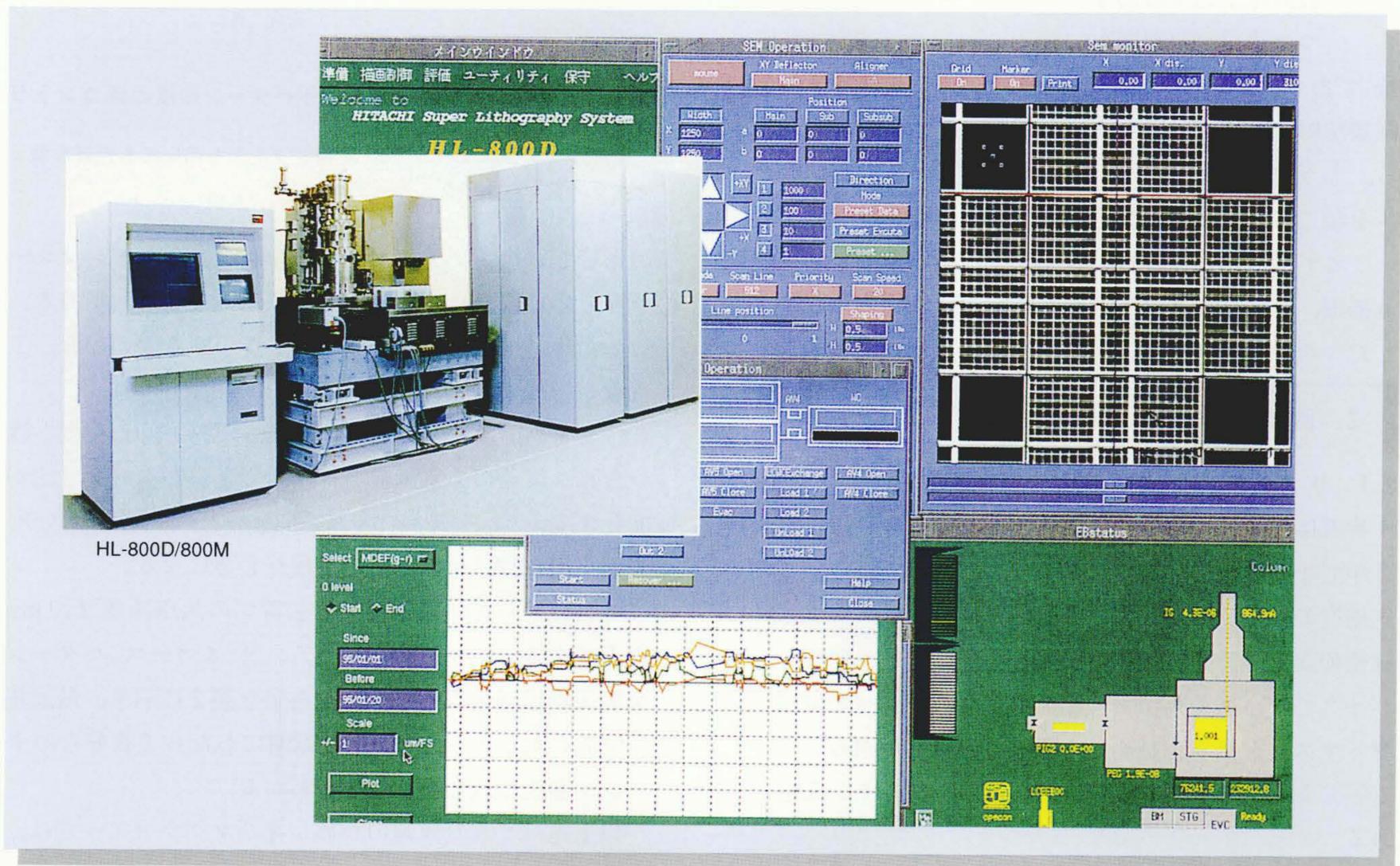


ウェーハ直描および マスク・レチクル作成用電子線描画システム

—高精度デバイスの量産を目指して—

Electron Beam Direct Writing and Mask/Reticle Writing System

水野一亥 Kazui Mizuno 松坂 尚 Takashi Matsuzaka
法元盛久 Morihisa Hôga 松岡玄也 Gen'ya Matsuoka



電子線描画装置と制御画面

電子線描画装置“HL-800D/800M”では、グラフィカルな画面の表示と、操作性を配慮している。マークのSEM(走査電子顕微鏡)像(画面の右上)、収集したデータのプロット(同左下)、装置の稼動状況(同右下)などが、すべて制御計算機の画面に表示される。

電子線描画装置は、ウェーハに直接パターンを描画する直接描画の分野と、マスク・レチクルの製作分野で用いられている。

直接描画の領域での電子線描画技術は、これまで先端デバイスの研究、開発用に主として用いられてきた。しかし、近年の半導体デバイスの微細化、高集積化に伴い、これまで用いられてきた光リソグラフィー技術は限界に近づきつつあり、マスクを透過する光の位相を制御する位相シフト法などの超解像技術を用いても、満足するパターンの形成が困難になってきている。このため、光リソグラフィーでは困難な工程に、電子ビーム描画装置を

適用してデバイス生産を行うようになってきた。電子ビーム描画装置“HL-800D”は、このような光との混用、いわゆるミックス アンド マッチでの需要を考慮し、そのための機能を備えたものである。

一方、マスク・レチクル製作の面での電子線描画装置は、これまで生産手段として使用されてきたが、これもデバイスの微細化に伴い、より高い精度の装置が求められてきた。これにこたえる装置として“HL-800M”を新たに開発した。同装置はHL-800Dをベースとしており、マスクプレートの自動装てん機構、高精度温度制御機能などを備えた生産用描画装置である。

1. はじめに

半導体デバイスの微細化に伴い、量産リソグラフィーのデザインルールは $0.25\mu\text{m}$ レベルに達しており、それに伴って、半導体製造装置の分野でも新たな技術を用いた装置が必要となってきた。これに対して、電子線描画装置は、高精度で、かつ微細な加工を実現するために有望視されているものである。

この装置は、二つの異なる分野で利用されてきている。一つは直描(直接描画)に使用されている装置(直描機)であり、ウェーハに感光材を塗布し、これに電子線を直接照射して所望のパターンを描画するための装置である。もう一つは、ステッパに用いられるマスクやレチクルを製造するための装置で、マスク機と称されている。

ここでは、ウェーハにパターンを直接描画するための直描機、およびマスク・レチクル製作を目的として開発したマスク機それぞれの現状と将来像について述べる。

2. 直描用電子線描画装置

2.1 リソグラフィーの動向と光露光の課題

半導体デバイスの微細化はとどまるところを知らず、3年で集積度が約2倍になるペースで進んでいる。この集積度の向上を推進している原動力は、リソグラフィー技術の向上である。近年 $0.25\mu\text{m}$ 以下のルールを持つデバイスでは、エキシマレーザを用いたステッパと位相シフトマスクを組み合わせ、解像力の向上が図られている。しかし、これらの方式には、以下に述べる課題がある。

(1) 位相シフト法が、必ずしもすべてのパターンに対して有効とは限らない。特に、パターン密度の少ないコンタクト系の層に対しては、像コントラストの低下が顕著となる。

KrFリソグラフィーで、位相シフトマスクを併用した際のパターン密度と像コントラストとの関係を、縦軸に像コントラスト、横軸にパターン密度をとって示したものを図1に示す。同図からわかるように、ラインアンドスペースのような周期的でパターン密度が高い場合には、高い像コントラストを得ることができ、この結果、実際には露光波長の約半分まで解像することが可能である。しかし、ホール層やゲート層などのパターン密度が低い孤立系のパターンに対しては、解像力が低下することがわかる。

(2) 光を用いた場合、レジスト表面や基板からの反射光

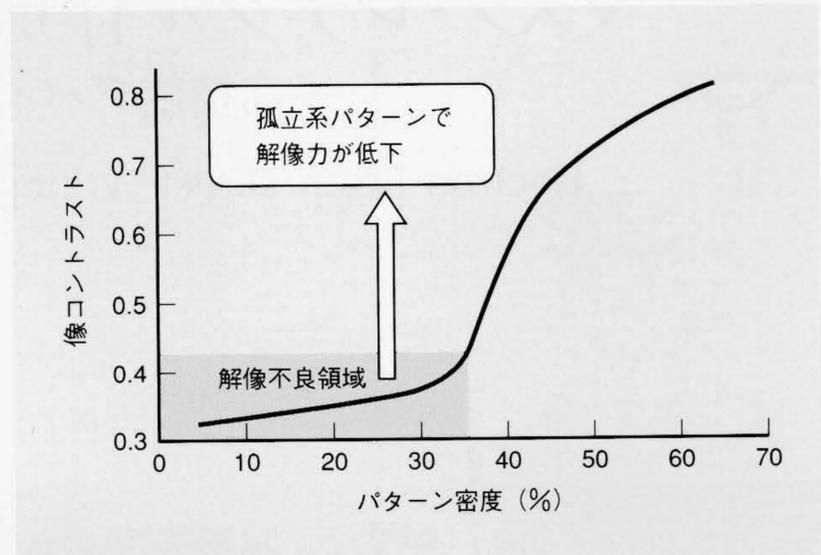


図1 光リソグラフィーにおけるパターン密度と像コントラストの関係

密度が少ないパターンでは、位相シフト法を用いても良好な像コントラストを得るのが困難である。

の影響で解像度が劣化する。この傾向は、エキシマレーザなどの短波長になるとますます強くなる傾向がある。このため、反射防止膜を設ける必要があることから、工程数が増加する。

(3) 光リソグラフィーでは、焦点深度が約 $1\mu\text{m}$ 程度と浅いため、段差のある試料では場所ごとにパターン寸法が変化する。これを防ぐために、多層レジストプロセスや、表面平坦(たん)化のための工程が必要になる。

これに対して、電子線描画装置での焦点深度は $10\mu\text{m}$ 以上である。 $0.2\mu\text{m}$ ラインアンドスペースパターンを電子線描画装置で描画した結果を図2に示す。最適焦点位置に対し、約 $\pm 16\mu\text{m}$ の範囲にわたって良好なパターンが形成されていることがわかる。

以上述べてきた課題のため、光リソグラフィーでは、微細性を要求される工程や、高精度なパターン均一性を必要とする工程で、要求性能を満足することがすでに困難になってきている。これに対して電子線描画では、光リソグラフィーで問題となるこれらの障害が発生しないため、微細性と高精度が要求される工程に対して、有効なリソグラフィー手段となってきた。

2.2 電子線描画装置とその特徴

日立製作所は、約15年前から電子線描画装置を製品化してきている。HL-800Dは $0.25\mu\text{m}$ デバイスに対応できる最新の機種である。HL-800D^{1),2)}は、高精度描画と高スループットの両立を目標として開発し、その実現のために、高加速電圧(50 kV)、一括描画方式、ステージ連続移動描画、ハードウェア回路による近接効果補正³⁾、カセット-カセット試料搬送機構などの技術を取り入れている。

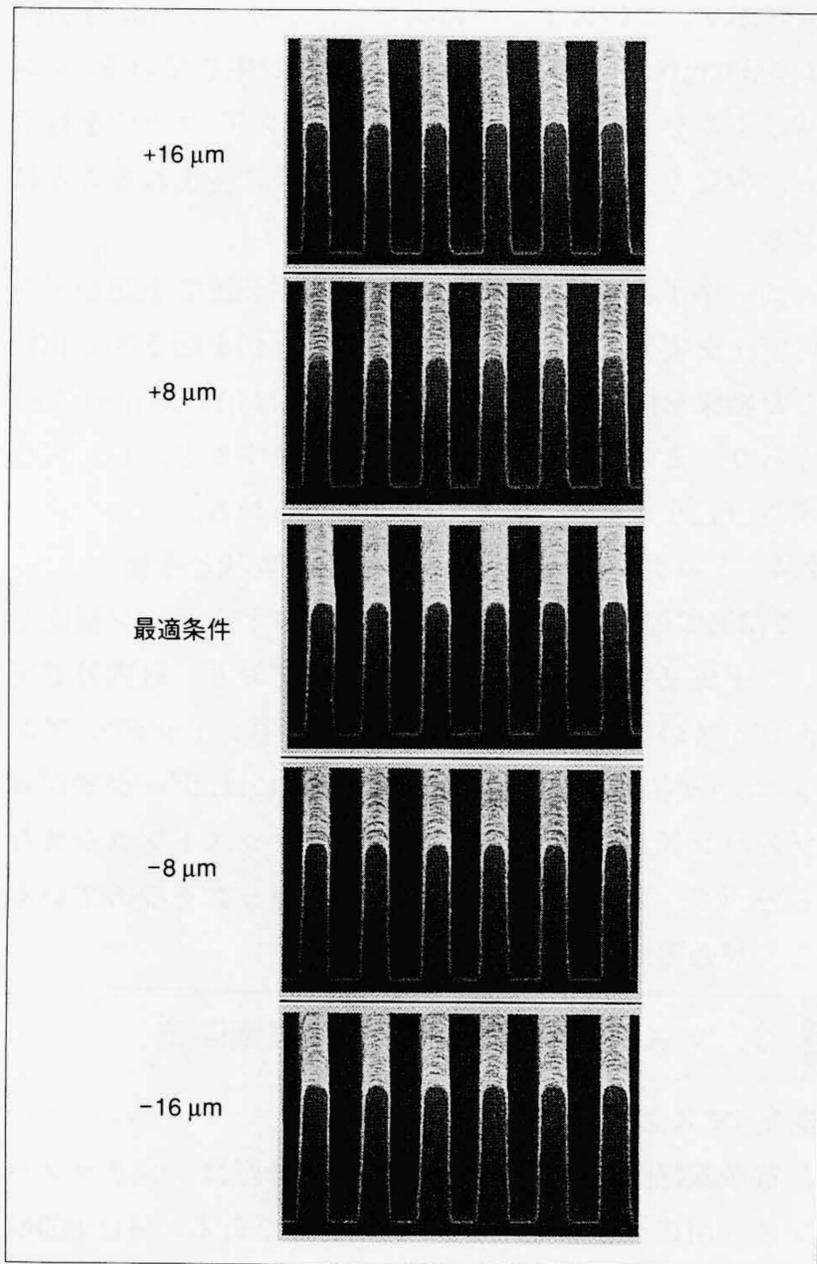


図2 電子ビームの焦点深度
0.2 μmライン アンド スペース パターンでの描画例を示す。約±16 μm程度の焦点深度が得られることがわかる。

このようにして開発したHL-800Dでは、従来に比べてスループットが飛躍的に向上しているが、デバイス製造工程でのすべてのリソグラフィー工程に適用するには、光ステップに比べて、スループットが不足しているのが実状である。したがって、先に述べた光リソグラフィーでの課題を解決し、しかも微細なデザインルールを持つデバイスの量産を実現するために、両技術の混用がその有力な手段となる。すなわち、微細性や高い寸法均一性が要求される工程に対して電子線描画技術を適用し、その他の工程では光リソグラフィーを用いるという、いわゆる「ミックス アンド マッチ方式」での利用である。

生産現場で、電子線描画装置をステップと共用して使用するには、両者の整合性を考えなくてはならない。特に、ステップで形成された層と、電子ビーム描画装置で形成された層との間で、高精度の合わせ描画をいかに実現するかが重要となってくる。

直描での合わせ描画の方式の概要を図3に示す。合わせ描画を行うには、下地パターンの位置を示すアライメントマークの検出が必要となる。このため、まずウェーハ上に形成されたアライメントマークの上を電子線で走査し、その際に得られるマークからの信号を検出する。次に、検出した信号を信号処理回路で処理してマーク座標を求め、その結果を装置を制御している計算機に送る。デジタル処理回路では、計算機から送られたマーク座標データを基に電子線の偏向量を決定し、アナログ回路に設定する。これにより、電子線は下地のパターンに合わせて偏向されることになる。

ステップと電子線描画装置とを組み合わせる場合に生じる誤差について次に述べる。ミックス アンド マッチでの誤差要因を図4に示す。ここでは、大別して2種類の誤差が発生する。

- (1) まず、ステップでウェーハ全面にパターン(チップ)を焼き付けていく場合には、XとY方向にステージを動かし、二次元的に焼き付けていくことになる。ステージの移動は、レーザ干渉計を用いて制御しているが、0.1 μm以下の精度で見ると、チップの中心位置は、理想的な配列格子からは、ずれて配置される。
- (2) 次に、1個のチップ内でのパターン位置精度を考えると、レチクル上のパターンは、ステップのレンズを経由してウェーハ上に転写されるが、レンズが持つひずみのため、最大50 nm程度の位置誤差が発生する。すなわち、図4に示したようにレチクル上では正しい格子状のパターンであっても、ウェーハに焼き付けるとゆがんでしまうことになる。

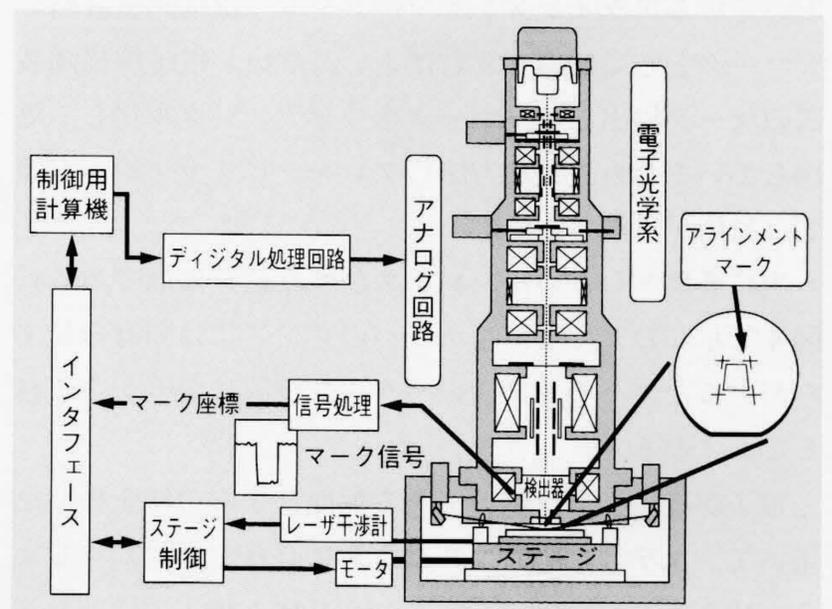


図3 合わせ描画方式の原理
合わせ描画方式電子線描画装置では、下地に形成されたマークからの信号をデジタル的に処理して合わせ描画を行う。

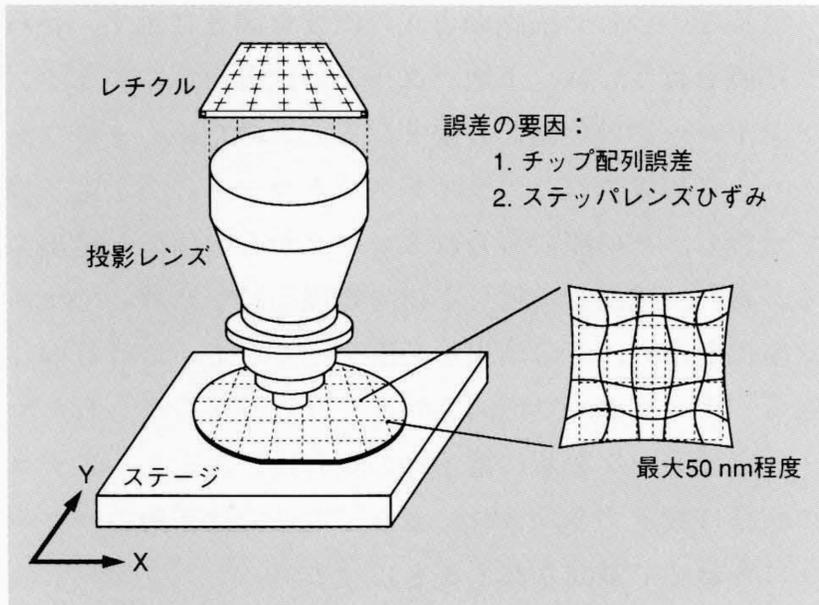


図4 ミックス アンド マッチでの誤差要因
 ステッパと電子線描画装置との混用では、チップ配列誤差やレンズひずみの補正が必要である。

これらの誤差はステッパ自身では補正できないので、合わせ処理で高い自由度を持つ電子線描画装置側でこれらの誤差を補正することになる。ミックス アンド マッチ描画に必須なこれらの機能について次の節で述べる。

2.3 ミックス アンド マッチ描画に必要な機能

まず、チップの配列精度への対応として、初めに各チップの位置を知ることが必要である。このためには、各チップの配置を示すアラインメントマークを検出することが必要となる。

ここで問題となるのは、光リソグラフィーと電子線描画装置で用いられているマークの形状とその配置である。光、電子線いずれの描画でも、それぞれ専用のアラインメントマークを使用しており、両者で形状、配置はまったく異なっている。これに対応するにはステッパで用いているアラインメントマークを電子線描画装置側でもマークとして認識できればよい。幸い、電子線描画装置のマーク検出では、マーク信号をデジタル化して処理しているため、処理方法にフレキシビリティがあるので、対応が可能である。

次に必要となるのは、レンズひずみ補正機能である。図4で示したように、ステッパのレンズには固有のひずみがあるため、チップ内のパターン位置に誤差が含まれることになる。

電子線描画装置に備えてある偏向ひずみの補正機能を用いて、ステッパのレンズひずみに合わせて偏向するように補正をかければよい。レンズひずみ補正の機能を示す実験結果を図5に示す。約15×15の格子状のパターンをウェーハに焼き付け、その配置を測定した結果を同図

(a)に示す。このステッパの場合、X方向で25 nm、Y方向で約50 nm(おのおの3σ値)のひずみが生じている。レンズひずみを考慮しないでミックス アンド マッチを行うと、少なくともこの誤差が合わせ誤差に含まれることになる。

同じ格子状のパターンを電子線描画装置で上記ひずみの補正を実施して描画し、その格子配列を図5(a)と比較した結果を同図(b)に示す。両者の誤差は14~18 nm(3σ)であり、この評価での測定誤差を考慮すると、レンズひずみが正しく補正されていることがわかる。

2.4 ミックス アンド マッチ描画の現状と今後

2.3節で述べた機能は、HL-800Dのオプション機能として平成9年からすでにリリースしており、社内外で実デバイスの試作に適用されている。今後、ミックス アンド マッチ描画をいっそう推し進めるには、データやジョブのハンドリング、装置の操作性、レジストプロセスなどの面で、光リソグラフィーとのギャップを埋めていくことが必要である。

3. マスク・レチクル作成用描画装置

3.1 マスク機の構成

電子線描画装置のもう一つの利用分野は、光リソグラフィー用のマスク・レチクルの製造である。HL-800Mは、先に述べた直接描画用装置“HL-800D”をベースに、0.25 μmレベルのデバイス用のレチクルを生産するために開発したもので、寸法精度0.03 μm、位置精度0.04 μm

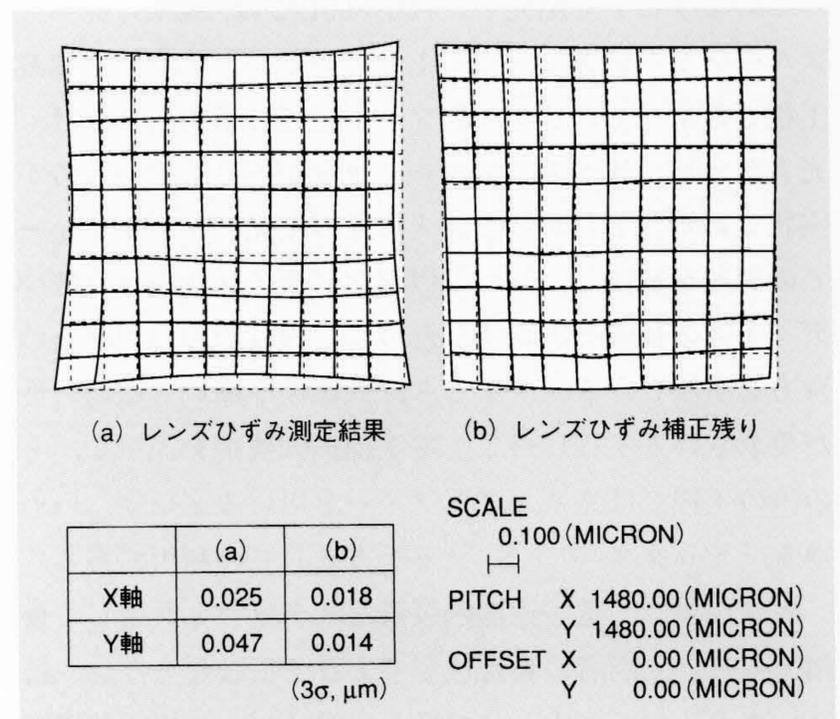


図5 レンズひずみ補正の実験結果
 レンズひずみ補正機能を用いることで、ステッパとの合わせ誤差を低減することが可能となる。

の性能を持つ^{4),5)}。必要な精度を得るために、直接描画機をベースに、機械的振動に対する強化を行い、高精度な温度補正制御の機能などを付加した。

この装置の主な特徴は以下の3点である。

- (1) パターン解像力を向上させるために、加速電圧を、従来機種に用いていた20 kVから50 kVに高電圧化した。
- (2) 高度なパターン寸法精度を実現するために必要な近接効果補正をハードウェア化し、高精度と高スループットを両立させた。
- (3) 全自動のプレート装てん機能を持たせ、自動化を推進するとともに、人手が介在することによる異物の発生を防ぐようにした。ブランクプレートは、専用のキャリヤ上に最大6枚置くことが可能である。

描画時には、プレートがロボット搬送アームによってローダ室内に送り込まれ、パレット上に固定される。マスクローダ室には3種類のパレットを内蔵することができ、プレートに合わせて自動的に選択される。パレット上のプレートを3本のピンで支え、また、ガイドピンに1方向から押しつけることによって固定している。また、2本のアースピンを用意しており、両ピン間の導通によってプレートの接地を確認している。

3.2 マスク機の性能

プレートの中心約50 mm内に5チップ描画した際の寸法分布を図6に示す。この評価は、0.35 μmの厚さのネガレジスト(CMS-EX)にテストパターンの描画を行い、クロムエッチした後に、光学式測定器で測定して行った。

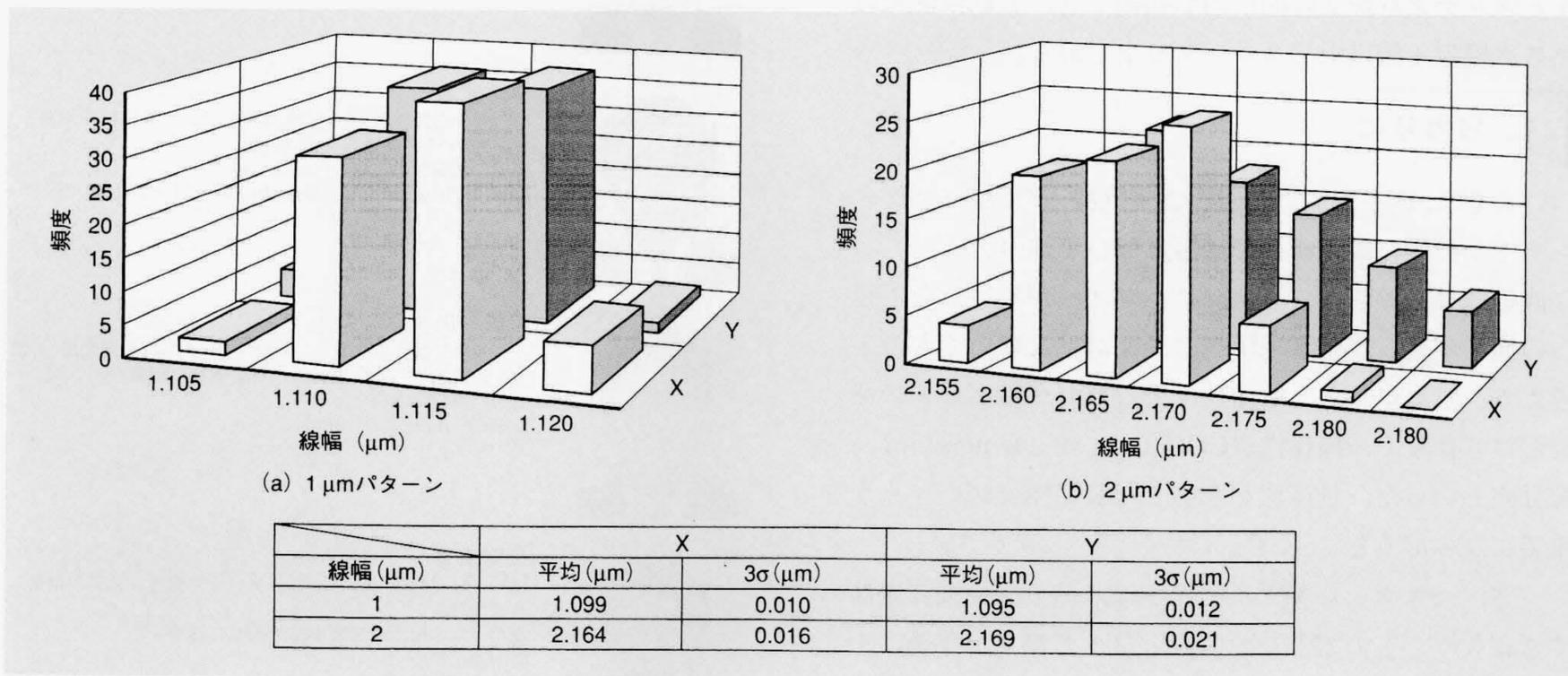


図6 寸法均一性

プレートの中心50 mm内の範囲での1 μmと2 μmのパターンの寸法均一性を示す。

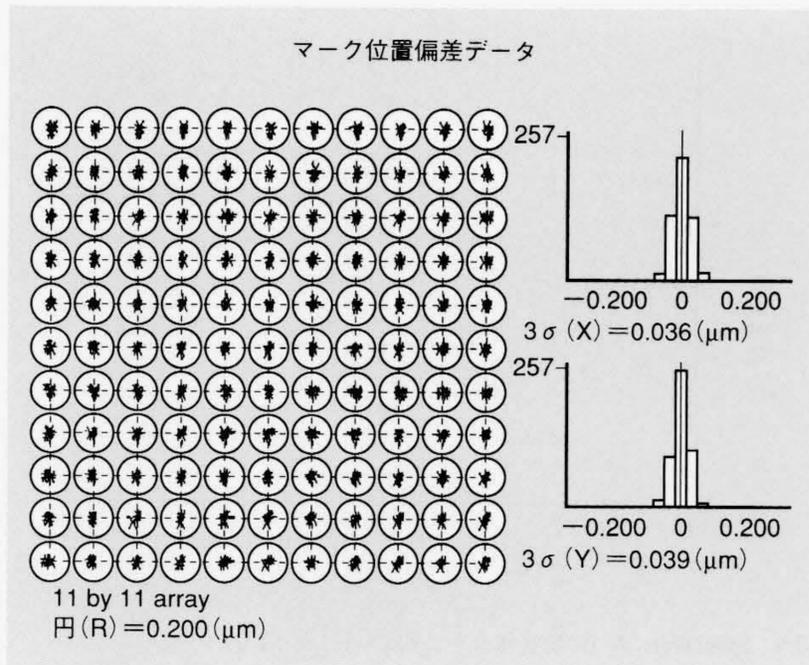


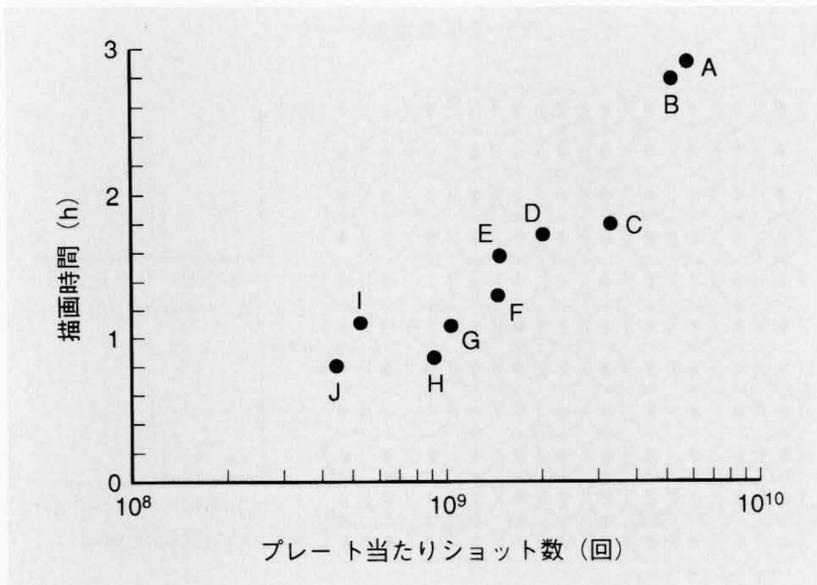
図7 位置精度

位置精度は、測定器の誤差を取り除くために、同一プレートを90度ずつ回転させて測定を4回行い、その重ね合わせで評価した。

1 μmの微細なパターンであっても、プロセスの影響のない領域では、良好な寸法分布が得られることがわかる。

プレート上のパターンの位置精度は、115×115 mmの範囲に11×11個の評価パターンを描画し、その位置を光学式測定器で測定した。その際、測定器の測定誤差を取り除くためにプレートを90度ずつ4回転して測定し、それらのデータを重ね合わせて評価した。この結果を図7に示す。X、Y両方向とも仕様を満たしていることがわかる。

HL-800Mでは、可変成型ビームを用い、ベクタ方式の



注1: 略語説明 A, B(孤立パターン), C~H(ラインパターン)
I, J(シフトパターン)

注2: レジスト; RE5100P(ポジ)
感度; 3.6~4 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

図8 マスク描画時間

従来機と比較して、4倍以上のスループットを実現した。

描画方式を採用しているため、他機種にはない高スループットが期待できる。256 MビットDRAM(Dynamic Random Access Memory)クラスの数種類のパターンを描画した際の描画時間を図8に示す。横軸に電子線でショットした回数を示す。レジストには、感度約4 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ のポジ型化学増幅レジストを使用した。同図の描画時間には、ブランクプレートの装置内への挿入、装置からの取り出し時間、パターンデータの転送時間、近接効果補正演算時間などが含まれている。パターン形状が複雑なためにショット数が増加した2種類を除くと、ほとんどのレチクルが2時間以内で描画でき、これは従来のマスク機の4倍以上のスループットである。

4. おわりに

ここでは、電子線描画装置による直描、およびマスク・レチクル製作の両方面への適用について述べた。

直描向け装置では、光リソグラフィーが不得意な工程への適用が進み、量産現場への展開が進んでいくものと考えられる。したがって、解像性、重ね合わせ精度などの性能だけでなく、操作性やCOO(Cost of Ownership)、稼働率といった、量産機を意識した製品開発がますます重要になってくる。

一方、マスク・レチクル製作では、電子線描画装置はすでに欠くことのできない装置となっており、今後は、デザインルールのいっそうの微細化、縮小率の5倍から4倍への移行が現実的になってきている。

また、 $\phi 300$ mmウェーハと9インチマスクの両分野で、試料の大型化が計画されており、高精度とあいまって、装置へのさまざまな要求がいっそう厳しくなるものと考えられる。

これらのリソグラフィーユーザーからの要求にタイムリーに対応したとき、21世紀に向けてのリソグラフィー分野で、電子線描画装置が重要な装置となると考える。

参考文献

- 1) 銚谷, 外: 高スループットを実現した電子ビーム直接描画システム, 日立評論, 76, 7, 527~530(平6-7)
- 2) Y. Sakitani, et al.: An Electron Beam Cell-Projection Lithography System, Journal of Vacuum Science & Technology, B10(6), 2759 (1992)
- 3) F. Murai, et al.: Fast Proximity Effect Correction Method Using a Pattern Area Density Map, Journal of Vacuum Science & Technology, B10(6), 3072 (1992)
- 4) K. Mizuno, et al.: Electron Beam Mask Writing System for 0.25 μm Device Fabrication, SPIE Proceedings, Vol. 2793, 452 (1996)
- 5) H. Satoh, et al.: Performance Improvement in e-beam Reticle Writer HL-800M, Digest of Papers, Photomask Japan '97, 12 (1997)

執筆者紹介



水野一玄

1984年日立製作所入社, 計測器事業部 リソグラフィー・システム・プロジェクト 所属
現在, 電子線描画装置の開発に従事
E-mail: mizuno_k@cm.naka.hitachi.co.jp



法元盛久

1974年日立製作所入社, 半導体事業部 半導体技術開発センター マスク技術開発室 所属
現在, 微細加工技術の開発に従事
E-mail: hogam@cm.musashi.hitachi.co.jp



松坂 尚

1977年日立製作所入社, 中央研究所 先端技術研究部 所属
現在, 電子ビーム応用装置の研究開発に従事
応用物理学会会員
E-mail: mtzk@crl.hitachi.co.jp



松岡玄也

1970年日立製作所入社, 電子デバイス製造システム推進本部 所属
現在, 電子線描画装置事業の推進に従事
応用物理学会会員
E-mail: genya@cm.head.hitachi.co.jp