

# 超LSI用フォトマスク製作を実現したEB描画装置・欠陥検査装置

## Advanced Electron Beam Writing System and Defect Inspection System for VLSI Photomask Fabrication

東条 徹  
TOJO Toru

土屋 英雄  
TSUCHIYA Hideo

野村 武彦  
NOMURA Takehiko

LSIの回路パターン転写に用いられる光縮小露光装置（ステッパ）は、4～5倍に回路パターンを拡大したフォトマスクを原版として使用しており、回路パターンの超微細化、高集積化によって、このフォトマスクの製作技術の確立がますます重要となってきた。当社では、このようなニーズにこたえるために、0.18 μmから0.15 μmデバイス対応のフォトマスク製作を可能とする高精度な電子ビーム（EB：Electron Beam）描画装置 EX-11と高感度マスク欠陥検査装置 MC-3000を開発した。これらの装置にはEB光学系自動調整、鏡筒内洗浄、リアルタイム近接効果補正、欠陥検出アルゴリズムなど当社独自の新しい技術が数多く導入されている。

Optical 4 to 5x reduction printing lithography is now the most popular method of LSI circuit pattern fabrication on a wafer. The photomask fabrication technology is an important issue in this optical lithography, because the photomask is used as the negative for printing and circuits with submicron structure continue to become smaller in size.

We have developed the EX-11 high-precision electron beam writing system and the MC-3000 defect inspection system to enable photomask fabrication for 0.18 μm to 0.15 μm devices. Many breakthrough technologies were developed and successfully incorporated into these systems, such as automatic control of the electron optical column, in-situ cleaning of electron optical deflectors, real-time proximity effect correction, and a new defect detection algorithm.

## 1 まえがき

LSIの回路パターンは、ステッパーと呼ばれる光縮小露光装置を用いてウェーハ上にパターンを転写して作成する。このステッパーでは、4～5倍に回路パターンを拡大したフォトマスクを原版として使用するため、このフォトマスクの完全性（パターン精度及び無欠陥など）への要求は非常に高くなっている。特に、回路パターンの超微細化・高集積化によって、ステッパの限界解像度近傍でパターン転写が行われることから、更に高精度化が要求され、高精度フォトマスク製作技術の確立がデバイス製作の鍵（かぎ）とされている。

このため、次世代（線幅0.18 μm～0.15 μmの1GビットDRAMの量産から4GビットDRAM試作段階の世代）のフォトマスク製作を可能とする高精度電子ビーム描画装置 EX-11と、パターン欠陥を高感度で検出するマスク欠陥検査装置 MC-3000を開発した。

以下に、そのシステムの概要と特長について述べる。

## 2 マスク製作システム

フォトマスク製作では、LSIの設計データからEB描画装置や欠陥検査装置に用いられる描画・検査データを作成する“データ変換システム”と、“マスク生産管理システム”が有機的に接続されて使用される（図1）。このシステムでは、変換済みのデータを描画に使用した後、同じデータで検査を行

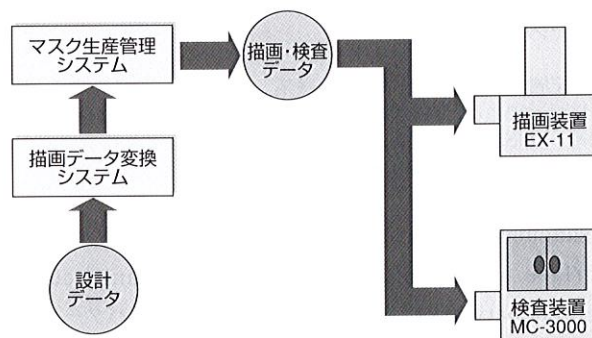


図1. マスク製作システム EB描画装置と欠陥検査装置が有機的につながることで、マスク生産は効率的になる。

Mask fabrication system

うようにデータが管理され、効率的な生産が可能となる。

以下に述べるEB描画装置と欠陥検査装置は、この“生産管理システム”に組み込まれて最大の性能を発揮する。

## 3 高精度EB描画装置 EX-11

### 3.1 システム概要

EX-11は、当社が既に関開したEB描画装置 EX-8<sup>(1)</sup>やEX-8D<sup>(2)</sup>をベースに関開された可変成形ビームベクタスキャンステージ連続移動型マスク描画装置<sup>(註1), (註3)</sup>である。システム概要を図2に、装置構成を図3に示す。既に関開されているEBデータ変換システムを更に高速・高精度化した変換システム



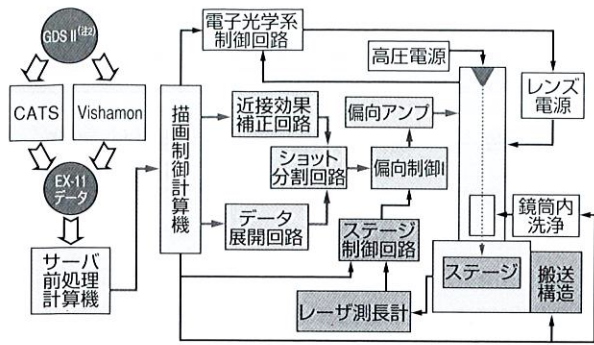


図2. EX-11データフローとシステム構成 リアルタイム近接効果補正を組み込んだシステム構成と、データの流れを示す。  
Data flow and configuration of EX-11 system

表1. EX-11システムの仕様  
Specifications of EX-11 high-precision electron beam writing system

項目	仕様
加速電圧	50 kV
電流密度	40 A/cm <sup>2</sup> (最大)
ビーム形状	可変成形ビーム (四角形・三角形)
ビーム走査方法	ベクタスキャン
最大ビーム寸法	2.55×2.55 μm <sup>2</sup> (最大)
主偏向領域	1,024×1,024 μm <sup>2</sup>
副偏向領域	64×64 μm <sup>2</sup>
アドレス単位	1.25 nm
ステージ	連続移動
マスクサイズ	5, 6, 7, 8, 9インチ (230mm) マスク

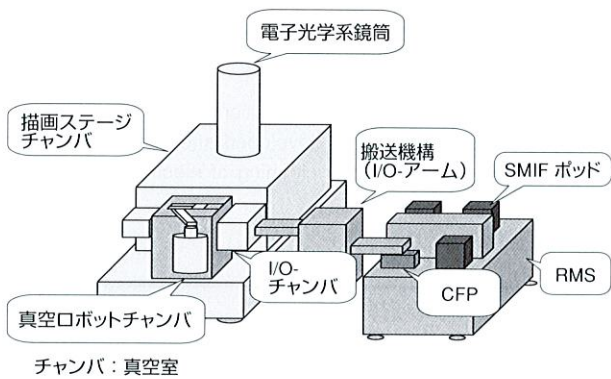


図3. 装置レイアウトとマスク搬送系 装置は、電子光学系、機械系、描画制御系などから構成され、マスク搬送にはごみ付着を防止するため、RMS、CFPなど新しい概念が導入された。  
System configuration and mask handler

“Vishamon(VSB(Variable Shaped Beam:可変成形ビーム) interface system highly assisted by a manufacturing oriented network)”は1GビットDRAM相当のパターン設計データを3~4時間でEB描画データに変換できる。

一方、市販のCATS<sup>(注3)</sup>システムでのデータ変換も可能とした。描画データはサーバ計算機にいったん格納され、描画に必要な様々な処理を施し描画制御計算機のメモリに蓄えられる。同じデータを、近接効果補正回路とデータ展開回路に送り、ショット分割回路で電子ビームのショット形状と近接効果補正を加えたショット時間が割り当てられる。その情報はビームの偏向制御回路とブランキング回路に送られ描画が行われる。制御計算機は、マスクを搭載した高精度ステージやマスク搬送系、EB光学系も制御している。

装置基本仕様を表1に、描画方式の模式図を図4に示す。

(注1) EB描画装置の基本制御方式において、使用ビーム形状が可変成形ビーム(ビーム寸法が可変制御できるもの)、ビーム位置制御がベクタスキャン(照射すべき場所へ順次移動させる)、ステージ移動が連続移動方式(ステージを一定速度で移動させながら描画する)を組み合わせた装置。  
(注2) GDSIIは、米国Cadence Design Systems, Inc. のデータフォーマット(GDSII stream format)の商標。  
(注3) CATSは、Transcription Enterprises社の商標。

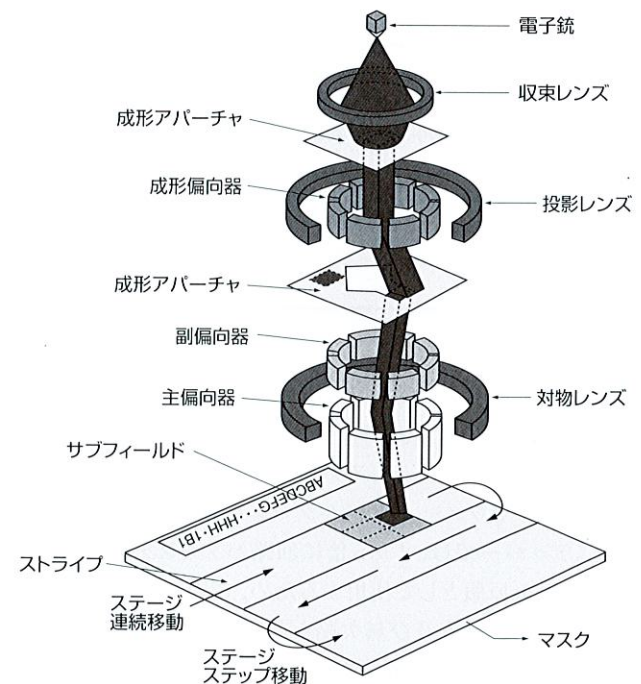


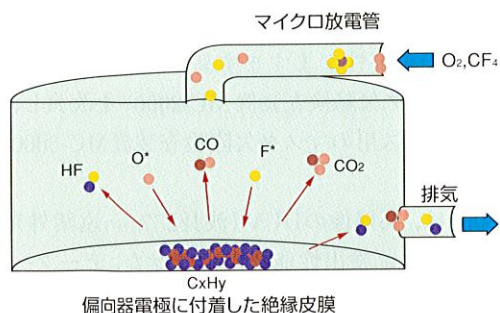
図4. 電子光学系と描画模式図 四角形、三角形を用いることで高速な描画が可能となっている。  
Electron optics and writing strategy of EX-11

電子光学系は、成形・主・副偏向器を備え、EBをアパーチャ(光学的絞り)によって四角形及び三角形に成形し、その寸法を最大2.55 μm<sup>2</sup>に変えてマスク上を走査する。偏向には高速高精度制御が可能な静電偏向を用いた。偏向領域は主偏向で1,024 μm<sup>2</sup>、副偏向で64 μm<sup>2</sup>、制御単位は1.25 nmとし、加速電圧は高分解能ビームが形成できるように50 kVとした。

### 3.2 高精度描画のために導入した新しい技術

(1) EBを制御する偏向器表面には徐々に絶縁膜が形成され、帯電によりビーム位置が変動する。この絶縁膜を、装置を分解せずに除去する鏡筒内洗浄機構を開発し搭載した。この機構では、図5の模式図に示すように、酸





HF: フッ化水素  
 O\*: 酸素ラジカル(励起原子)  
 CO: 一酸化炭素  
 F\*: フッ素ラジカル(励起原子)  
 CO2: 二酸化炭素  
 CxHy: ハイドロカーボン(炭素と水素の反応生成物)

図5. ラジカルを用いた鏡筒内洗浄の模式図 O<sub>2</sub>とCF<sub>4</sub>の混合ガスから、酸素とフッ素の活性種を生成して偏向器に流し、表面の絶縁皮膜と反応気化させて洗浄する。

In-situ cleaning using radicals

素(O<sub>2</sub>)とフロン14(CF<sub>4</sub>)ガスを活性化させ絶縁皮膜をガス化して取り除くことができる。

- EBの形状を正確に測定できる微小マークの製作法を確立し、電子光学系の光軸自動調整、ビームの回転や偏向幅を正確に調整するアルゴリズム、高速偏向ひずみ補正技術を開発・実用化した。これにより、nmオーダーのビームショットつなぎ精度が得られた。
- マスク基板から反射した電子がレジストを感光させ描画パターン精度を劣化させる。これは近接効果と呼ばれ、描画するパターン密度によってパターン寸法の変

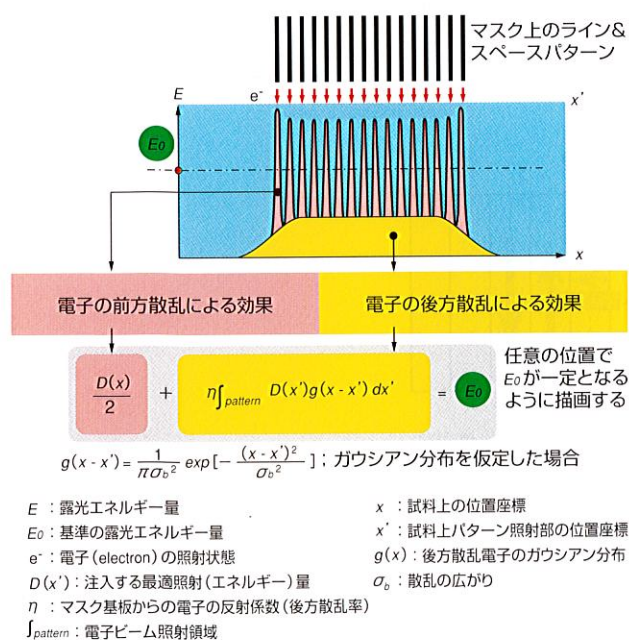


図6. 近接効果の説明と最適ドーズ量計算の積分方程式 後方散乱電子によって、L&S (Line and Space) パターンでは中央と周辺でドーズ量(ビーム照射量)が異なる。Eが一定となるようにして描画を行う。 Proximity effect correction and integral equation for optimum dose D(x)

化が生ずる。模式図を図6に示す。これを補正するため、図中の式をより厳密に解いて、ショットごとのビーム照射量を変える近接効果補正技術を確立した。また、新規な計算方法や描画中に補正値を計算できる高速演算回路の開発に成功し、補正精度5nm以下を得ることができた。

- マスク基板からの反射電子は、描画室内上面で再び反射し、マスク基板に降りかかり描画パターン精度を劣化させる。このため、ハニカム構造の反射電子防止板を開発し再反射を従来の30%に低減した。
- 高精度描画を行うため、EBの位置決め誤差を平均化する多重描画方式を採用した。図7に示すように、主偏向幅(1,024 μm)を4回ずらしながら描画すると同時に、副偏向幅(64 μm)内もずらして描画する。これによってランダム誤差や系統誤差を1/2~1/4に低減できる。
- 5~9インチマスク(230mm)を、カセットを使用しないで直接ステージ上に送り、3点支持によって確実に固定した。これによってマスクの保持ひずみによる精度劣化を、数nmに低減させた。
- SMIF (Standard Mechanical InterFace) の概念を取り入れ、クリーン化を徹底した。SEMI<sup>(注4)</sup>規格のSMIFポッド(容器)(図3)にマスクを入れ運搬し、局所クリーンルームを構成したRMS (Reticle Management System) 内にマスクを格納する。描画時、マスクはRMS内からCFP (Clean Filter Pod)に移し替えられる。CFPは特別設計のポッドで、真空と大気を繰り返すロードロック室(I/O-チャンバ:真空室への試料の出し入れ)内でマスク面にゴミが付着するのを従来比の1/30以下に防止できる。

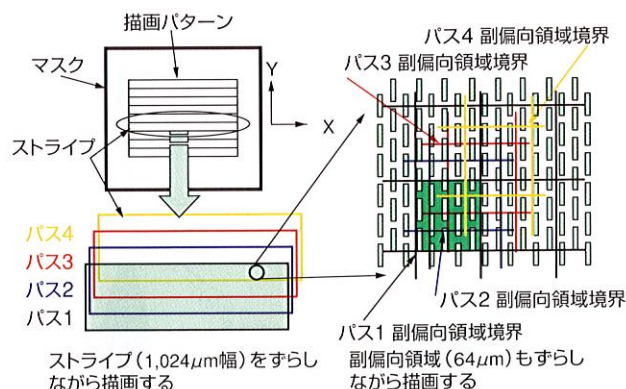


図7. 多重描画の方法 精度向上のため、同じパターンの偏向幅1,024 μmと副偏向領域64 μmを、4回ずらしながら描画していく。 Stripe and subfield boundary shift in multipass writing

(注4) SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International)は、半導体装置関連の規格統一を図る業界団体。



表2. 描画精度仕様と評価結果

Pattern accuracy specification and evaluation results

精度項目	精度 (nm)	評価結果 (nm)	備考
ローカル位置	±10 (8)	X:11 Y:10	486点測定での 最大値
グローバル位置	22 (20)	X:13 Y:17	3σ スケール補正あり
重ね合わせ	15	X:16 Y:15	3σ 5枚のマスク
ローカルCD	±17 (13)	X:16 Y:14	フィールド境界を 含む最大値
グローバルCD	20	X:20 Y:21	3σ 169点測定

ローカル：1mm程度の領域内    グローバル：マスク全面領域  
\*精度の ( ) 内の値は目標値

### 3.3 EX-11の目標描画性能と評価結果

EX-11精度仕様(カッコ内の数値は目標数値)と、評価結果を表2に示す。ローカル位置精度は主偏向領域内の、グローバル位置精度は130mm<sup>2</sup>内の決められた場所でのパターン位置決め精度を示す。重ね合わせ精度は5枚のマスクを描画し、同じ位置での各マスクパターンの位置ずれ量を示している。ローカルCD(Critical Dimension)は主偏向領域内の、グローバルCDは130mm<sup>2</sup>内の決められた場所でのパターン線幅のばらつきを示す。EX-11はほぼ目標性能を達成するとともに、SIA(Semiconductor Industrial Association: 米国半導体工業会)ロードマップが要求している0.18μm対応マスクの精度を満たしている。最近の評価結果では、カッコ内の数値も達成することが確かめられている。

回路パターンの微細化が進むにつれ大きな問題となり、マスク欠陥検査の重要性がますます高くなってきている。そこで、従来のマスク欠陥検査装置MC-2000<sup>®</sup>を改良し、0.18~0.15μm デバイス用のマスク欠陥検査装置MC-3000を開発した。

MC-3000は、高解像のDUV(波長257nm遠紫外光)光学系を搭載して欠陥検出性能を向上させた、データベース方式マスク欠陥検査装置である。光学系は(株)トプコンで開発した。データベース方式とは、マスク作成時に使用した描画データを参照しながら比較しパターンの欠陥を検出する方式で、信頼性の高い欠陥検査ができる。

MC-3000のシステム構成と外観を図8、図9に示す。XYステージ上に固定したマスクに検査光(DUV光: 光源にア

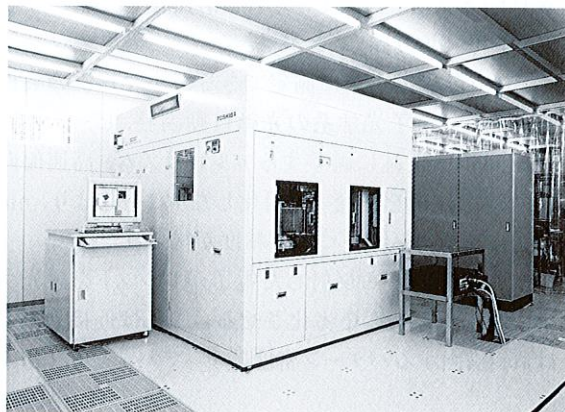


図9. MC-3000 手前のEWSから簡単な操作で検査を実行できる。MC-3000 defect inspection system

## 4 マスク欠陥検査装置 MC-3000

### 4.1 システム概要

マスクの欠陥によるデバイス製作時の歩留率の低下は、

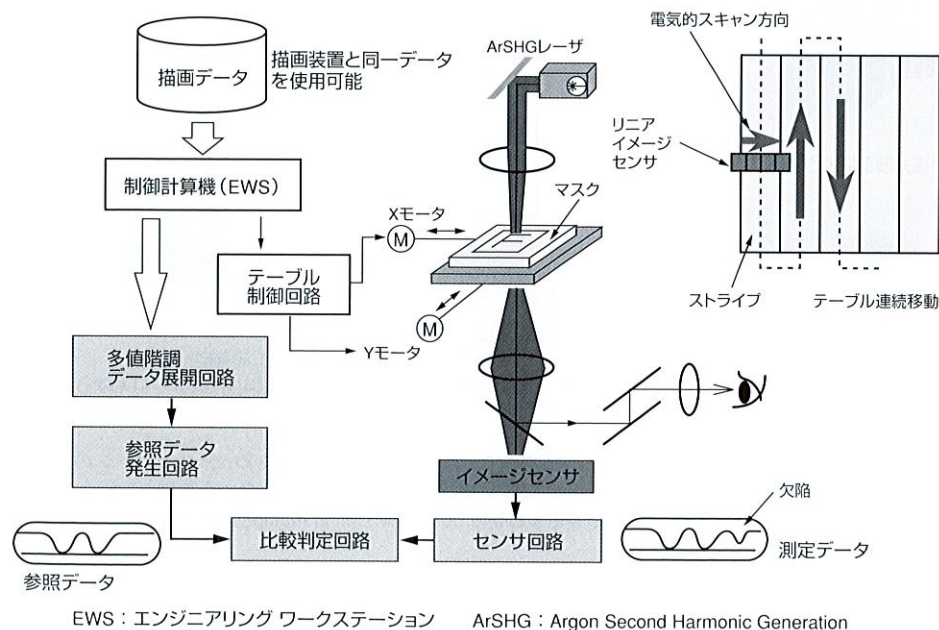


図8. データベース方式マスク欠陥検査装置の構成 測定したパターン二次元像データと、描画データから作成された二次元像とを限りなく一致させることが、検出率向上につながる。

Configuration of die-to-database mask defect inspection system



ルゴンレーザを使用)を照射して、透過光をCCD(電荷結合素子)ラインセンサで検出し、二次元像として比較判定回路に導く。一方、その撮像位置に相当する基準二次元像を描画データからリアルタイムで作成し、両者を比較判定回路で比較し欠陥を検出する。6~9インチのマスクは、連続で22枚検査できる。

表3に、MC-3000の検査性能仕様を示す。

表3. MC-3000システムの仕様  
Specifications of MC-3000 defect inspection system

項目	仕様		
光学系(波長, NA)	257nm, 0.75		
マスク寸法	6インチ~9インチ(230mm)		
ベリクル検査 <sup>(注5)</sup>	可能		
ハーフトンマスク	可能		
検査倍率モード	10モード	15モード	20モード
画素寸法(μm)	0.1	0.15	0.2
検出感度(μm)	0.12	0.16	0.18
評価結果(黒/白欠陥)	評価中	0.13/0.15	評価中
検査時間(100mm×100mm)	280分	133分	80分

NA (Numerical Aperture) : 開口数

#### 4.2 MC-3000の特長

- (1) データベース比較方式であるため、厳密な欠陥検査が可能である。解像性能の高いDUV光学系を搭載することによって高感度検出を可能とした。
- (2) 比較の基準となる二次元像は、光学系やセンサ隣接画素間で生ずる像の“ぼけ”を考慮したフィルタリング処理で求め、測定データとの一致度を向上させた。また、比較基準となる二次元像パターンのコーナを丸くしたり、リサイズ(太さの調整)などの処理も可能とした。これによってマスク製造プロセスへの柔軟な対応が可能となり、欠陥検出感度を向上することができた。
- (3) パターンのコーナ部分や直線エッジ部などを特徴抽出して、欠陥判定のしきい値を個別に設定できる柔軟な欠陥判定アルゴリズムを採用した。また、ハーフトンマスクでも、センサ受光レベルに合わせて基準二次元像を作成する新しいキャリブレーションアルゴリズムを開発し、高感度検査を可能とした。

#### 4.3 MC-3000の欠陥検出性能

表3に示すように、MC-3000の代表的な15モードでの評価で、最小欠陥検出サイズ0.18μmの検出(コーナ欠陥を除く)が可能であることを確認した。このモードでの検査時間は133分/100mm<sup>2</sup>である。

(注5) マスク表面を保護するベリクル(枠付き保護膜)を付けたまま行う検査。

(注6) 基板上に微細パターンを形成する技術。

## 5 あとがき

0.18μmデバイス用フォトマスクを製作するための鍵となるEB描画装置EX-11と、マスク欠陥検査装置MC-3000を東芝機械(株)と共同で開発した。EX-11は更に改良によって0.15μm対応マスク描画が可能である。今後、検査装置を含めたマスク製作システムとして、0.15μm対応マスク製作技術の確立を目指していく予定である。

1999年7月、米国で開かれたNGL(Next Generation Lithography)会議で将来のリソグラフィ技術<sup>(注6)</sup>について話し合いがあった。そこでは、0.07μmデバイス(64GビットDRAM相当)まで短波長や極短波長を用いた光リソグラフィ技術が用いられると予想されている。今後とも光リソグラフィ技術は重要であり、その鍵となるフォトマスクを製作するための、より高精度なEB描画装置並びに検査装置を開発していく必要がある。

なお、EB描画装置に関する研究の一部は、通商産業省プロジェクト「超先端電子技術開発促進事業」の一環として、ASET(Association of Super-advanced Electronics Technologies:技術研究組合 超先端電子技術開発機構)がNEDO(New Energy Development Organization:新エネルギー・産業技術総合開発機構)から委託されて実施した。

## 文献

- (1) Takigawa, T., et al. A high accuracy and high throughput electron beam reticle writing system for 16M dynamic random access memory class and beyond devices. J. Vac. Sci. Technol. B.8, 6, 1990, p.1877-1881.
- (2) Hattori, K., et al. Electron-beam direct writing system EX-8D employing character projection exposure method. J. Vac. Sci. Technol. B.11, 6, 1993, p.2346-2351.
- (3) Tojo, T., et al. "Advanced electron beam writing system EX-11 for next-generation mask fabrication". Proceedings of SPIE, Vo.3748, Photomask and X-ray Mask Technology VI. 1999-04, p.416-425.
- (4) Tabata, M., et al. "A new die-to-database mask inspection system with i-line optics for 256Mbit and 1Gbit DRAMs". Photomask Japan'97 Symposium on Photomask and X-ray Mask Technology. 1997-04, Photomask Japan. 1997, p.106-107.



東条 徹 TOJO Toru, D.Eng.

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー主幹, 工博。電子ビーム描画装置, マスク欠陥検査装置の研究・開発に従事。日本機械学会, 精密工学会, 応用物理学会会員。Advanced LSI Technology Lab.



土屋 英雄 TSUCHIYA Hideo

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー主務。マスク欠陥検査装置の研究・開発に従事。電気学会会員。Advanced LSI Technology Lab.



野村 武彦 NOMURA Takehiko

生産技術センター 光応用システム技術センター主任研究員。マスク欠陥検査装置の研究・開発に従事。日本機械学会, 精密工学会会員。Quality Control System Technology Center