

電子ビームマスク描画装置 EBM-8000

EBM-8000 Electron Beam Mask Writer for Mask Fabrication in Manufacturing of Semiconductor Devices of 22 nm Node and Beyond

吉武 秀介

斉藤 匡人

■ YOSHITAKE Shusuke

■ SAITO Masato

半導体デバイス製造用のリソグラフィを支える重要な要素であるマスクは、主に電子ビーム描画装置により製造されている。マスク製造プロセスにおいて描画装置は、CADなどのツールを用いて電子設計された回路図面を、電子回路の原版となるマスクという形に具現化している。特に電子ビームは、電磁的な制御により照射位置や照射形状の高速切替が可能であるという特性を生かし、長年にわたりマスク作成用のリソグラフィ手段として使用されてきた。

(株)ニューフレアテクノロジーは、東芝で開発されたベクタスキャン型で可変成形方式の電子ビーム描画技術を基に、精度と生産性に優れた電子ビームマスク描画装置 EBM シリーズを開発し提供している。今回、ハーフピッチ (hp) 22 nm 世代に必要なマスクの製造用に最新機種 of EBM-8000 を開発した。パターン of 微細化と複雑化に伴う生産性の低下を克服し、この世代 of マスクに要求される厳しいパターン of 寸法精度と位置精度を達成した世界唯一^(注1) of 描画装置である。2010 年に東芝向け初号機を納入し、先端的な半導体デバイスの製造に貢献している。

The mask is a vital element of lithography technology, which transfers a device circuit pattern to silicon wafers, for the high-volume manufacturing of semiconductor devices. Electron beam (EB) mask writers have long been used to fabricate masks, taking advantage of electron beams to electromagnetically control the irradiation position and feature size.

NuFlare Technology, Inc. is engaged in the development of the EBM series of EB mask writers with high accuracy and high manufacturability based on a variable-shaped beam and vector scanning technology developed by Toshiba. The EBM-8000, the latest model in the EBM series, is the world's only EB mask writer for the 22 nm half-pitch generation of devices focusing on increasing throughput and improving the dimensional and positional accuracy of patterns. The first EBM-8000 was delivered to Toshiba in 2010, and is contributing to the development and fabrication of leading-edge masks for our advanced semiconductor devices.

1 まえがき

hp 22 nm 世代の半導体デバイスの製造に使用されるリソグラフィ手法として、1:4 縮小転写技術であるダブルパターンニング又は二重露光⁽¹⁾などの延命技術を使用した ArF (フッ化アルゴン) 液浸リソグラフィ、波長 13.5 nm の極端紫外光 (EUV: Extreme Ultraviolet) を光源に使用する EUV リソグラフィ、及び 1:1 のコンタクト転写であるナノインプリントリソグラフィといった候補が挙がっている。いずれの手法をとっても、原版となるマスクは不可欠である。

マスクの製造では、設計されたパターンを忠実にかつ精度よく再現するとともに、より高い生産性が期待されているが、これらは描画装置の性能によるところが大きい。

(株)ニューフレアテクノロジーが開発した最新の電子ビーム描画装置 EBM-8000 は、hp 22 nm 世代のデバイス製造に必要なマスクの開発と生産に適用可能な装置である。この装置は、hp 22 nm 世代に要求される厳しいパターン of 寸法精度と

位置精度⁽²⁾を達成した世界唯一 of 描画装置である。また、精度向上と描画時間短縮という二律背反を克服するために、様々な新技術を導入している。

ここでは、EBM-8000 の特長と性能、特に描画時間の短縮と精度の改善について述べる。

2 装置仕様と特長

EBM-8000 の主な仕様を表 1 に示す。

加速電圧は、電子ビームの分解能を決定する重要な要素で、加速電圧が高いほど電子ビームの分解能は高くなるが、レジストとの相互作用が弱くなるため、より多くのビーム照射が必要となり、生産性の低下を招く。EBM シリーズでは、マスク描画に必要とされる解像性と描画精度、描画時間などを考慮したうえで、加速電圧を 50 kV としている。また、EBM シリーズでは当初から、電子ビームの形状を長方形あるいは三角形に、サイズはそれぞれ可変に成形し、描画パターン of 存在する場所だけに位置決めして照射する、ベクタスキャン型で可変成形方式 of 描画方式を採用している。このため、ビームの形状やサ

(注1) 2012年3月現在、当社調べ。

表1. EBM-8000の主な仕様

Main specifications of EBM-8000 EB mask writer

項目	仕様
加速電圧	50 kV
電流密度	400 A/cm ²
電子銃	LaB ₆
最大ショットサイズ	0.35×0.35 μm
主偏向領域サイズ	120×180 μm
副偏向領域サイズ	10×10 μm
標準データフォーマット	VSB-12
データアドレスユニット	0.1~100 nm (可変)
パターン位置精度	4.3 nm (3σ)
パターン寸法精度	1.3 nm (3σ)

VSB: Variable Shaped Beam (可変成形ビーム)

イズを変えるための偏向器を備えるなど、電子光学鏡筒及びその制御が複雑となるが、従来主流であったラスラスキャン型でガウシアンビーム方式の描画装置と比較すると、描画時間は大幅に改善されている。

EBM-8000は、次の三つの新技術を実用化することにより、パターン位置精度 4.3 nm (3σ)、パターン寸法精度 1.3 nm (3σ)、及び描画時間の短縮という目標を達成した。

- (1) 400 A/cm²という高電流密度の電子ビームが照射可能な電子銃
- (2) 高速で高精度のビーム偏向が可能なDAC (Digital to Analog Converter) アンプ
- (3) 安定した描画動作で優れたパターン位置精度が可能な熱環境制御技術

3 描画時間と生産性

描画時間は、簡易的には以下の式で表すことができる。

$$T = N \times \left(\frac{D}{J} + t_s \right) \quad (1)$$

T : 描画時間 (μ s)

N : ショット数

D : 照射量 (μ C/cm²)

J : 電流密度 (A/cm²)

t_s : 照射位置整定時間 (μ s)

可変成形ビーム方式の描画装置では、成形された個々のビームをショットと呼び、複数のショットを順次照射していくことにより基板上にパターンを形成する。一つのショットを照射するのに要する描画単位時間は、レジストを反応させるために必要な照射時間 (D/J) と、目標の位置にショットを位置決めするのに必要な t_s の和となり、これに設計パターンを全て表現するのに必要な N を掛けた時間が、マスク全体の描画時間と

なる。

半導体デバイスの微細化が進むにつれて、マスクパターンの複雑化が進み、 N は年々増加する傾向にある。また、レジストの反応過程で生じるプロセスのぼけ⁽³⁾や、ショットノイズと呼ばれる照射電子の確率的偏在に起因するパターンエッジラフネス⁽⁴⁾を改善するため、レジストは低感度化へ進む傾向にあり、より多くの D が必要となっている。更に、レジストヒーティングと呼ばれる現象⁽⁵⁾を回避するために、同一ショットを複数回に分けて同一場所に照射する多重描画が主流となってきており、 N は、ますます増加する傾向にある。

EBMシリーズでは、装置開発におけるマスク生産性向上の主な戦略として、描画時間を短縮するため J を増加し t_s を短縮することを進めてきた。この戦略に従い、EBM-8000では、電子源である電子銃の高輝度化、及びビームの形状と照射位置を制御するための電界制御用DACアンプの高速化を行った。DACアンプに関しては高速化と同時に高精度化も達成している。更に、描画システム全体として安定的な描画動作を実現する熱制御技術の導入により、描画精度の向上も達成している。

3.1 高輝度電子銃

EBMシリーズでは、大きな電流値を取れるホウ化ランタン (LaB₆) の結晶を用いた熱電子放出型の電子銃を使用している。単位面積当たりの電流値である電流密度を向上させるためには、電子銃から放出されるエミッション電流を大きくすればよい。エミッション電流を増加させるには、高圧電源の印加電圧を大きく取り、電子銃からより多くの電流を引き出せばよいが、同時にばらつきも大きくなるため、描画精度が劣化するおそれがある。安定的な制御のためには、印加電圧を制御する高圧電源の高精度化が必要になるが、困難な技術開発となることが予測された。

ところが、電子銃の単位面積当たりの放出電流量を表す輝度を向上させると、同じ印加電圧による制御でも大きなエミッ

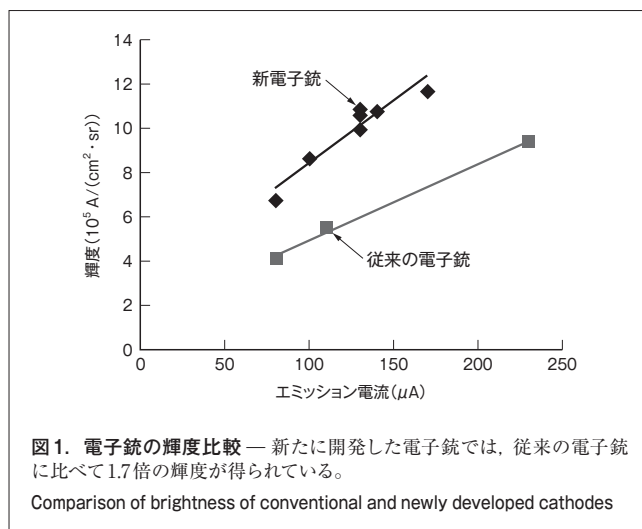


図1. 電子銃の輝度比較 — 新たに開発した電子銃では、従来の電子銃に比べて1.7倍の輝度が得られている。

Comparison of brightness of conventional and newly developed cathodes

ション電流を得ることが可能になる。EBM-8000では、電子銃の構造を工夫して、輝度を向上させることに成功した。

図1は、従来の電子銃とEBM-8000のために新たに開発した電子銃について、輝度とエミッション電流の関係を示している。EBM-8000で採用した電子銃では、従来比で1.7倍の高輝度化が実現されている。この高輝度電子銃を適用することで、EBM-8000では400 A/cm²の電流密度を達成した。

3.2 高速偏向DACアンプ

ベクタスキャン方式の描画装置では、成形した電子ビームを設計に応じた任意の場所に位置決め（照射位置整定）して照射するという動作を順次繰り返し、目標の回路パターンを形成する。したがって、この照射位置整定時間の短縮が、描画時間短縮のために非常に重要である。

EBMシリーズでは、主偏向と副偏向という2段階の偏向制御でビーム照射位置を決定しているが、このうち、副偏向制御時の照射位置整定時間が全体の描画時間に対して大きな割合を占めている。この照射位置整定時間を左右するのが電界制御に使用されるDACアンプの整定時間で、この時間の短縮が全体の描画時間短縮に効果的である。

EBM-8000用に開発された副偏向DACアンプの整定時間は32 nsであり、従来装置に比べて20%の高速化に成功した。同時に、副偏向領域のサイズを、従来装置⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾の8×8 μm領域から10×10 μmへ拡大することにも成功した。更に、開発された主偏向DACアンプの整定時間短縮の効果も合わせると、従来装置比で約30%程度の整定時間短縮を達成している。

表2は、モデルレイアウトを使用してシミュレーションにより見積もった、EBM-8000と従来装置の描画時間の比較である。高輝度電子銃と高速偏向DACアンプの総合効果により38%の描画時間短縮を実現した。

3.3 熱環境制御技術

EBM-8000には、二つの重要な熱環境制御技術が盛り込まれている。

一つは、真空ポンプの改善である。従来使用していたポンプの制御回路は、回路の設置環境温度変化により制御周波数変動し、ポンプの回転数が変動するという問題があった。ポンプの回転数と、試料ステージ位置計測用の干渉計部品の共振周波数が近接していたため、回転数が変動するとこの部

品が自励振動を起こし、パターン位置精度の劣化を招いていた。そこで、回転数を安定化することができるデジタル制御回路を持つ真空ポンプを導入することで、精度劣化を防いでいる。

もう一つは、試料ステージの駆動系部分の発熱対策である。EBMシリーズでは、駆動源からの力を発熱の小さい摩擦駆動機構を介してステージに伝達し、かつその駆動方向をクロスローラガイドにより制限することで、高精度なステージの動作を実現してきた。しかし、マスクの要求精度が厳しくなるに伴い、ステージの加減速に伴う発熱によるステージの計測位置誤差が無視できなくなってきた。EBM-8000では、駆動系部分に追加の恒温化対策を施し、計測精度の安定したステージ制御を実現した。

4 描画精度

4.1 パターン位置精度

標準レイアウトを使用して計測した、EBM-8000のパターン位置精度の評価結果（重ね合わせ精度）を表3に示す。

この評価においては、3枚のマスクを作成し、マスク上のパターン位置精度をそれぞれ測定した。3枚のマスク間の重ね合わせ精度は3 nm (3σ) 以下の値であり、仕様値である4.3 nm (3σ) を大幅に下回っている。

電子ビーム描画に固有の問題として、レジストの帯電効果によるパターン位置精度の劣化が知られている。マスク表面に塗布されているレジストが、照射された電子ビームで帯電することによって電界が発生し、この電界の影響によりビーム照射位置がずれて、パターン位置精度が劣化する現象である。

当社は、この帯電効果によるパターン位置ずれを補正するための帯電効果補正 (CEC)^{(9), (10)} 機能を開発した。

図2は、実デバイスのパターンを模擬して意図的にパターン密度を変調させた3種類のテストレイアウトを使用し、パターン位置精度を評価した結果である。この結果から、実デバイス相当のマスクにおいても、描画レイアウトに依存することなく、パターン位置精度は4 nm (3σ) 以下であり、仕様値の4.3 nm (3σ) 以下を達成した。

4.2 パターン寸法精度

標準評価レイアウトを使用して計測した、EBM-8000のパ

表2. EBM-8000と従来装置の描画時間比較
Comparison of throughput of conventional EB mask writer and EBM-8000

項目	EBM-8000	従来装置
総ショット数 (Gショット)	1,128	1,128
電流密度 (A/cm ²)	400	200
レジスト感度 (μC/cm ²)	16.5	
副偏向セトリング (ns)	32.0	41.6
描画時間 (h)	17.5	28.9

表3. EBM-8000の重ね合わせ精度評価結果
Results of evaluation of mask-to-mask overlay accuracy of EBM-8000

マスク組合せ	重ね合わせ精度 (3σ) (nm)	
	X方向	Y方向
マスクNo.1-マスクNo.2	2.6	1.6
マスクNo.2-マスクNo.3	1.7	1.7
マスクNo.1-マスクNo.3	2.5	1.6

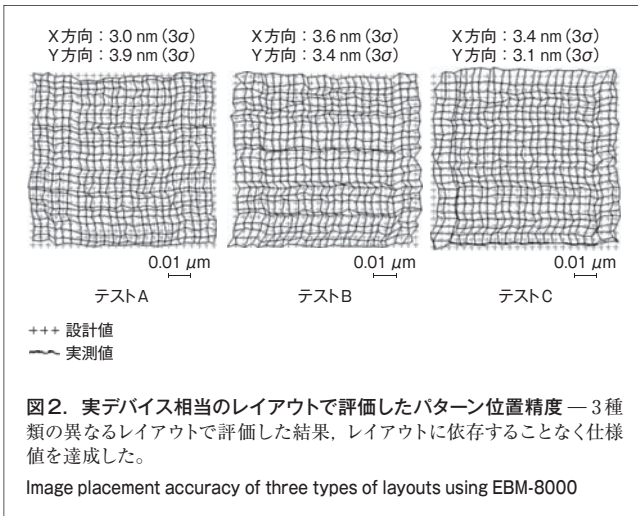


表4. EBM-8000のパターン寸法精度評価結果
Results of evaluation of pattern width accuracy of EBM-8000

項目	パターンの方向	仕様値 (nm)	パターン寸法精度 (3σ) (nm)		
			マスクNo.1	マスクNo.2	マスクNo.3
グローバルCD精度	横線	3.8以下	1.7	2.2	2.2
	縦線		2.1	2.2	2.4
ローカルCD精度	横線	1.3以下	1.0	1.1	1.0
	縦線		1.1	1.2	1.2

ターン寸法精度の評価結果を表4に示す。

描画後のパターン形成プロセスにおける変動を無視できる狭い領域でのパターン寸法精度 (ローカル CD (Critical Dimension) 精度), 及びマスク面内全面でのパターン寸法精度 (グローバル CD 精度) は, 仕様値とともに満足していることを確認した。この評価パターンは, 誤差要因となりうる様々な要素を必ず含むように意図的に設計されたパターンであり, 評価結果は, 実際の描画時に起こりうる, 最悪ケースでの精度を示している。

5 あとがき

当社は, hp 22 nm 世代のマスク描画に対応した電子ビームマスク描画装置 EBM-8000を開発し, その性能がこの世代のマスク製造に必要な精度の仕様値を満たしていることを確認した。特にパターン位置精度とマスク生産性の向上は, EBM-8000の開発における重点目標であり, それぞれ目標どりの性能を達成することができた。

今後も顧客のニーズを反映しながら, 装置性能の継続的な向上を図っていく。

謝辞

この装置の開発に際し, 貴重なご意見をいただいたディー・ティー・ファインエレクトロニクス (株) 技術部第一技術課の関係各位に感謝の意を表します。

文献

- (1) Dusa, M. Pitch Doubling Through Dual Patterning Lithography Challenges in Integration and Litho Budgets. Proc. SPIE. **6520**, 2007, p.65200G.1 - 65200G.10.
- (2) ITRS. "International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 2010". <http://www.itrs.net/>, (accessed 2012-01-19).
- (3) Yoshitake, S. Resolution capability of EBM-6000 and EBM-7000 for nano-imprint template. Proc. SPIE. **7470**, 2009, p.74700H-1 - 74700H-7.
- (4) Sunaoshi, H. Key improvement schemes of accuracies in EB mask writing for double patterning lithography. Proc. SPIE. **6792**, 2008, p.679208-1 - 679208-7.
- (5) Kamikubo, T. Study of heating effect on CAR in electron beam mask writing. Proc. SPIE. **6607**, 2007, p.660723.1 - 660723.9.
- (6) Kamikubo, T. New electron optics for mask writer EBM-7000 to challenge hp 32nm generation. Proc. SPIE. **7122**, 2008, p.71220J-1 - 71220J-8.
- (7) Kamikubo, T. Electron beam mask writer EBM-7000 for hp 32nm generation. Proc. SPIE. **7488**, 2009, p.74881E-1 - 74881E-10.
- (8) Tamamushi, S. A study of EB pattern writer system design for 22nm node and beyond. Proc. SPIE. **6607**, 2007, p.660722.1 - 660722.8.
- (9) Nakayamada, N. Modeling of charging effect and its correction by EB mask writer EBM-6000. Proc. SPIE. **7028**, 2008, p.70280C-1 - 70280C-12.
- (10) Nakayamada, N. Advancing the charging effect correction with time-dependent discharging model. Proc. SPIE. **8081**, 2011, p.808109.1 - 808109.9.



吉武 秀介 YOSHITAKE Shusuke

(株)ニューフレアテクノロジー 描画装置統括部 企画室参事。電子ビームマスク描画装置 EBM-8000の開発に従事。応用物理学会, 日本金属学会, 精密工学会, SPIE 会員。NuFlare Technology, Inc.



斉藤 匡人 SAITO Masato

研究開発センター デバイスプロセス開発センター主任研究員。マスクプロセスの開発に従事。Device Process Development Center