

高速・高精度電子ビーム描画装置

High Speed High Precision Electron Beam Lithography System

半導体素子の微細化・高密度化に従い、従来の光学的露光法の解像限界を超えた微細加工技術の確立が急務となりつつある。この要求にこたえるため、高精度であると同時に、高速性を重視した第二世代の電子ビーム描画装置“HL-600”を開発した。

本装置は、高電流密度の可変成形ビーム方式の電子光学系、大角度偏向が可能なインレンズ方式の集束偏向系、高速・高精度なステップ アンド リPEAT形の試料台、パイプライン方式のショット分解回路など、新技術を採用している。毎時10枚のウェーハへの高速直接描画が可能であると同時に、モード切替えにより線幅1 μm の高精度なマスク描画も可能である。

鉾谷義雄* *Yoshio Sakitani*
 菰田 孜** *Tsutomu Komoda*
 斎藤康示* *Yasushi Saitou*
 小西忠雄* *Tadao Konishi*
 斎藤徳郎** *Norio Saitou*

1 緒 言

半導体集積回路の集積度は、チップ寸法の大形化、デバイス回路の改良とともに、回路パターン寸法の微細化に係る微細加工技術(リソグラフィー技術)の開発により、ICからLSIへと目覚ましい発展を遂げてきた。図1に集積回路の微細化に必要なリソグラフィー工程の分類を示す¹⁾。細い実線が従来からの光-リソグラフィー工程である。太い実線が現在64k-DRAMで代表される超LSIの生産に用いられている主流の工程であり、マスク作成には従来の光パターンゼネレータに代わってEB(Electron Beam Lithography System: 電子ビーム描画装置)が実用化されるようになってきた。また、太い点線はEB装置による直接描画工程であり、マスク作成が省略できるのでTAT(ターンアラウンドタイム)が短縮でき、(1)多品種少量カスタムICの製作、(2)微細パターン寸法の超LSI開発試作、(3)テストチップの研究試作などに使用されつつある。

電子ビームによる描画技術の特長は、(1)微細パターンを精度良く形成できること、(2)位置合せ精度が高いこと、(3)焦点深度が深いこと、などハードウェア面での特長に加え、(4)ソフトウェアにより図形修正、寸法変更、同一ウェーハ内での異種チップ作製などが容易にできること、などである。すなわち、EB装置の最大の特徴は、サブミクロン領域の回路パターンを設計データから高速・高精度で直接創成できることであり、超LSI時代の最も有力なリソグラフィー手段としてその早期実用化に期待がもたれていた。

日立製作所では、超LSI時代に対応するため、日本電信電

話公社の指導のもとに昭和55年に最小パターン寸法0.5 μm の高精度電子ビーム露光装置を開発し、引き続き装置利用技術(ハードウェア、ソフトウェア)や関連技術(レジスト材料、プロセス技術)の研究開発を行なってきた。今回、これらの研究成果をもとに、高精度マスク描画及び高速度ウェーハ直接描画が可能な電子ビーム描画装置“HL-600”を開発した。本稿では、この超LSIを志向した“HL-600”のシステム構成、特長、性能、応用結果などについて述べる。

2 “HL-600”の開発

EB装置の性能は、(1)最小パターン寸法、(2)パターンの描画精度、(3)描画処理速度(スループット)、(4)信頼性・保守性・操作性などで決まる。ここでは、代表的な大量生産ICのひとつであるMOS(Metal Oxide Semiconductor)メモリの推移を指標として、“HL-600”の開発目標を設定した。

図2は1970年代からの生産ラインでのMOSメモリのパターン寸法(加工レベルでの最小線幅)と集積密度の推移である²⁾。

'80年代後半には最小パターン寸法で1 μm 、集積密度で1Mビット/cm²の素子が生産に入ると予測される。このことから、“HL-600”の開発目標を、1Mビットメモリ程度の超LSIと想定し、装置の精度・スループットを決める最小パターン寸法を1 μm (0.5 μm 可能)と設定した。

表1に目標仕様を示す。高精度なマスク レチクル描画やTAT短縮のための高速直接描画など、EB装置への多様なニ

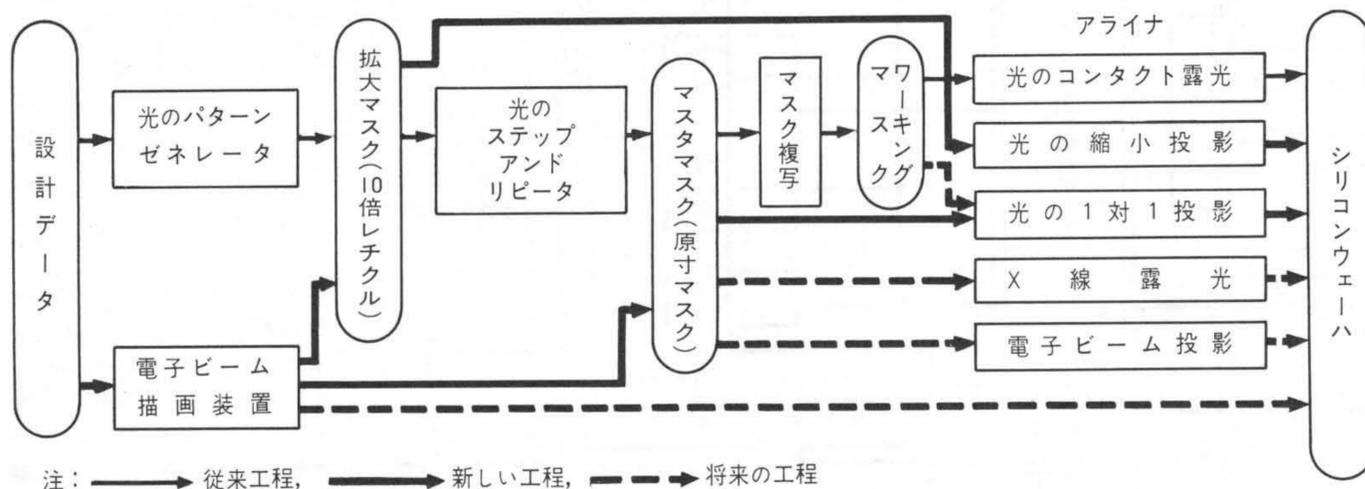


図1 リソグラフィー工程の分類
 集積回路の微細化に必要なリソグラフィー工程の分類[細い実線が従来の光-リソグラフィー、太い実線が現在の64k RAM(Random Access Memory)時代の主流の工程、太い点線が電子ビーム描画装置による直接描画工程]を示す。

* 日立製作所那珂工場 ** 日立製作所中央研究所 工学博士

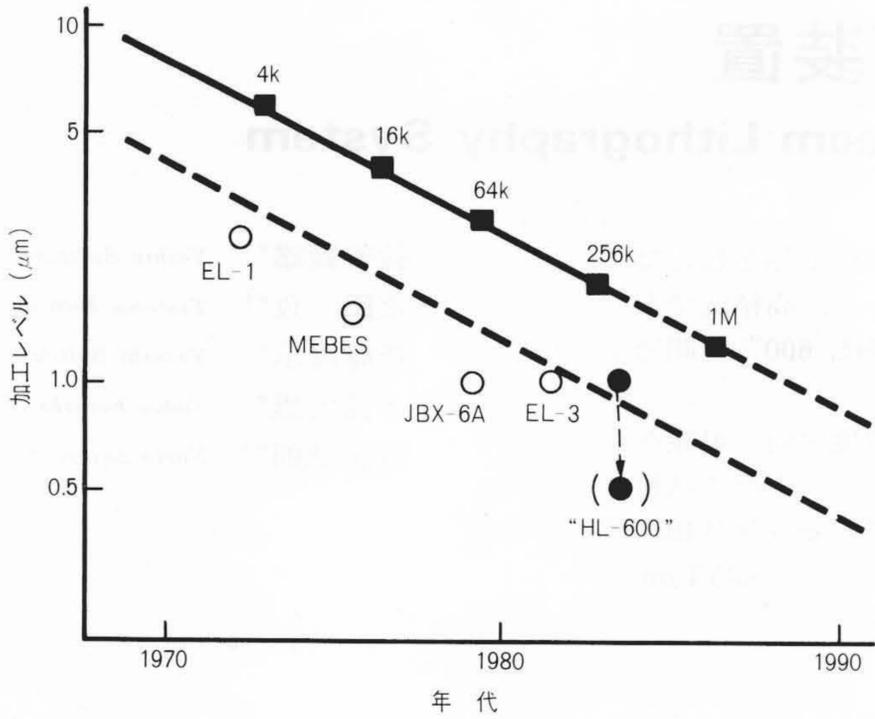


図2 加工寸法と集積密度の見通し MOSメモリの集積度とMOSトランジスタのチャンネル長との関係を従来品から外挿した。実線は生産レベルを、点線は研究レベルでの推移を示す。EL-1, EL-3はIBM(米国), MEBESはETEC(米国), JBX-6Aは日本電子株式会社, "HL-600"は日立製作所のEB装置名称である。

表1 "HL-600"の目標仕様 "HL-600"の機能として、高精度マスク描画と高速度直接描画機能をもたせた。機能切替は最小描画単位を変える(マスク描画:0.025μm, 直描:0.05μm)ことを行なう。

描画機能	高精度マスク&レチクル描画	高速度ウェーハ直接描画	
描画図形	最小描画図形	1.0μm角(0.5μm角可)	同左
	最小描画単位	0.025μm	0.05μm
	図形種類(角度)	台形(0°, 45°, 90°, 135°)	同左
描画精度	パターン寸法精度	0.1μm (3σ レジストパターン)	0.2μm
	パターン重ね合せ精度	0.15μm (2層間, 3σ レジストパターン)	0.45μm
	パターン継ぎ合せ精度	0.15μm (3σ レジストパターン)	0.3μm
描画試料	種類	マスク レチクル ウェーハ	ウェーハ直描
	寸法	3, 4, 5, 6in(最大6in角)	最大φ6in
	ローダ機能	12枚自動連続処理	同左
処理枚数(スループット)	3枚/h(5inマスク)	10枚/h(4inウェーハ)	
スループット算出描画条件	256k DRAM全層平均 レジスト感度 2μC/cm ²	レジスト感度 2μC/cm ² 140チップ/4inウェーハ ショット数 1×10 ⁶ 個/チップ	

ーズに対処するため、(1)高精度を重視したマスク描画機能、(2)高スループットを重視した直描機能、とシステム構成上で機能分割を図った。

他方、EB装置の基本的なシステム構成は³⁾、(1)電子ビーム形状、(2)電子ビーム走査方式、(3)試料移動方式の組合せによって決まり、その選択が高速・高精度装置実現の重要なポイントになる。"HL-600"システムでは、

- (1) 高速露光に適した可変成形ビーム方式
 - (2) 高精度なパターン形成に適したベクタ走査方式
 - (3) レジストレーションの高精度化を図りやすいステップアンドリピート形の試料移動方式
- を組み合わせた新しいシステム構成とした。

3 "HL-600"システム構成

図3に"HL-600"の外観を、また、図4にシステムの全体構成を示す。

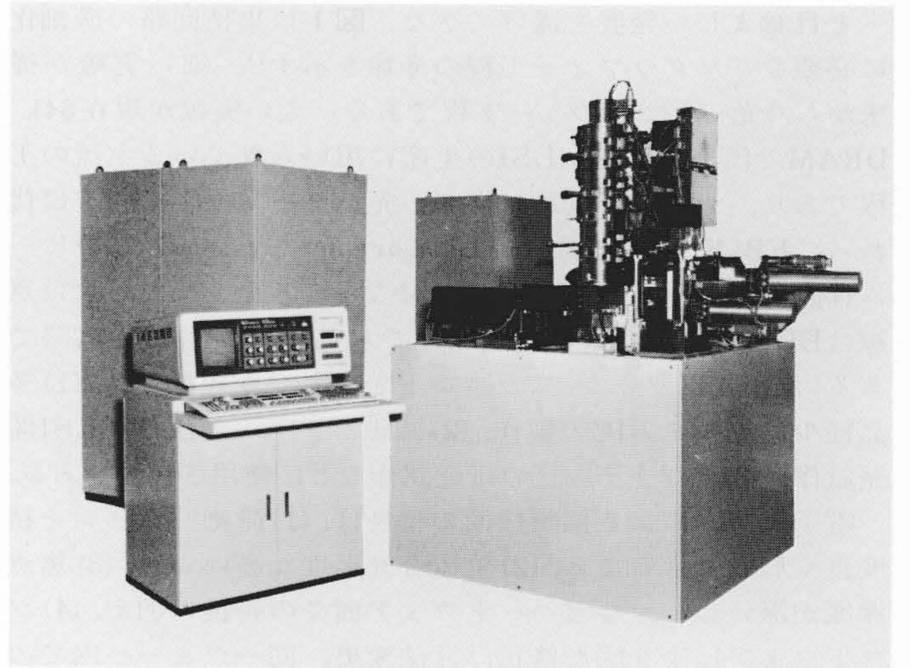


図3 "HL-600"システムの外観 電子光学系から成る本体部と操作卓を示す。他に制御用計算機、制御電源部などがある。

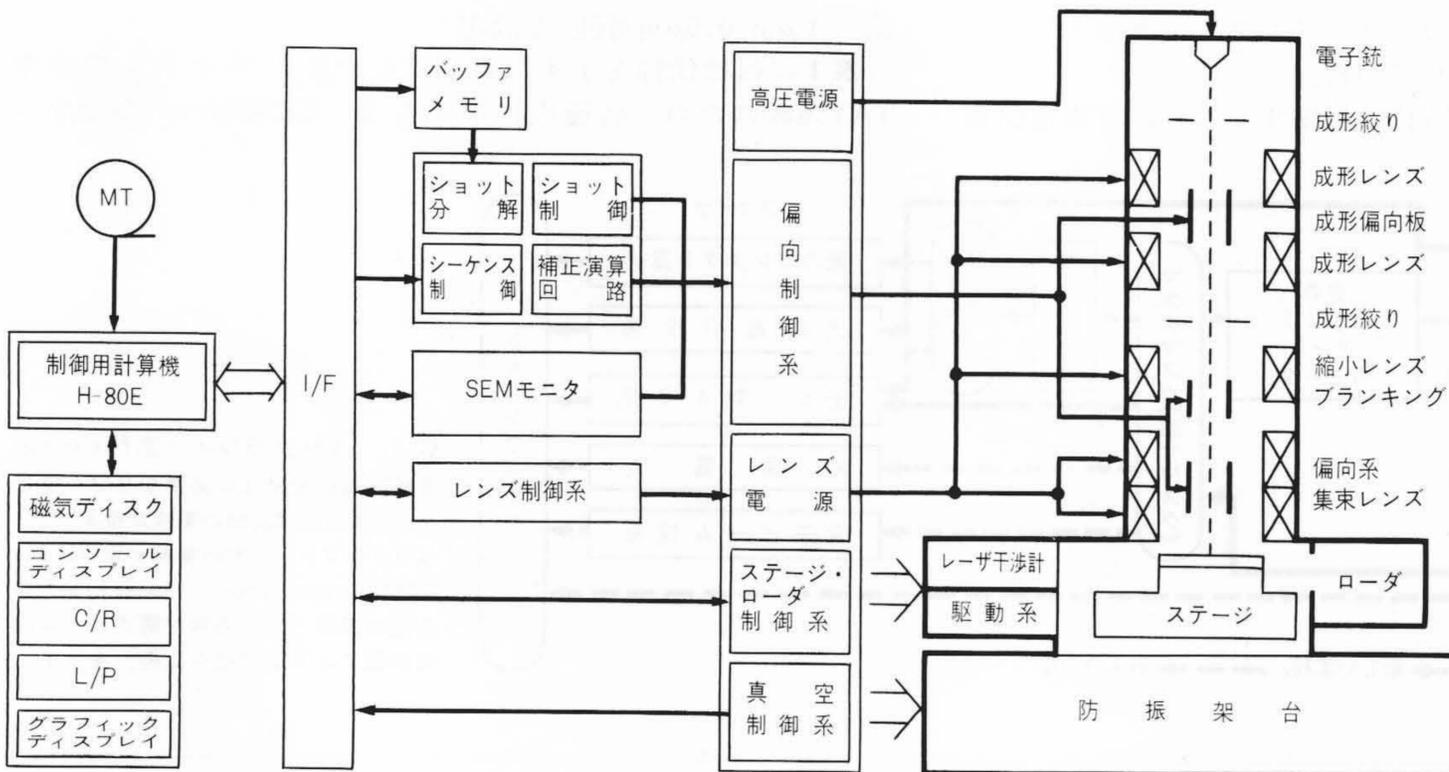


図4 "HL-600"のシステム構成 全体システムは、電子光学系・ステージ・ローダ系から成る本体部、電子ビーム制御用のアナログ系・描画データ転送や各種補正演算用のデジタル系から成る制御部、及び制御用計算機を中心とするCPU(中央処理装置)部から構成される。

注：略語説明 C/R(カードリーダー), L/P(ラインプリンタ), SEM(走査電子顕微鏡), MT(磁気テープ), IF(インタフェース)

3.1 基本構成

このシステム全体を機能別に大きく分類すると、**図5**に示すような基本構成となる。以下、各部の機能について概略説明する。

(1) データ変換ソフトウェアの機能

LSI設計データ(PG3000フォーマットほか)を“HL-600”用の描画データに変換する。本EB装置とは別の計算機で実行され、設計データのフォーマット変換のほかに、描画に必要なユーザー側の指示がすべて盛り込まれる。

(2) 制御ソフトウェアの機能

上記ソフトウェアの指示を受けて“HL-600”を実際に制御し、運行管理するもので、ジョブの性格上ユーザー側はソフトウェアの内容には一切関与する必要がない。具体的なソフトウェアの内容を**図6**に示す。

(3) 制御用ミニコンピュータとI/O(入出力回路)の機能

“HL-600”用フォーマットに変換された描画データ〔MT(磁気テープ)ベース〕を入力として描画を実行し、管理する。高性能日立ミニコンピュータ(HIDIC-80E)の採用によって、補正演算の高速化、大容量データ転送の転送ネック解消などを実現している。また、超LSIのサブミクロン直接描画を可能にするため、大容量・高速ディスク、高速MTを接続可能にし、更に描画状況を視覚的に管理する手段として描画管理用画像ディスプレイを設置している。

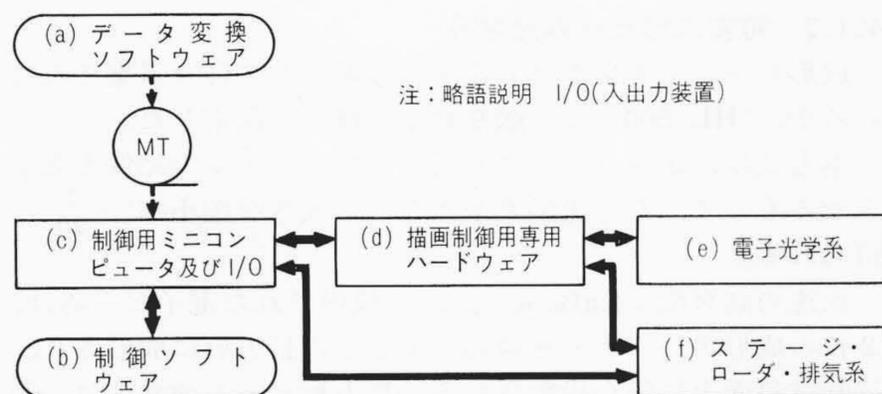


図5 “HL-600”の機能構成 “HL-600”のソフトウェア体系を、(1)パターン設計データから描画データに変換するためのデータ変換プログラム(上位)と(2)描画装置を制御するための制御プログラム(下位)とに分類した。

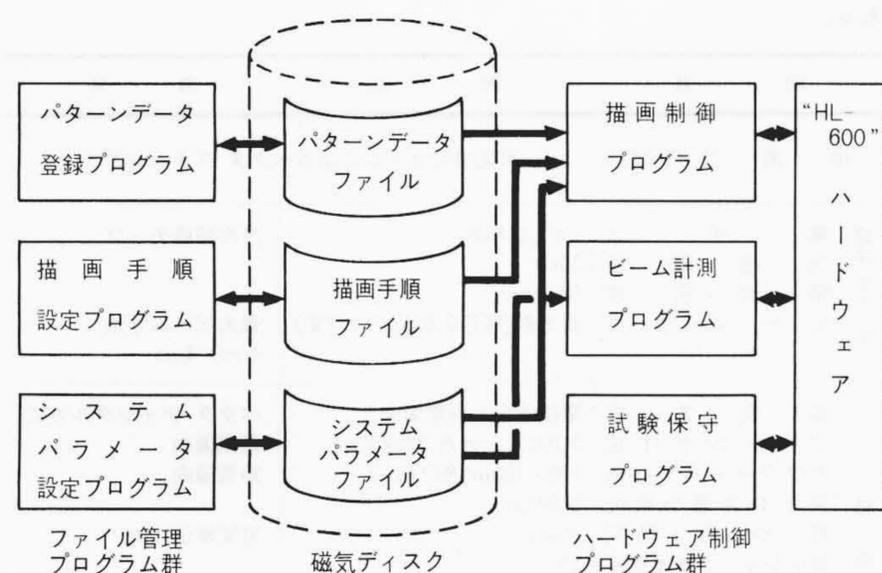


図6 制御ソフトウェア構成 “HL-600”では処理機能別に制御プログラムを分離独立させ、ファイル管理とハードウェア制御プログラム群で構成した。ファイル管理プログラムによってパターンデータや描画手順が磁気ディスクに格納され、この磁気ディスク上の各種ファイル内のデータに基づいてハードウェアを制御プログラムによって起動する。

(4) 描画制御用専用ハードウェアの機能

高速処理の必要上、図形処理機能の一部を専用ハードウェア化している。具体的な内容を**図7**に示す。装置の長時間安定を実現するため、回路は極力デジタル化を図っている。また、ショット分解系ではパイプライン制御を、シーケンス制御や補正回路系ではマイクロプロセッサ制御を採用するなど、高速演算をスマートに実現する手段を講じている。

(5) 電子光学系の機能

高精度のパターンを高速で描画するため、電子ビーム形状として可変成形ビーム方式を、ビームの走査方法としてベクタ走査方式を採用した。また、強力に安定な電子ビームを得るため、LaB₆(ランタンヘキサボライド)電子銃、インレンズ方式の2段偏向系などの新技術を採用した。

(6) ステージ、ロード系の機能

日立縮小投影露光装置(RA-101)などで実績のある、DCサーボ制御による摺動形のステップ アンド リピート方式のステージを採用し、6in角マスクの載置が可能である。ステージ系のある露光室に隣接して、オートロード系を付属させてある。ウェーハ及びマスク基板を合わせて12枚装填でき、プログラム制御下で順次露光室へオートローディングが可能である。その他、真空排気系として、電子光学系にはイオンポンプ(20l/s×6台)を、露光室とロード系には排気速度の大きいクリーンクライオポンプ(800l/s×2台)を用い、高速な排気を可能にした。

3.2 描画データ処理機能

集積回路の進展をEB装置の立場から見ると、集積度の向上に伴うパターンデータの増加とパターン寸法の微細化という二つの面で考える必要がある。この観点から、“HL-600”では超LSIのパターン設計を行なうCAD(Computer Aided Design)システムと整合のとれた効率的なデータ処理システムを採用した。

CADシステムからの設計データは、データ変換ソフトウェアにより“HL-600”固有の描画データフォーマット(台形図形を基準とするレクト単位)に変換され、磁気テープを介して大容量ディスク内に転送される。1Mビット/cm²程度の超LSIメモリになると、その描画データ量は膨大なものとなり、デ

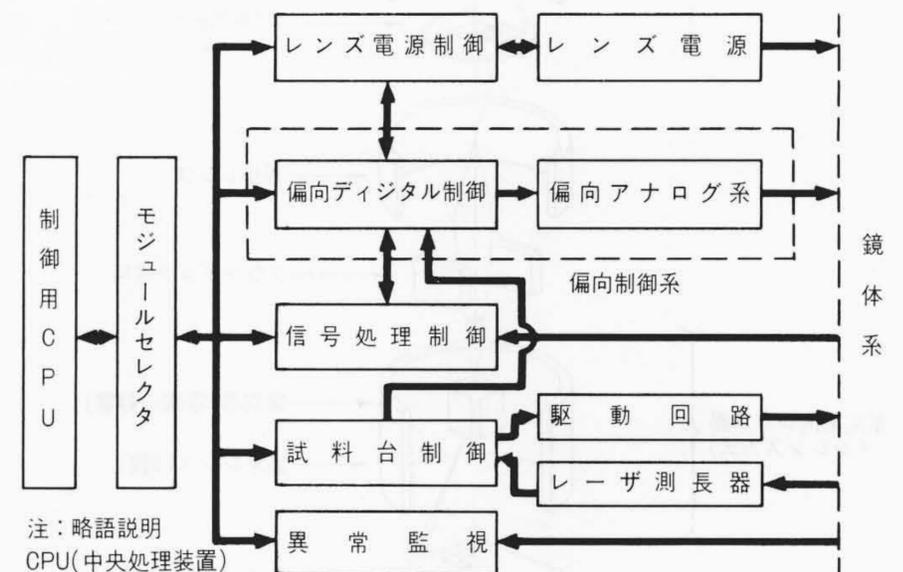


図7 描画制御用ハードウェアモジュール体系 レンズ電源制御部：鏡体系のレンズ、アライナなどをCPUからのデータに従って駆動する。偏向デジタル制御部：描画データに対して補正演算などを行ない偏向データを作成する。信号処理系部：マーク検出信号などをデジタル化するとともに補正やゲインの調整を自動的に行なう。試料台制御部：ステージ系のステップ アンド リピート駆動制御を行なう。異常監視部：装置全体の状態を監視し、CPUにより異常内容に適した処理を実行する。

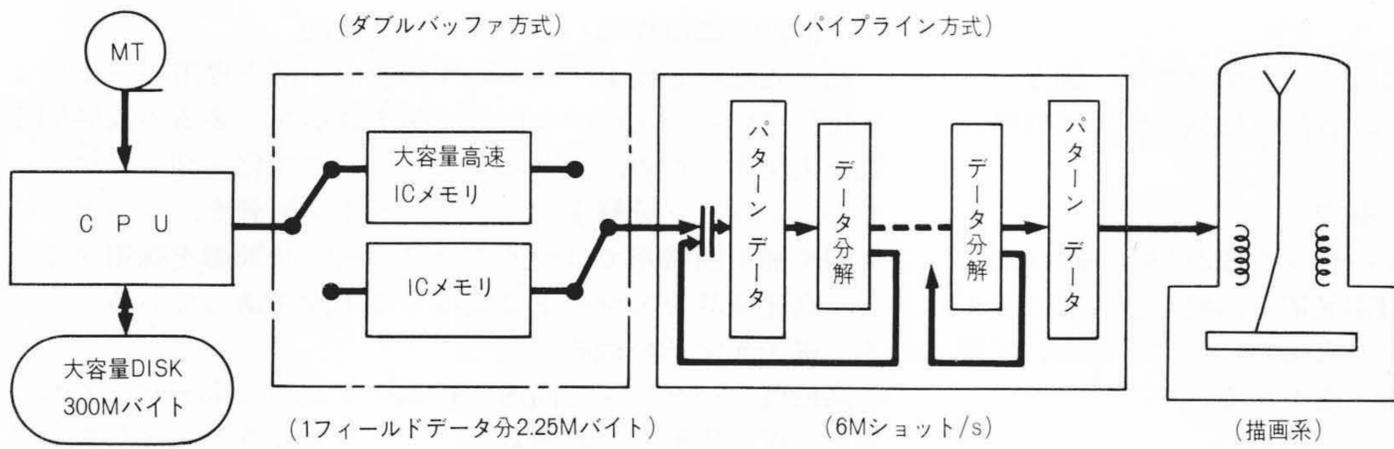


図8 描画データ転送系
256k-DRAM相当の超LSIになると、磁気テープで供給されるデータ量は膨大なものとなる。本装置では描画処理速度がデータ転送のネックとならぬように、ダブルバッファ方式の2面メモリとショットデータ処理方法としてパイプライン演算方式のデジタル処理回路とを設けた。

ータ転送・処理がスループット向上のネックとなる。そこで本装置では、ディスクからのデータ転送系として大容量バッファメモリを2面用意したダブルバッファ方式を用い、また台形図形からショットデータへ変換するために、パイプライン方式を用いたハードウェアにより図形分割を行なっている。図8にデータ転送系の構成図を示す。

4 可変成形ビームと描画方式

EB装置のハードウェア構成を機能別に分類すると、(1)電子光学系、(2)偏向制御系、(3)マーク ビーム検出系、(4)ステージローダ系、(5)真空排気系、(6)制御用計算機、(7)制御プログラム、などになる。これら装置各部の性能を考えた場合、電子光学系の性能がシステム全体に及ぼす影響が最も大きい。“HL-600”では、電子光学系の性能を最大限に生かすように他の各部の基本設計を行なった。

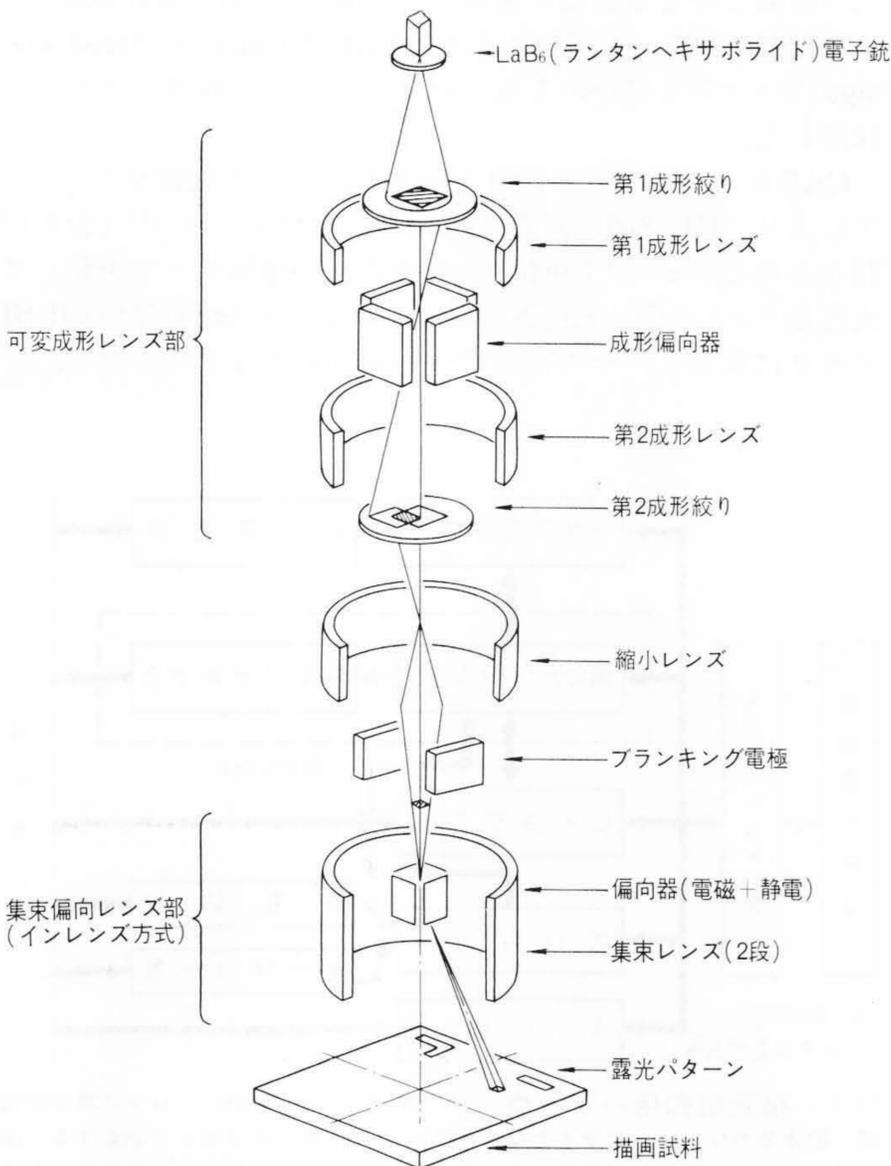


図9 “HL-600”の電子光学系 光学系の構成は、電子銃部・可変成形レンズ部・縮小レンズ部・集束偏向レンズ部から成り、電子レンズは5段で構成される。電磁及び静電から成る2段偏向器は、集束レンズの中心に配置されたインレンズ方式である。

4.1 “HL-600”の電子光学系

“HL-600”では高速描画を目的として可変成形ビーム方式を採用した。“HL-600”に用いた電子光学系の概略を図9に、またその諸元を表2に示す。

4.1.1 電子銃

成形ビーム用電子線源としては放射電流の分布が一様であり、かつ電流密度が大きくとれることが必要である。“HL-600”では、輝度が高く(～0.5MA/cm² Str.)、しかもビーム放射範囲の広い曲率半径の大きな単結晶LaB₆電子源を開発し採用した。図10にLaB₆チップの形状を示す。また、電子ビームを加速する電圧については、微細パターンを切れよく描画するために感度よりも解像度を重視し、30kVとした。視し、30kVとした。

4.1.2 可変成形ビーム光学系

成形ビームを発生させる電子光学系として種々考案されているが、“HL-600”では図9に示す構成を採用した。

本方式は、2個のレンズを用いてアパーチャの結像と兼用させるもので、電子光学系全体として大きな縮小率(～1/25)が得られる。

前述の高輝度なLaB₆電子銃から放射された電子ビームは、2枚の成形アパーチャを通過するとき長方形に成形され、描画試料面上に縮小投影される。長方形ビームの寸法は、第1成形アパーチャ像を第2成形アパーチャ上に結像させると

表2 電子光学系の基本仕様 高精度マスク描画機能での仕様であり、高速直接描画機能時には、ビーム寸法は0.05μm単位で可変の長方形(アドレス最小単位が0.05μm)となり、最大電磁フィールド寸法は3.0mm角×3.0mm角である。

項目	機能	備考
描画方式	可変成形ビームによるベクタ スキャン方式	
電子銃系	LaB ₆ 直熱形 30kV 5A/cm ² 長方形(各辺0.025μmで可変)	角形特殊チップ 最大ビーム寸法 4μm×4μm
描画制御系	偏向方式 フィールド寸法 サブフィールド寸法 アドレス最小単位 最小ショット時間 最小ショットサイクル ビーム検出器 基準マーク ビーム調整	電磁偏向+静電偏向 3.0×3.0mm角(Max.) 100×100μm角(Max.) 0.025μm 200ns 480ns 反射電子検出+ ファラデーカップ Z方向2面のAuマーク 角度分布, 焦点, ダイナミック フォーカス, Z補正, ひずみ校正, ビーム寸法 軸調, 電流密度, 非点補正 ビーム形状 自動調整 マニュアル調整

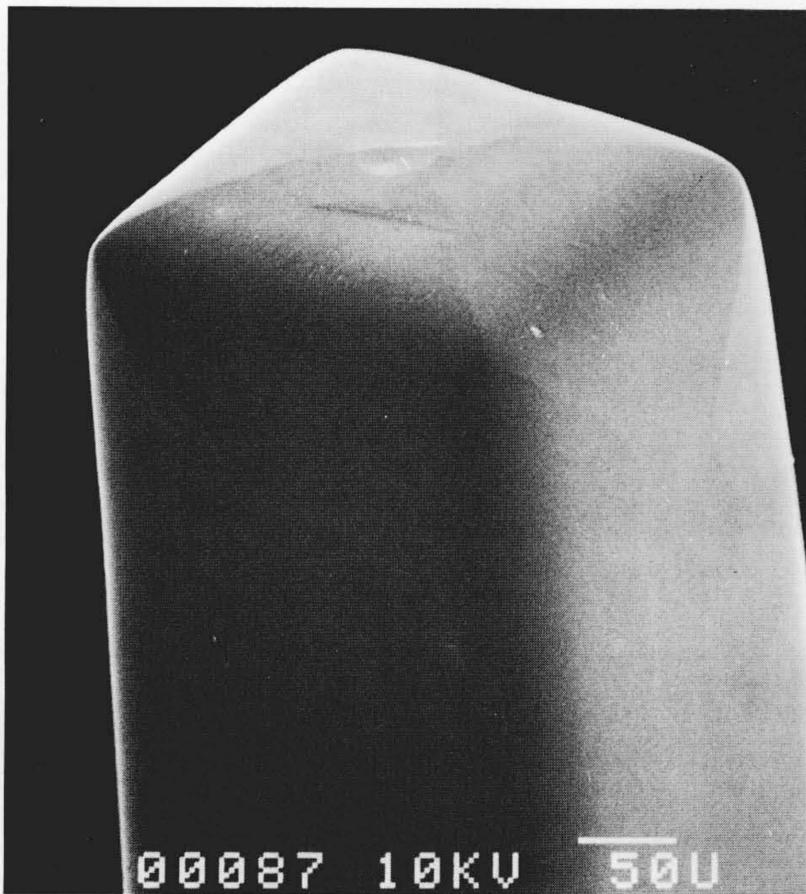


図10 LaB₆(ランタンヘキサボライド)陰極 LaB₆の<100>方位の単結晶で構成された200 μ m角柱タイプの陰極(従来の針状先端タイプからフラットなタイプにすることで放射角を広げた。)を示す。

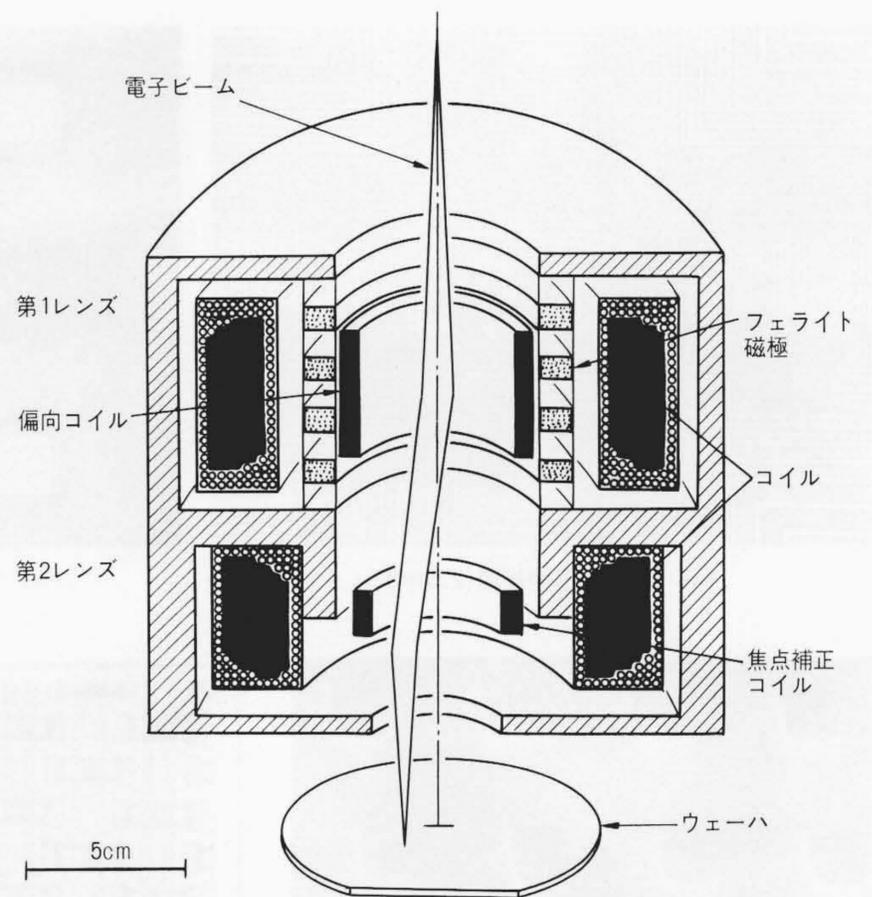


図11 “HL-600”の集束偏向系の構造 描画精度に最も影響を及ぼす集束偏向系の収差とランディング角を、共に低減可能なインレンズ形の対物レンズを採用した。この結果、最大6.0mm角の大角度偏向が可能となった。

同時に、両アパーチャ間に設けられた成形偏向器を働かせることによって可変でき、任意の形状の長方形ビームが得られる。

4.1.3 集束偏向系

電子光学系に起因する成形ビームのぼけ量は、主に最終段の集束レンズ(対物レンズ)及び偏向器で生じる。すなわち、EB装置用集束偏向系に要求される特性のなかで、描画パターンの微細化・高精度化に最も影響を及ぼすのが収差とランディング角である。“HL-600”ではこれらの要求を同時に達成するため、電磁・静電から成る主・副2段偏向器を対物レンズ内に設置するインレンズ方式を採用し、更に動的焦点補正・ひずみ補正機能を付加した。

図11に2段偏向系の構成を示す。

4.2 描画方式

本装置では露光ビームの断面が寸法をもった長方形であることから、描画に際しては図12に示すように描画パターンをビーム形状に見合った大きさの長方形に分解(斜め図形の場合には0.5 μ m幅以下の最小長方形によって近似)し、その一つ一つを刻印(ショット)するように露光していく。

4.2.1 フィールド分割描画

本装置では、電子ビームの偏向だけで試料全面(通常3~6in大)へ露光することは不可能なので、試料台を順次に移動させ、その停止期間中に描画する(ステップアンドリピート方式)。図12に示すように、電磁偏向器によるビーム偏向でカバーできる範囲を主フィールドと、この主フィールドを更に静電偏向器でカバーできる、より小さい副フィールドとに分割する。描画手順は、まず(1)副フィールド内のパターン露光を寸法可変の長方形ビームを用いて静電偏向器で行なう、次に(2)主フィールド内で副フィールドの選択を電磁偏向器で行ない、主フィールド内を順次露光する、更に(3)試料面内での主フィールドの選択を試料台の移動により行ない、描画試料全面への露光を完了する。

4.2.2 描画モード切替機能

EB装置に対するユーザーからの多様なニーズに対処するた

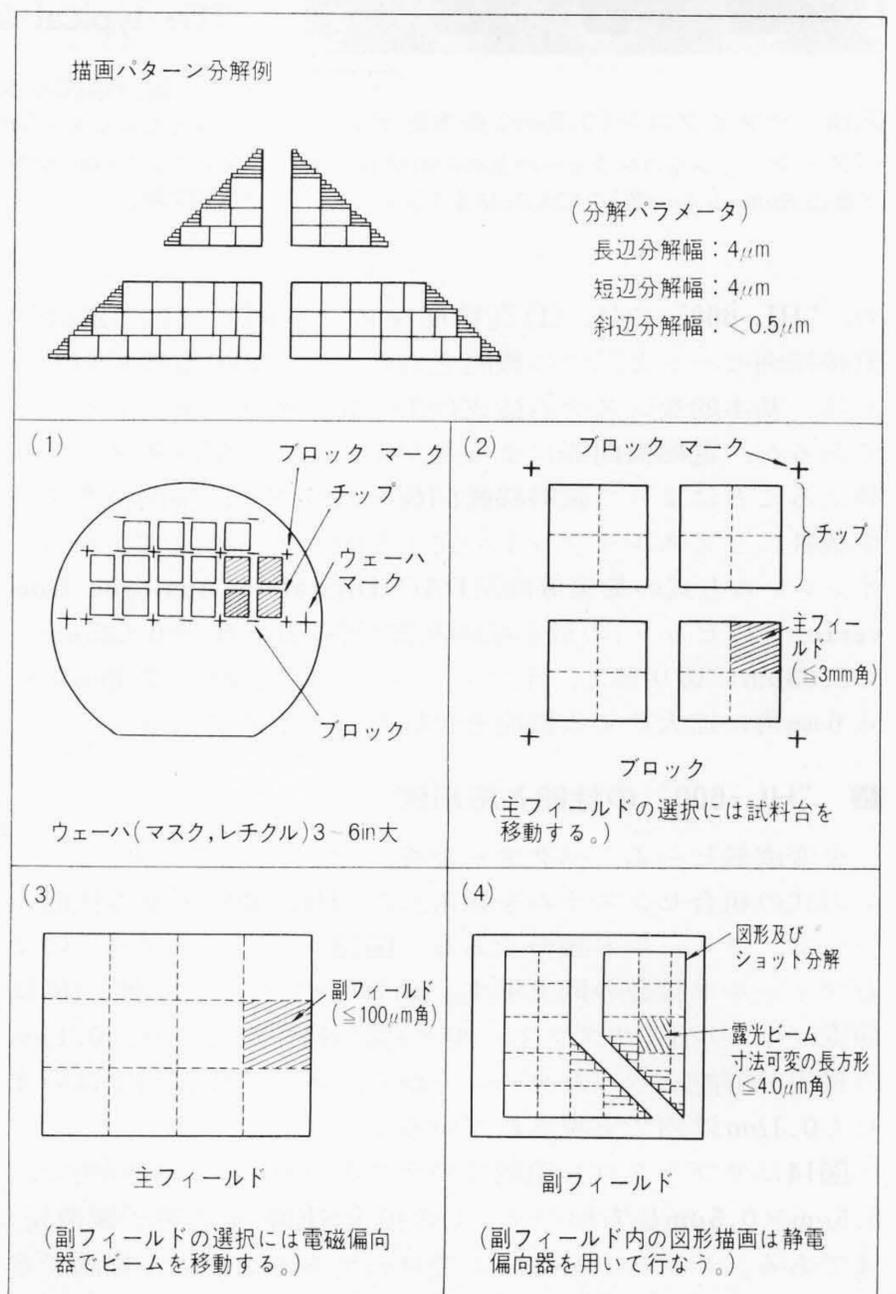


図12 “HL-600”の描画方式 可変面積形の長方形ビームでパターンをショット露光するため、パターン図形を長方形に分解する。分解された長方形データをもとに、サブフィールド、主フィールド、ブロック、ウェーハマスク全面へとステップアンドリピート方式で描画する。

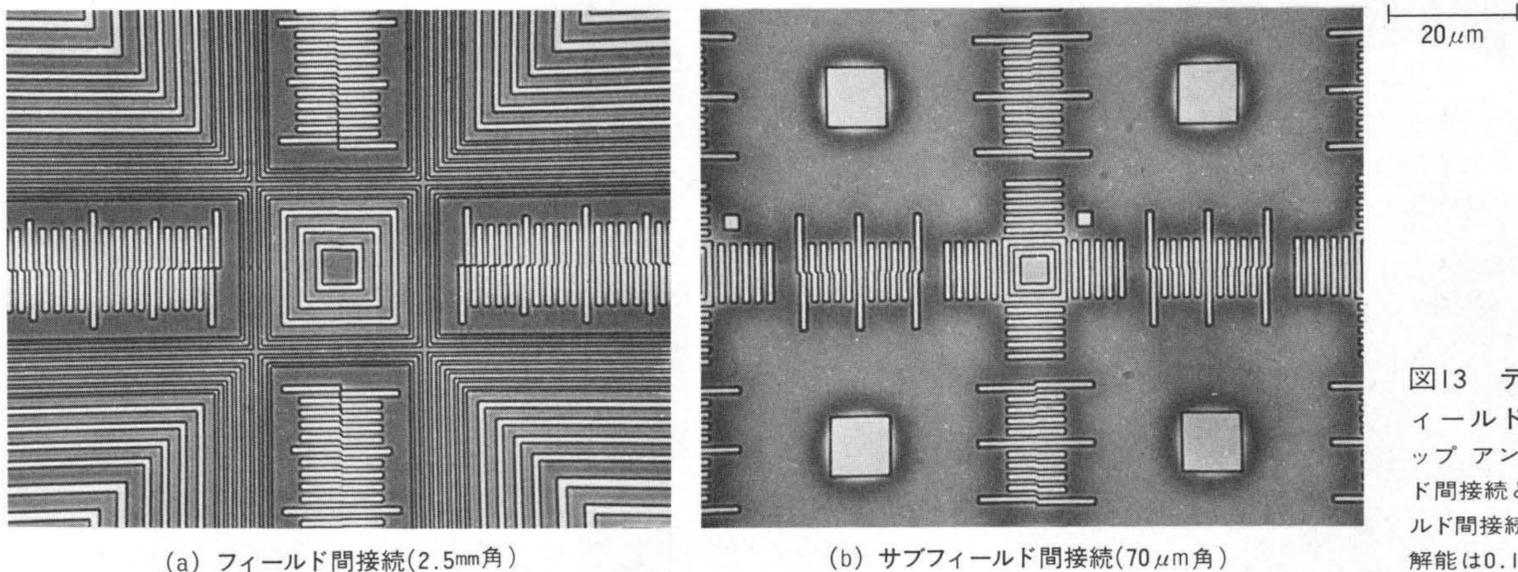


図13 テストパターンによるフィールド接合例 ステージのステップアンドリピートによるフィールド間接続と電磁偏向によるサブフィールド間接続のテスト描画例(バーニャ分解能は $0.1\mu\text{m}$)を示す。

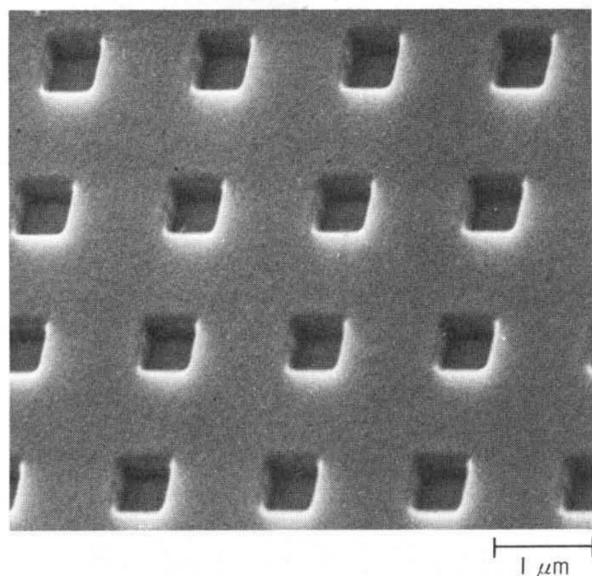


図14 サブミクロン($0.5\mu\text{m}$)長方形テストパターン シリコンウェーハ上のPMMAレジスト像($0.5\mu\text{m}\times 0.5\mu\text{m}$ 角)の拡大SEM像を示す。

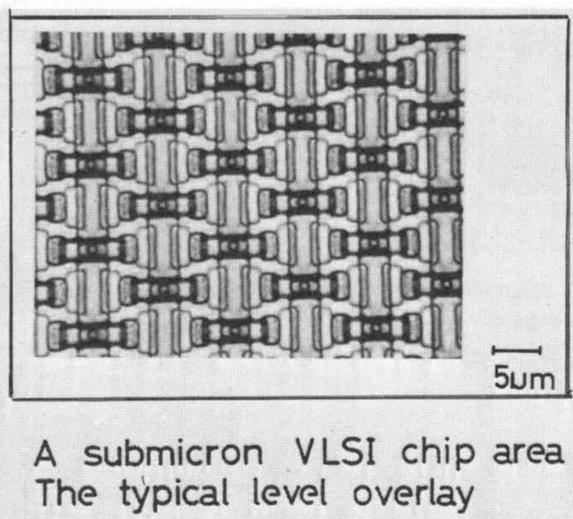


図15 直接描画パターン シリコンウェーハ上のネガ形レジスト(CMS)像を示す。最小線幅は $0.5\mu\text{m}$ である(資料提供:日本電信電話公社厚木電気通信研究所)。

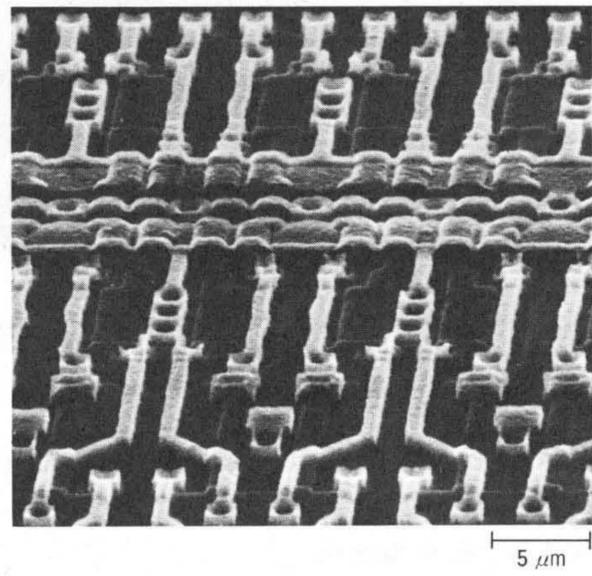


図16 微細メモリセルのテストパターン ウェーハ上へ直接描画により作製したメモリセルの拡大SEM像を示す。Al配線幅は $1\mu\text{m}$ である。

め, "HL-600"では, (1)高精度マスク描画モード, (2)高速直接描画モードと二つの機能をもたせた。(2)の直接描画モードは, 基本的なシステム構成は(1)の高精度描画モードと同じであるが, 電磁偏向器による主フィールドの偏向領域を切り替えることによって試料移動回数を減少させ, 描画精度を多少犠牲にしてスループットの向上を図っている。すなわち, インレンズ方式の集束偏向用DAC(Digital to Analogue Converter)(17ビット)の最小描画制御単位(1LSB)を $0.025\mu\text{m}$ から $0.05\mu\text{m}$ に切り替え, 主フィールドの偏向領域を 2.6mm 角から 6mm 角に拡大させる機能を付加させたものである。

5 "HL-600"の性能と応用例

可変成形ビーム, ベクター走査, ステップアンドリピート方式の組合せシステムを採用した"HL-600"の基本性能の一つは, フィールド接合である。図13にテストパターンによるフィールド接合の例を示す。(a)は電磁フィールド間, (b)は静電フィールド(サブフィールド)間の接続例であり, $0.1\mu\text{m}$ の検出分解能をもったバーニャから, 各々の接合精度はいずれも $0.1\mu\text{m}$ 以内で実現されていることが分かる。

図14はサブミクロン領域でのテストパターンの描画例で, $0.5\mu\text{m}\times 0.5\mu\text{m}$ 長方形パターンの拡大SEM(走査電子顕微鏡)像である。レジストパターンでコーナまで切れよく描画できることが分かる。図15, 16は, サブミクロン台の最小線幅でウェーハ上へ直接描画(全層)したデバイスモデルの写真である。微細なメモリセルの拡大像であり, 線幅 $1\mu\text{m}$ のAl配線上にスルーホールが精度良く位置決めされている。

6 結 言

超LSIの微細パターンプロセスに実用可能な電子ビーム描画装置"HL-600"の開発を行なった。本装置は, 高精度であると同時に高速性・高信頼性にも重点を置いて開発したもので, 次のような特長をもっている。

- (1) 高電流密度の可変成形ビーム方式の電子光学系(特殊 LaB_6 電子銃による大電流・長寿命化)
- (2) インレンズ方式による新集束偏向系(大角度偏向)
- (3) パイプライン方式のショット分解制御系(大容量描画データ転送ネックの解消)

本装置はメモリ, マイクロコンピュータをはじめとする量産品の高集積LSIマスク製造機として, また各種ロジックLSIなど少量多品種カスタムLSIの直接描画機として, それぞれ威力を発揮することとなる。

終わりに, 本装置の研究開発に当たり, 貴重な資料を提供された日本電信電話公社厚木電気通信研究所殿に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 篠田, 外: リソグラフィー技術における世代交替, 電子材料(別冊超LSI製造・試験装置ガイドブック), 11月号, p.29(1981年)
- 2) 垂井: 共同研究所における研究とその成果, 電子材料(別冊超LSI注目基礎技術), 9月号, p.3(1980年)
- 3) 裏, 外: 電子・イオンビーム装置の最近の技術動向, 電気学会技術報告, 第136号(1982年)