高歩留りの達成と維持のためには、プロセス変動をいかに高精度に、迅速にモニタリング

しフィードバックするかが鍵となる。これらの高再現性、高速性のニーズから、光を用いた計測器であるスカトロメトリー/OCD(Optical-CD)計測装置がリソグラフィー工程、エッチング工程のプロセスモニタリングツールとして導入が検討されている。スカトロメトリー法では、モデルパターンで得られる反射光強度の波長依存(または入射角依存)の波動光学シミュレーション結果のライブラリと実パターンからの反射光強度のマッチングでパターン形状を推定する。測定には50 μm ×50 μm 領域に敷き詰めたグレーチング(ライン&スペース)構造の専用パターンを用いる。これにより、パターン寸法のフラフネスなどの影響を回避した平均的な寸法

が得られるのが特徴である。反面、ライブラリ作成に経験を要し、レシピ作成に長時間を要することや、デバイスの実パターン計測は困難なことが欠点である。

CD-SEMにおいても、高速計測、平均化計測へ対応すべく、種々のアプリケーション技術を開発し、スカトロメトリー法に匹敵する値を得ている。

CG4000ではSEM画像の画素数を増やした多ピクセル画像の取得機能と平均化計測機能のACD機能を搭載した。これにより高倍率による測長と同等以上の計測精度を、低倍率での平均化計測で得ることができる(図7参照)。

CG4000の多ピクセル画像によるACD機能は、単純な繰り返しパターンでの測定だけでなく、OCD装置が苦手とする下地有りエッチング後パターンをはじめとしてさまざまなパターンの測

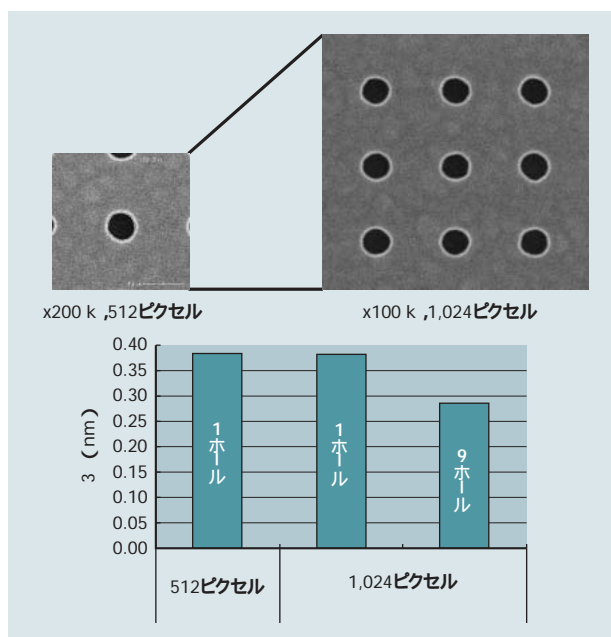


図7 多ピクセルACDによるホール計測例
多ピクセル画像とACD機能を搭載し、高倍率による測長と同等の計測精度で低倍率での平均化計測を可能にした。

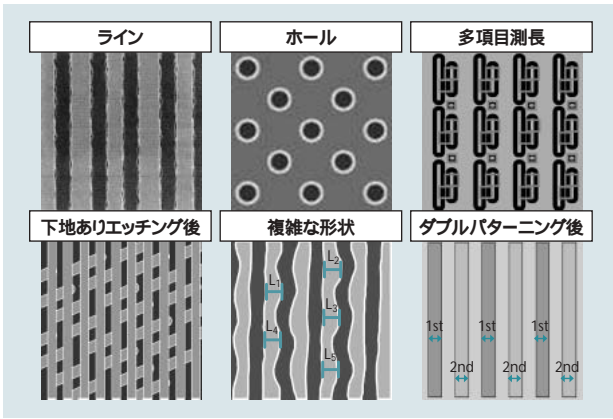


図8 多ピクセルACDによる多様な形状のプロセスモニタ例
多ピクセルACDは、エッチング後パターンをはじめとして、さまざまなパターンの測定が可能である。

定が可能である。これにより信頼性の高い安定したプロセスモニタリングが可能である(図8参照)。

3.5 計測点数の増加

半導体デバイスの微細化に伴い、OPCの複雑化やマスクエラーの影響の増大などが大きな技術課題となっている。これらの状況から、デバイスの歩留り向上にはリソグラフィーにおける不良が起こりやすい、危険箇所(Hot Spot)を探し出し、これを対策する必要がある。あるいは、デザインの修正までさかのぼって対策するDFM(Design for Manufacturability)などの対応が必要となる。

OPCのモデル作成や、OPCの出来栄検証でのCD測定点数は増加の一途をたどっており、数千~1万点にも及ぶ(図9参照)。製造ラインにおいてもHot Spotの管理などが必要となることが予想される。これらの測定ポイントの増加に対応するには、単純な装置のスループット向上だけでは不十分であり、測定レシピ作成に要する工数や時間の短縮も重要な項目となる。

CD-SEMで正確なパターン寸法計測を実現するには、ウェーハ内の任意の計測個所に数十nm以下の誤差でSEM像の視野を合わせなければならない。実際の計測は、ステージ移動、アドレッシング、画像取得、パターン計測などのシーケンスにより構成され、計測レシピと呼ばれる単位で実行される。一度、計測レシピが作られると、オペレータの操作なしで自動で計測することができる(図10参照)。

CD-SEMの計測レシピにおいて計測パターンの検出には、画像処理技術を用いたパターン認識を使用している。そのテンプレートには、実際のパターンのSEM画像を使用する。テンプレートの登録は計測レシピを作成するオペレータがマニュアル操作で実施する。計測個所が複数の場合はそれぞれの計測点に対してSEM画像テンプレート登録が必要であり、実際のレシピ作成ではこの作業に多くの時間を必要とする。その

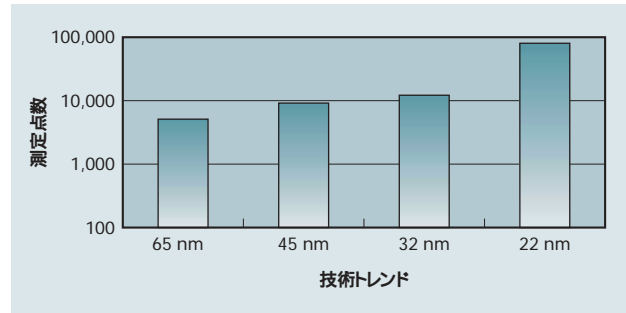


図9 微細化に伴う測定点数の増加
CD測定点数は増加の一途をたどっている。

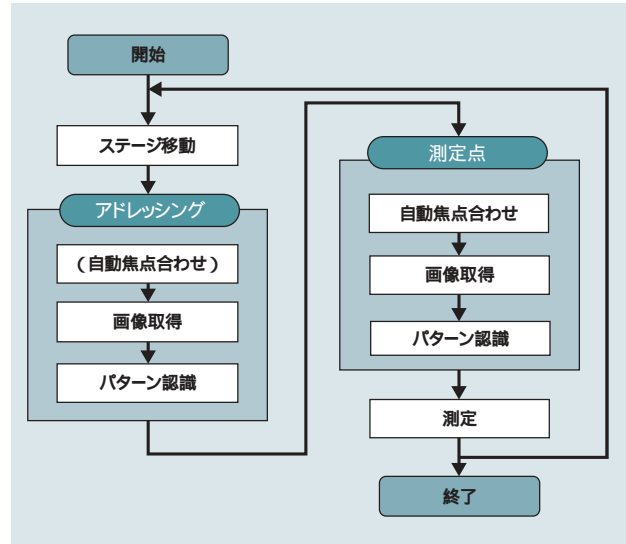


図10 計測レシピの例
CD-SEMの計測レシピの例を示す。一度、計測レシピが作られるとオペレータの操作なしで自動計測することができる。

結果、計測レシピ作成にエンジニアが多くの時間を割く必要があり、大きな問題となる。最新CD-SEMではこの問題にも対応している。

3.6 DesignGaugeによる多点測定

次世代プロセスでの課題に対応するため、トップダウン観察像とデザインデータを対比して観察、計測が可能な設計データ応用システム「DesignGauge」を開発した³⁾。DesignGaugeは65 nm世代対応装置S-9380IIとの接続だけでなく、CG4000との接続も可能である。

計測点の増大に対応した、計測レシピ作成の効率化機能を開発した。従来法では実際のSEM像を用いていたのに比較して、設計データを使った計測レシピ作成では以下の2点において有利である⁴⁾。

(1) CD-SEMとウェーハが不要

従来はアドレッシングのために、実際のウェーハを用いたSEM画像テンプレート作成が必要であった。今回開発の設計データを用いたDesignテンプレート方式では計測対象のウェーハが不要であり、事前のレシピ作成が可能となり、ウェーハが作成された時点ですぐにその計測レシピを実行することができる。

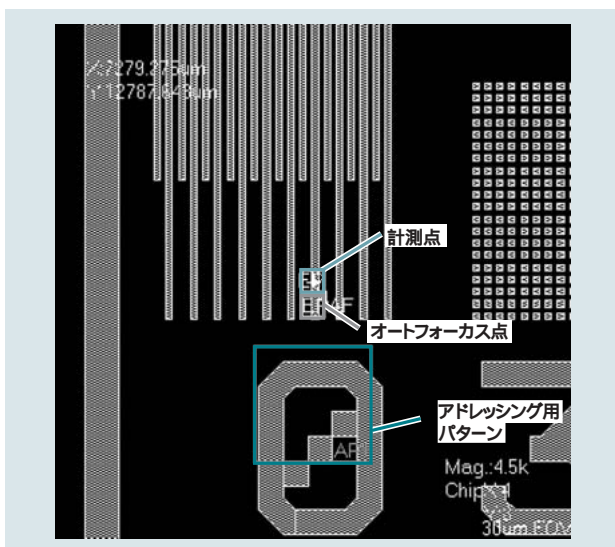


図11 設計データ上での計測点指定

テンプレート登録を簡略化でき、計測レシピを短時間で作成することが可能である。

(2) 多点計測レシピ作成

計測点座標やアドレッシング点座標を一括して計測点情報ファイル(HSSファイル)に記述し、それを一括して変換することで計測レシピが作成されるため、計測点が数千点ある場合でも短時間で計測レシピを作成することができる。また、アドレッシング用テンプレートも設計データから自動作成することができるので、CD-SEMの計測レシピ作成において最も手間と時間が掛かっていたテンプレート登録を簡略化することができる(図11参照)。

このようにDesignGaugeを活用することによって、簡単に計測レシピを作成することができる。

この機能により、計測レシピ作成時間は、測定点数が数千点以上の場合、従来のCD-SEMの約 $\frac{1}{10}$ とすることができる(図12参照)。これらにより、今後はCD-SEMを用いた多点計測を短時間で行うことが可能となり、最先端ウェーハの歩留り向上に大きく貢献することができる。

執筆者紹介



川田 勲

1979年日立東京エレクトロニクス株式会社入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 半導体製造装置営業統括本部 評価装置営業本部 アプリケーション技術部 所属
現在、CD-SEMなどの計測装置のマーケティングに従事



長谷川 昇雄

1969年日立製作所入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 半導体製造装置営業統括本部 事業戦略本部 製品戦略部 所属
現在、検査計測装置のアプリケーション技術開発に従事
応用物理学会会員

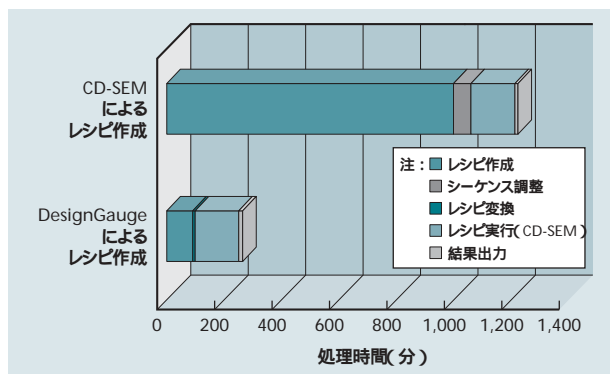


図12 処理時間の比較例

DesignGaugeを用いて計測レシピを作成した結果を示す。

4. おわりに

ここでは、hp45 nmの量産とそれ以降のプロセス開発に対応する新型CD-SEM「CG4000」と、次世代計測技術の課題を解決する設計データ応用システム「DesignGauge」について述べた。

半導体デバイスのパターニング技術が解像度の限界への挑戦を続ける中で、株式会社日立ハイテクノロジーズはデバイス開発を計測技術でサポートしていく。特に今後の計測技術は、測長精度はもとより、測定の正確さが問われてきている。今後この傾向はさらに重要性が増していくと考えられる。日立ハイテクノロジーズはコアコンピタンスである電子線応用技術をさらに深め、計測面からデバイス技術に貢献していく考えである。

また、最近の傾向であるDFMはより製造技術によりフレンドリーなデバイス設計を指向しており、このために製造プロセス技術をモニタリングし、定量化していく観点からも、日立ハイテクノロジーズとして積極的に対応していく。

参考文献

- 1) S. Owa et al.:Immersion lithography : its potential performance and issues ,Proc. SPIE vol.5040 ,p.724(2003)
- 2) T. Ishimoto et al.:Advanced Process Control for Hyper-NA Lithography based on CD-SEM measurement ,SPIE ,6518-93 (2007)
- 3) H. Morokuma et al.:A new matching engine between design layout and SEM image of semiconductor device ,Proc. SPIE vol.5752 ,p.54(2005)
- 4) H. Sakai et al.:Reticle pattern evaluation technology using DesignGauge ,Proc. SEMI Technology Symposium ,p.2-54-6(2006)



日比野 大輔

2000年日製産業株式会社入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 半導体製造装置営業統括本部 評価装置営業本部 アプリケーション技術部 所属
現在、CD-SEMのマーケティングに従事



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 ナノテクノロジー製品事業本部 那珂事業所 半導体計測システム設計部 所属
現在、電子線装置の設計・開発に従事