

電子ビーム描画装置の開発と応用

Development and Application of Electron Beam Lithography Systems

サブミクロン時代に入った半導体分野では、(1)微細加工性、(2)パターンニングの多様性、という特徴を持った電子ビームによる描画技術が注目されてきた。

日立製作所では、このEB技術(Electron Beam Lithography Technology: 電子ビーム描画技術)を半導体デバイスの開発・生産の基幹技術として位置づけ、約20年間にわたって研究・開発を続け、可変成形型ビーム形EB装置(EB描画装置)「HL-700M/Dシリーズ」を製品化してきた。

このシリーズは、半導体デバイスへの応用として(1)高速度ウェーハ直接描画によるHITAC M-880大形電子計算機用論理LSIの生産、(2)16 M DRAM (Dynamic RAM)用レティクルの生産および位相シフトレティクルの開発、などに用いられている。

さらに日立製作所では、0.3 μm 以降の次世代の半導体デバイスの開発・生産をねらった、より高速・高精度なシステムの開発を計画している。

鉾谷義雄* *Yoshio Sakitani*

水野文夫** *Fumio Mizuno*

法元盛久*** *Morihisa Houga*

斎藤徳郎**** *Norio Saito*

1 はじめに

現在、4 M DRAM (Dynamic RAM)に代表される0.8 μm プロセス技術のLSIが量産に移行し、0.5~0.3 μm レベルのLSIの研究開発に努力が注がれている。

このようなパターンの微細化、デバイス構造の複雑化に対して種々の加工技術が検討されている。その中でEB技術(Electron Beam Lithography Technology: 電子ビーム描画技術)は、微細性および機能の多様性で優れた特徴を持ち、デバイス製造上の主要技術である微細加工技術(リソグラフィ技術)で必要不可欠な手段となっている。

このEB技術の特徴を発揮した例として、世界最小のマикроマップの描画例を図1に示す¹⁾。4インチウェーハにロンドンを中心に1億分の1の縮尺で世界地図を描いた。0.1 μm の解像力で10 m幅の道路を描き、2~3 mの道路の曲がり具合まで正確に表すことができた。これは5インチ光ディスク(640 Mバイト)と比較して、200~300倍以上の高密度記録が可能となることを意味している。

EB技術は、当初そのパターンニングの良さを生かしたマスク描画用として開発され、その後量産のための縮小投影露光装置用レティクル描画、およびウェーハ直接描画(以下、直描と略す。)によるデバイスの先行開発、ならびにASIC(Application

Specific Integrated Circuit)生産用として適用されてきた。LSIの加工技術推移と日立製作所のEB描画装置(以下、EB装置と略す。)の開発経緯を図2に示す。EB装置の開発過程で、デバイストレンドに応じた各世代での技術的なブレークスルーを導入してきた²⁾。

今後の半導体分野での技術と市場の変化に対応して、EB装置に要求され、また期待される技術に次の二つの大きな傾向が見られる。

- (1) ASIC分野の需要の伸びへの対応
- (2) 光リソグラフィ技術の限界に伴うメモリを中心とする汎(はん)用LSI分野への対応

本稿では、ハーフミクロンデバイス用として開発した可変成形型ビーム形EB装置HL-700M/Dシステムの概要と各種応用技術の一端について述べる。

2 EB装置の役割と機能

2.1 EB装置の役割

LSIの生産工程、特に微細加工技術でのEB装置の役割と機能を図3に示す。EB装置の役割は、LSIパターンデータ(CADデータ)を用いて、

* 日立製作所 計測器事業部

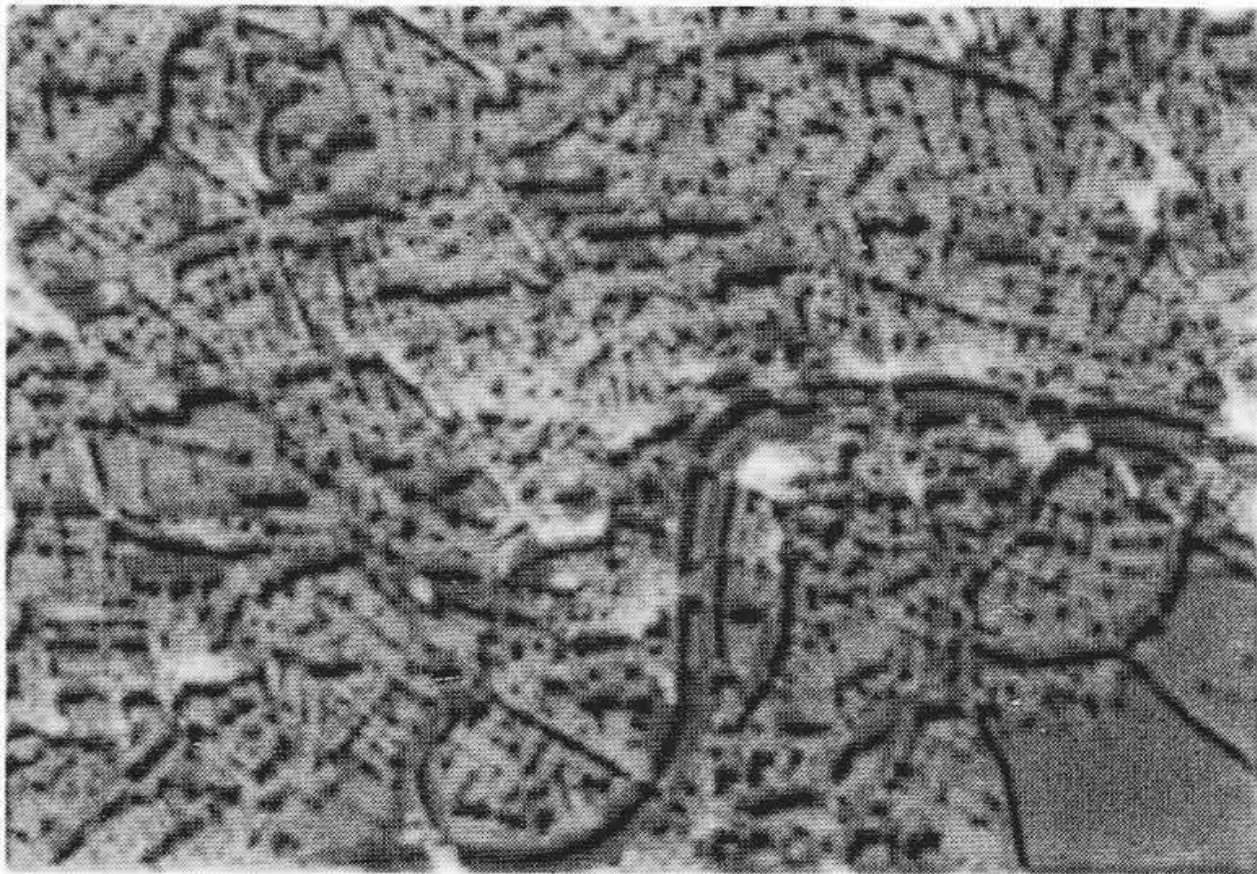
** 日立製作所 デバイス開発センタ

*** 日立製作所 武蔵工場

**** 日立製作所 中央研究所 工学博士



(a) ロンドンを中心に宇宙から地球を眺めた地図(直径約10 cm)



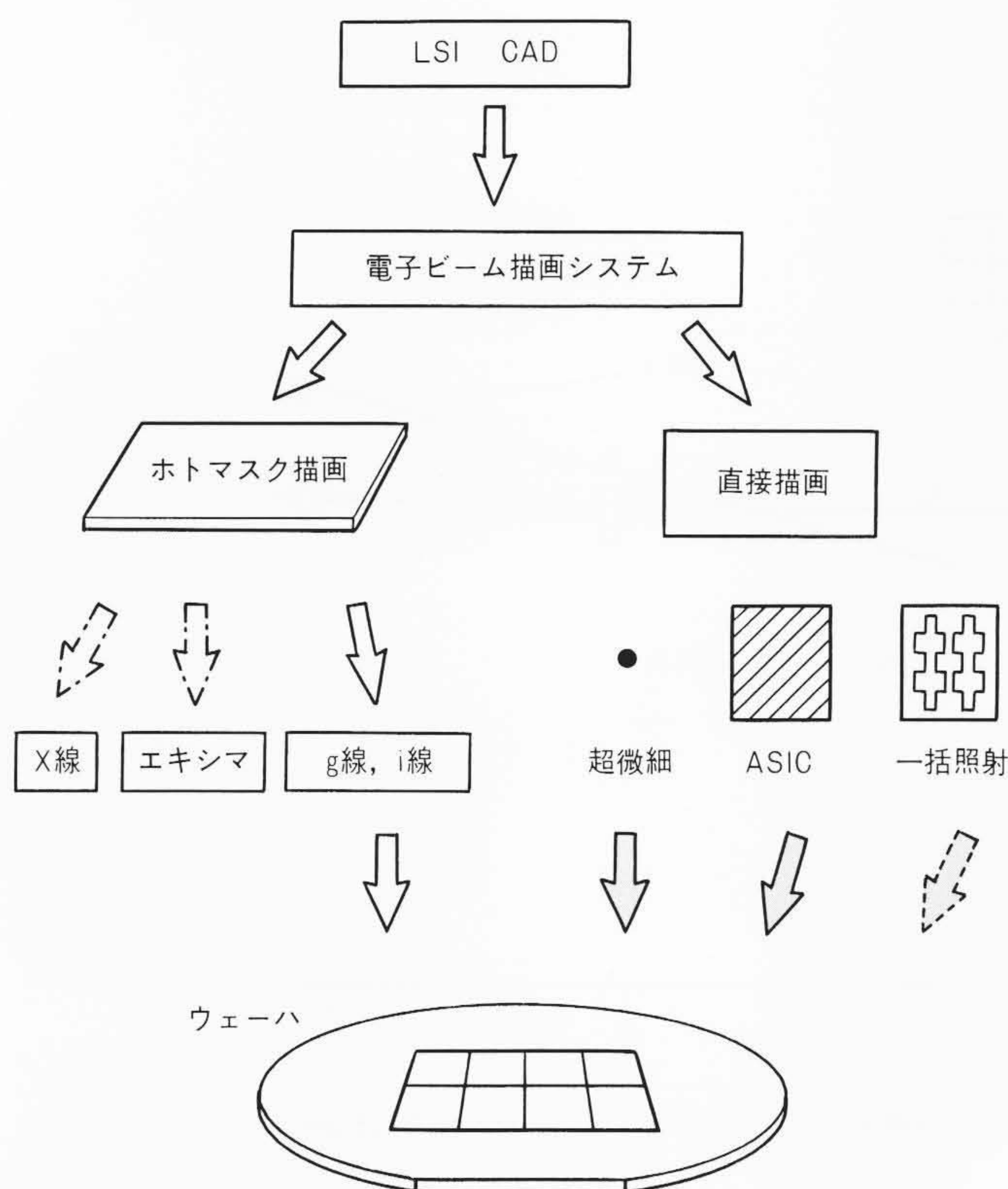
(b) ロンドン市街図

図1 EB(電子ビーム描画)装置で描いた世界最小の地図 ロンドン市街部(約8 km×6 km)が髪の毛の断面たらず(約0.06 mm×0.04 mm)の大きさに入ってしまう。

西 暦 年	'70	'75	'80	'85	'90	'95			
最小線幅 (試作)	8 μm	5 μm	3 μm	2 μm	1 μm	0.8 μm	0.5 μm	0.3 μm	
DRAM (量産)	1 k	4 k	16 k	64 k	256 k	1 M	4 M	16 M	64 M
EB描画装置	EB-R→(マスクプロット機) EB-O→(直描プロット機) EB-52→(マスク実用機) EB-55→(マスク・直描機) HL-600→(マスク・直描機/6 インチ) (マスク・直描機/7 インチ)→ HL-700 M/D (HL-700高精度機)→ HL-700 MII /DII FE-EB→(超微細プロット機) HL-700F→(超微細実用機)								
ブレイクスルー技術	↑ スポット ビーム	↑ 自動移動台 レーザ測長	↑ LaB ₆ 電子銃 絶対校正	↑ 可変成形ビーム インレンズ光学系	↑ 高速DAC 大角度偏向	↑ FE電子銃(Ti/W)	↑ 高精細モード	↑ 新 技 術	

注：略語説明
DRAM (Dynamic RAM), LaB₆電子銃 (ランタンボライド熱電子放出源), FE電子銃 (電界放射形電子放出源), DAC (D-A変換器), 直描 (直接描画)

図2 日立製作所のEB装置の歴史 微細化に伴い、各種技術が開発され実用となった。



注：略語説明 ASIC (Application Specific Integrated Circuit)

図3 EB装置の役割・機能 EBシステムは、縮小投影露光装置のホトマスク描画とウェーハ上への直接描画に応用される。

- (1) 縮小投影露光装置に使うホトマスクの描画
 - (2) ウェーハ上へのパターンの直接描画
- に分類される。

また、EB装置に要求される主な機能は、

- (1) CADデータを電子ビームで描画できる形への変換
- (2) ホトマスク・ウェーハ上への電子ビームによるパターンニング

の項目に要約することができる。

EB装置により、これらの機能を実現するために必要な技術を図4に示す。装置自体を形造る(1)電子光学技術、(2)精密機構技術、(3)制御技術、(4)図形データ処理技術、のほかに利用技術として(5)プロセス技術がある。これらの技術は、どの一つが欠けてもシステムとして成り立たない。特にユーザー側からフィードバックされるプロセス技術は、システムの最適化のために重要で見過ごすことができない。日立製作所はこれらすべての技術に対し、総合力を持って装置の開発、そして製品化にあたっている。

ウェーハ上へ直接描画する手段は、LSIの設計変更や、品種展開に対して迅速に対応できる特徴を持っており、ASICに代表される少量多品種のLSIの開発・生産に最適な手段である³⁾。現在この機能を持つ装置として、HL-700Dシステムがこれに対応する。

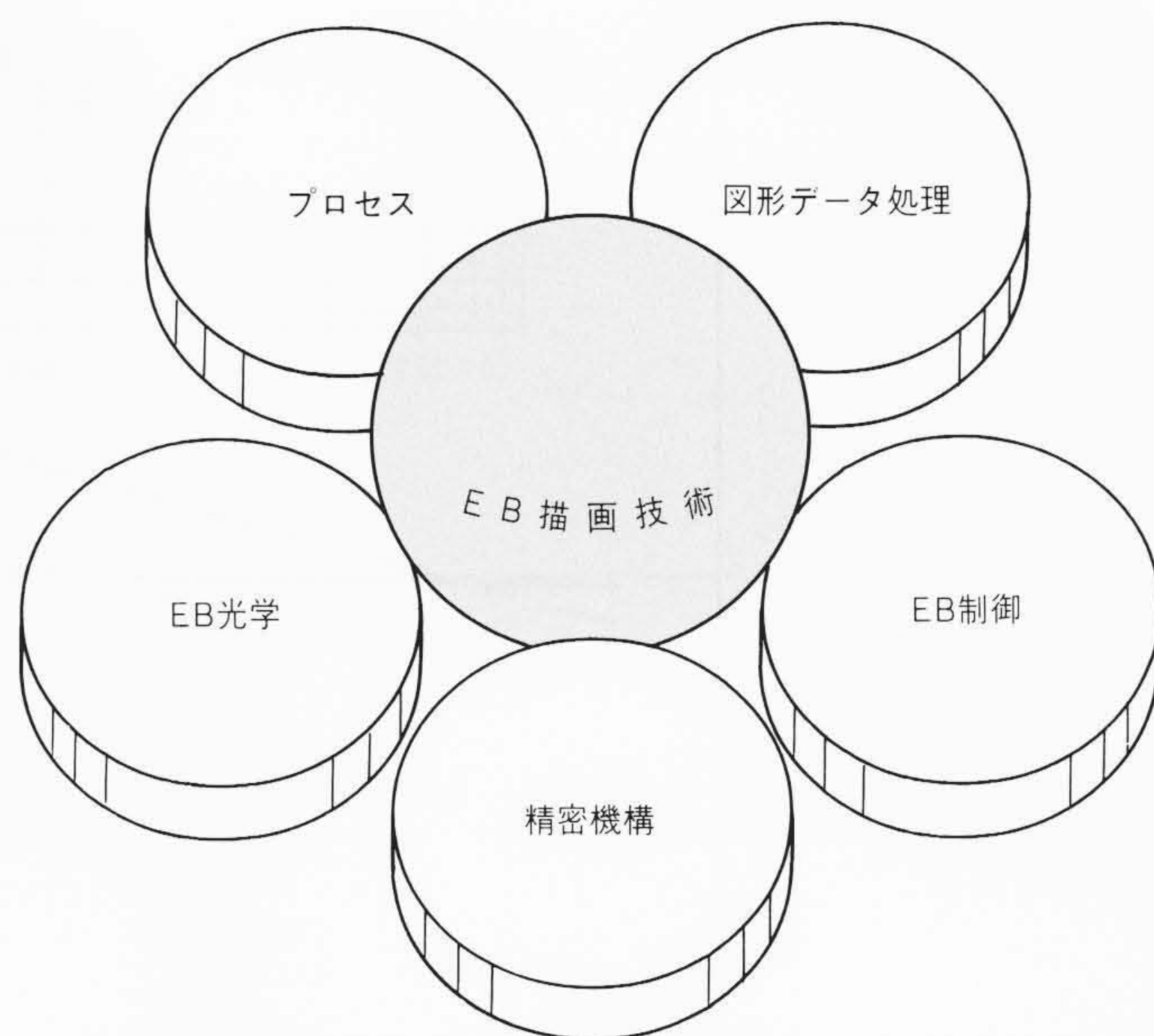


図4 EB描画技術を取り巻く周辺技術 EB描画技術はハード、ソフトおよびプロセス各技術の集大成である。

また、EB装置のもう一つの応用は、縮小投影露光装置用のレティクル描画である。現在この機能を持つ装置として、HL-700Mシステムがこれに対応する。

このほかに、日立製作所では0.1 μm レベルの先端デバイス研究用としてHL-700Fシステムを製品化している^{4),5)}。

2.2 HL-700M/Dシステムの性能

(1) 描画精度

安定した電子光学系と、偏向ひずみ補正、ビームサイズ補正、ダイナミックフォーカスなど高度の補正機能、さらに鏡体の恒温化、そしてプレートのひずみを低減したカセットなどのくふうにより、つなぎ精度0.15 μm 、小寸法精度0.15 μm 、位置精度0.2 μm を達成している。

一方、アドレスサイズの変更(0.025 $\rightarrow$ 0.0125 μm)や輪郭分解描画機能などの導入によって、つなぎ精度0.1 μm 、小寸法精度0.1 μm 、位置精度0.12 μm と改善され、0.5 μm 技術に対応可能となっている。輪郭分解描画機能の効果を図5に示す。パターンの輪郭を一定のビームサイズで描画することにより、可変成形ビーム描画の欠点をカバーし、寸法精度を向上させることができた。

(2) スループット

HL-700M/Dは可変成形ビームを用いたベクタスキャン方式を採用している。そのため、アドレスサイズを小さくしてもスループットが低下せず、ラスタスキャン方式に比較して0.8 μm 製品以降のレティクル描画では優位に立っている。さらに、二面大容量バッファメモリの採用、パイプライン方式を用いたデータ転送などにより、高スループットを実現している。

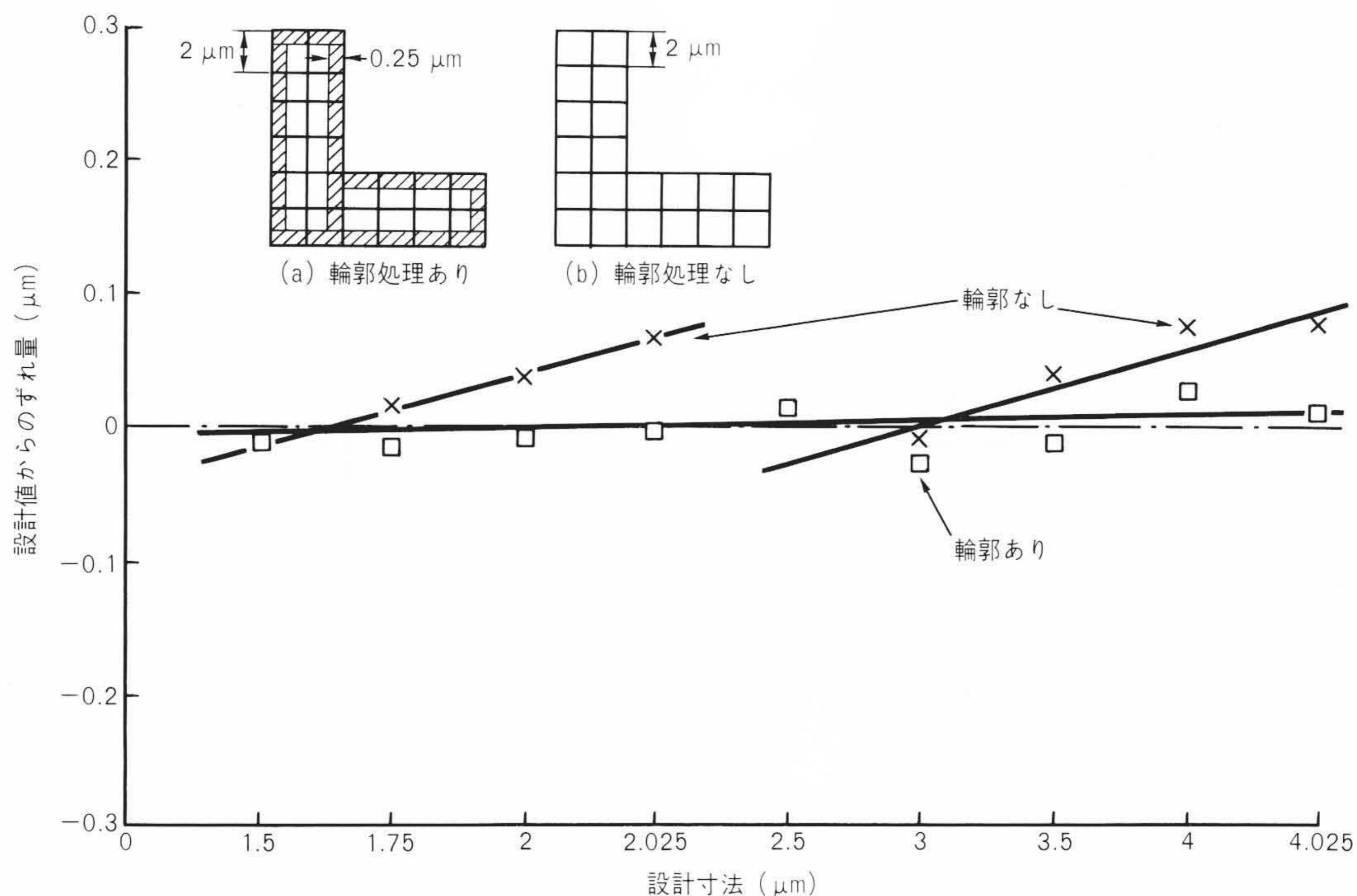
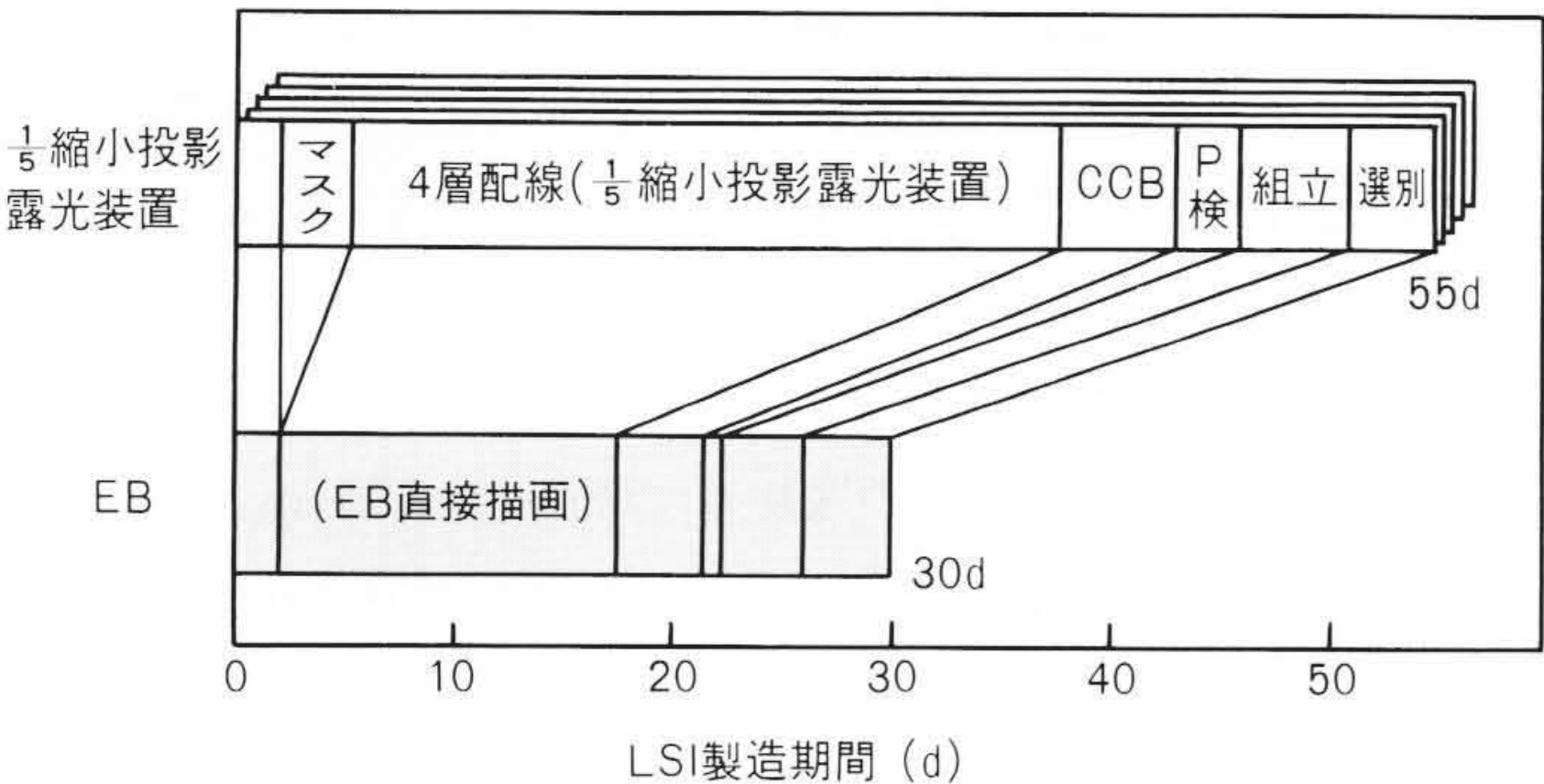


図5 輪郭分解描画機能による寸法精度の改善
ウェーハ上で0.3 μm)以上の寸法精度が向上する。

輪郭分解描画を行うことにより、レティクル上で1.5 μm(ウ

	EB直接描画	$\frac{1}{5}$ 縮小投影露光装置(マスク)
ウェーハ搭載可能 品種数	10 種	2 種
ロット数(比)	1	5



注：略語説明 CCB (Controlld Collapse Bonding), P検 (Probe検査)

図6 EB直描技術適用の効果 多品種・ウェーハによってロット数の削減と、LSI製造期間の短縮が図れる。

(3) 安定性・信頼性

生産装置としてのHL-700M/Dの最も優れた点は、その安定性と信頼性にある。信頼性の高い電子制御部とHL-600M/Dから実績のある電子光学系、およびそれらの機能を維持確認する精度評価・保守プログラムの整備によってこれを達成している。

3 EB技術の応用

3.1 直描による大形電子計算機用論理LSIへの応用

少量生産品の一例が、大形電子計算機用の論理LSIである。日立製作所の大形電子計算機用の論理LSIでは、品種展開のためにEB直描技術を適用している。

(1) レジストプロセス

レジストプロセスとしては、単層レジストと多層レジストとを併用していた。多層レジストの使用は、パターン寸法精度確保のための近接効果低減と、下地平たん化を目的としたものである。

電子線レジストとして、感度、解像度、ドライエッチング耐性を同時に満足することが必要であり、使用感度は多層レジストで2 μC/cm²(30 kV)、単層レジストで15 μC/cm²(30 kV)である。

(2) EB直描技術適用の効果

EB装置を光露光に用いる $\frac{1}{5}$ 縮小投影露光装置と比較すると、ホトマスクが不要であることのほかに、1ウェーハ上に複数の品種を搭載できることから生じる利点大きい。

この1枚のウェーハ上への多品種チップの搭載という特徴によって、着工数、ロット数とも大幅に削減できた。その結果、製造ラインの負担を軽減でき、また作業待ち時間の減少に伴って、製造期間を約半分に短縮することができた。EB直描技術を用いた場合の製造期間短縮の効果を図6に示す。

3.2 レティクル描画への適用

EB装置が半導体製造装置として最初に実用化されたのが、ホトマスクの描画である。メモリを中心としたレティクル描画では、多くのHL-700Mが実用化されている。

表1 レティクル仕様の推移 LSIの設計ルールが微細化するのに従い、レティクルの寸法精度、位置精度、欠陥サイズなどの仕様も厳しくなる。

設計ルール 項目	0.8 μm 技術	0.5 μm 技術	0.3 μm 技術
代表品種	4 M DRAM	16 M DRAM	64 M DRAM
小寸法精度	$\pm 0.15 \mu\text{m}$	$\pm 0.10 \mu\text{m}$	$\pm 0.05 \mu\text{m}$
位置精度	$\pm 0.20 \mu\text{m}$	$\pm 0.12 \mu\text{m}$	$\pm 0.07 \mu\text{m}$
継ぎ精度	$\pm 0.15 \mu\text{m}$	$\pm 0.10 \mu\text{m}$	$\pm 0.05 \mu\text{m}$
欠陥サイズ	$\geq 1.0 \mu\text{m}$	$\geq 0.8 \mu\text{m}$	$\geq 0.5 \mu\text{m}$

(1) レティクル仕様

縮小投影露光装置用レティクルの仕様は、表1のように推移している。現在量産が行われている4 M DRAMは0.8 μm 製品であるが、0.5 μm 製品の16 M DRAM、さらに0.3 μm 製品の64 M DRAMと進むにつれて、レティクル仕様はますます厳しくなっていく。

HL-700Mは当初0.8 μm 技術対応のレティクル描画機として開発された。その後、2.2節で述べたような改良によって0.5 μm 技術まで対応可能となっており、レティクル生産に適用中である。16 M DRAMクラスのレティクルの平均描画時間は1枚当たり1時間、最大でも2時間以内である。

(2) 位相シフトレティクルへの対応

HL-700Mは位相シフトレティクル対応EB装置としても優れている。代表的な位相シフトレティクルの描画手順を図7に示す。

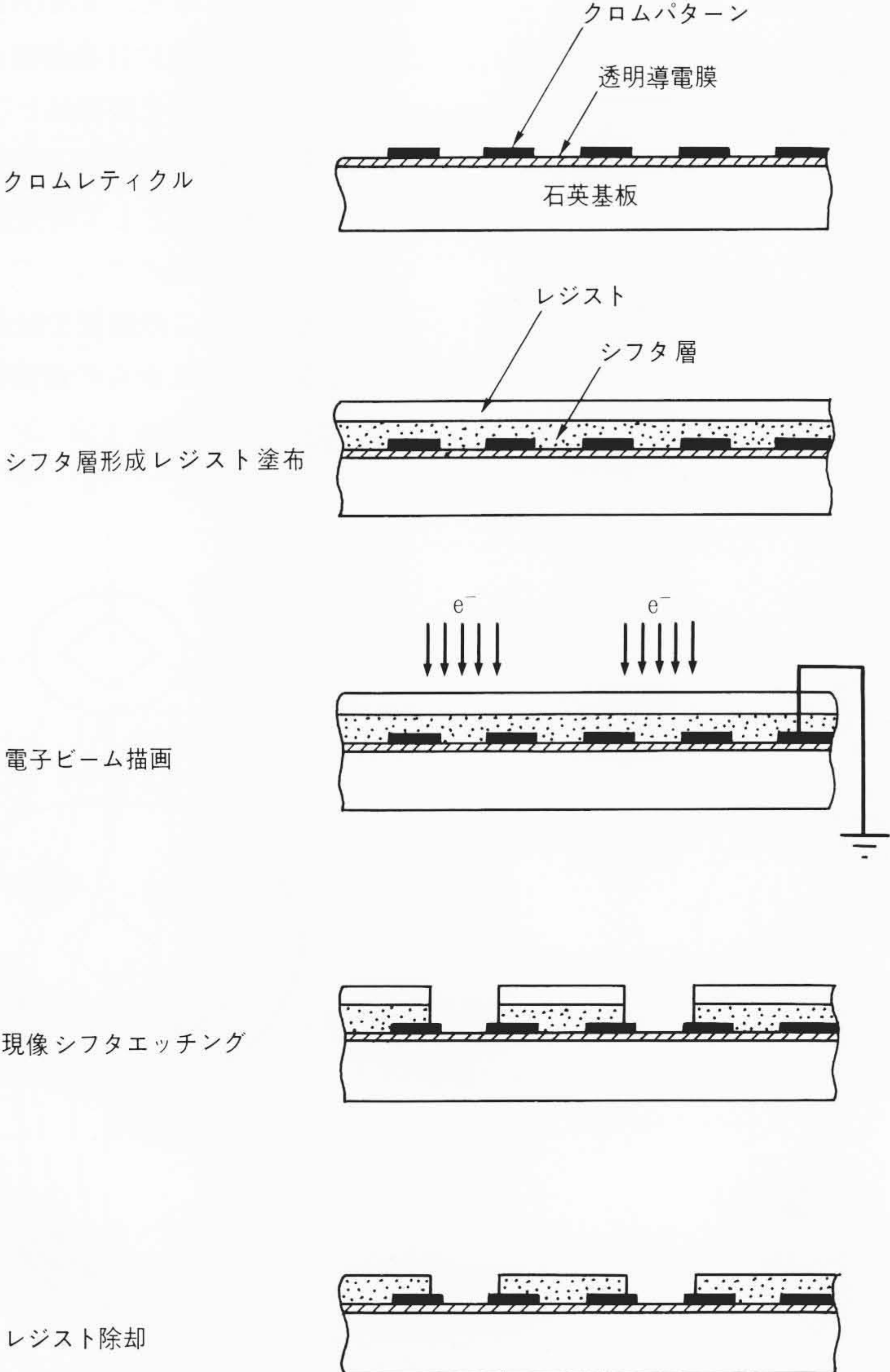


図7 位相シフトレティクルの製造プロセス 位相シフトレティクルは、クロムパターン(遮光層)の上にシフターパターン(透明層)を正しい位置に重ね合わせて描画する必要がある。

クロムパターンを形成後、再度シフターパターン描画が必要である。クロムパターン上に精度よくシフターパターンを描画するためには、クロムパターンを精度よく検出することが必要である。HL-700Mには3.1節で述べたように、直描技術のノウハウが盛り込まれており、マーク検出を高精度かつ

作業性よく行うことができる。現在、HL-700Mは各種の位相シフトレティクルの開発に使われており⁶⁾、十分な対応力を持っていることが実証されている。

4 0.3 μm以降への対応

4.1 これからのEB描画システム

2章および3章で日立製作所が現在市販している0.5 μm対応のEB装置HL-700M/Dシステムの性能と、その応用例を示した。本章では0.3 μm以降の微細加工に対応する高速直描装置(EB-H)とレティクル描画装置(EB-MX)、および0.03 μmクラスのデバイス開発用の超微細描画装置(EB-FX)の要素技術について述べる。

EB描画システムの性能はスループット、位置精度、解像度で代表される。ホトマスクを描画する場合、約10 cm角の領域にわたり高い位置精度が要求される。直描の場合の位置精度は、アライメントマーク検出領域の中で要求されるので、位置精度はホトマスク描画の場合よりも低い、スループットの要求は高い。また、R&D(Research and Development)用先端デバイス研究には微細性が要求される。

この三つの性能を座標軸として、現在のHL-700シリーズとこれからの3機種を図8にまとめて示す。

第一に、直描機として開発したHL-700DシステムではASICパターンで6枚/hのスループット(6インチウェーハ換算)が得られる。もしこの装置で64 M DRAMを描画すれば0.5枚/h以下となる。これからの直描機としては解像度0.3 μm以下、

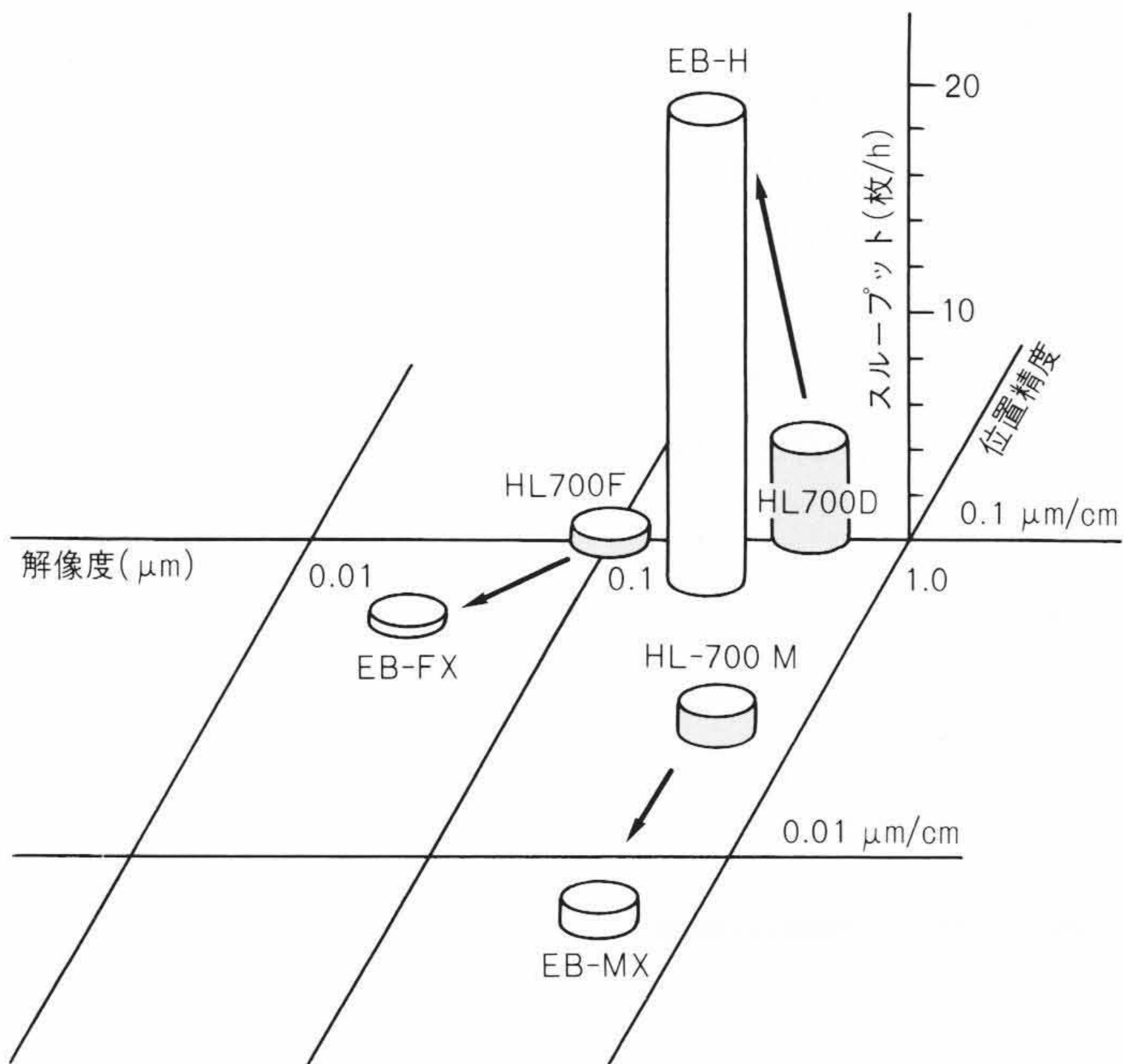


図8 HL-700シリーズと現在開発中の装置の性能比較 ハッチングを施したものは、現在のHL-700シリーズの性能を示す。それぞれ矢印の方向に性能向上した装置を開発中である。

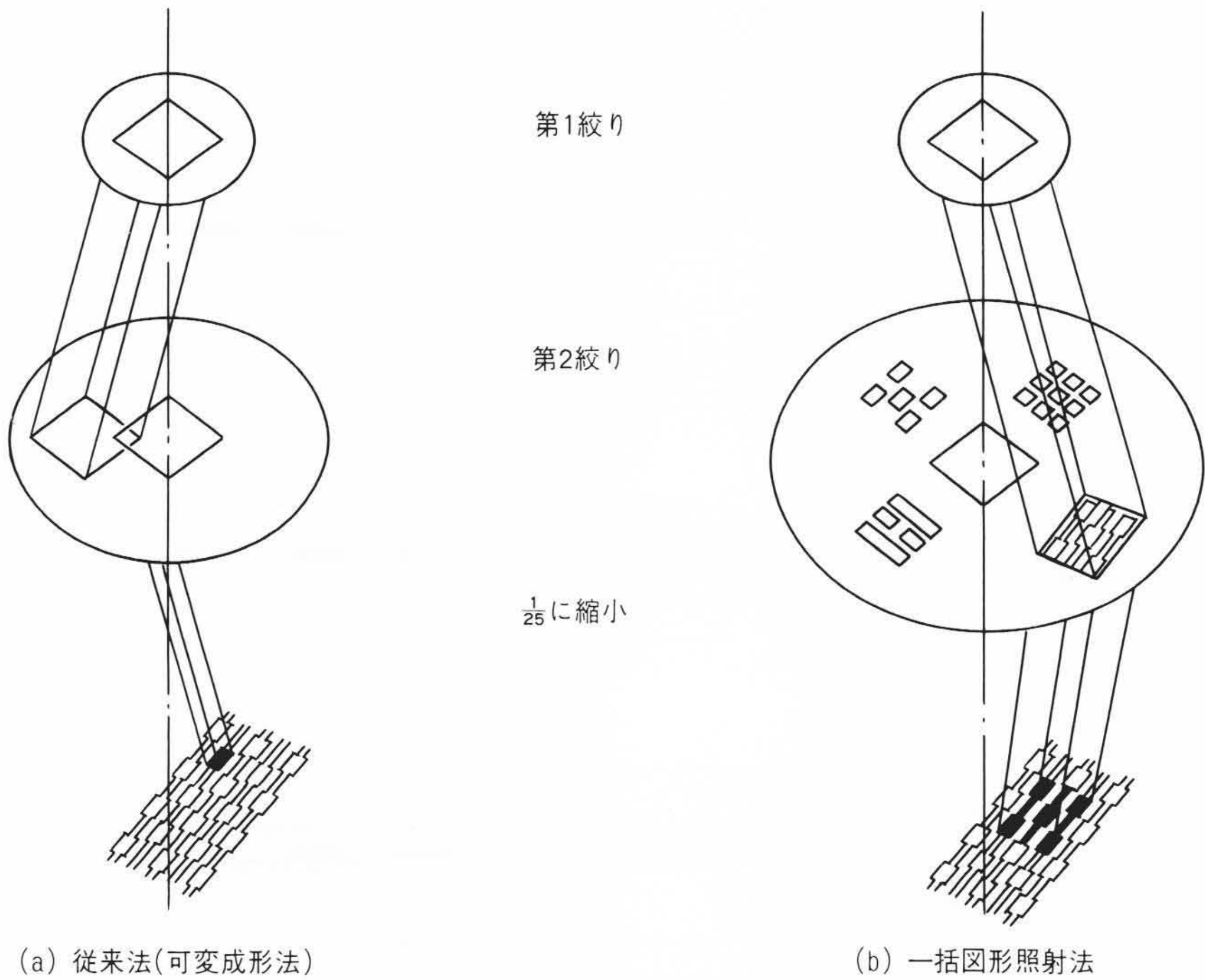


図9 一括図形描画方式概念 一括図形照射法では、従来の可変成形法に比べてショット数が約 $\frac{1}{100}$ になる。

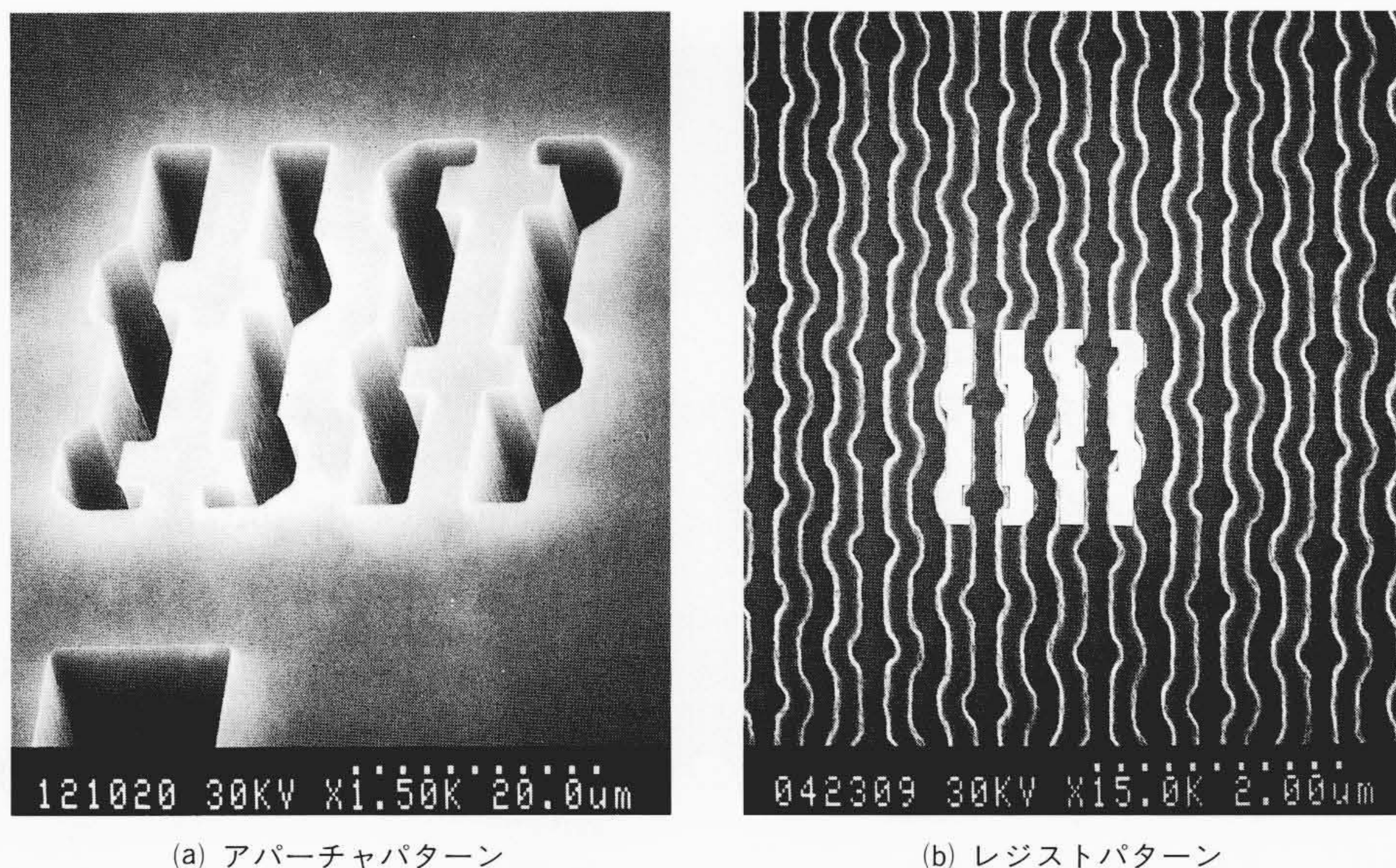


図10 一括図形アパーチャと転写パターン (a)はSiプロセスによって作製したアパーチャパターンで、(b)は(a)を $\frac{1}{25}$ の大きさにレジスト上に転写したパターンである。最小寸法は $0.2\mu\text{m}$ である。

スループット20枚/h以上が必要であり、この技術の概要については次節で述べる。

第二に、レティクル描画用HL-700Mシステムは解像度 $0.5\mu\text{m}$ 、位置精度 $0.012\mu\text{m}/\text{cm}$ 、スループット1枚/hであるが、64 M用レティクル機としては解像度 $0.3\mu\text{m}$ 、位置精度 $0.007\mu\text{m}/\text{cm}$ が必要である。

第三に、微細描画をねらったHL-700Fシステムは解像度 $0.1\mu\text{m}$ で、スループットはこの種の装置としては格段に高い1枚/hである。先端デバイス研究者の間では解像度と精度のより高いものを求める声が大きく、スループットは現状を維持し、図8中のEB-FXの位置にある解像度 $0.03\mu\text{m}$ 、位置精度 $0.03\mu\text{m}$ の性能を持つ装置が要求されている。

次節では特に64 M DRAM以降のメモリ製造にインパクトの大きいEB-Hについて述べる。

4.2 高速化のための一括露光法

EB描画高速化の歴史は、ビーム面積を増大することによって、1回のショットでいかに多くのパターンを焼き付けるかを競う歴史でもあった。最初に開発された装置は点ビームであり、スループットは低かった。次いで $2\mu\text{m}$ 角の固定サイズのビームが米国IBM社で発明され、可変整形ビームへと発展した⁷⁾。しかしこの方式で、例えば64 M DRAMパターンを描画するには図9(a)に示すようにパターンを分解するので、ショット数がウェーハ当たり400億個にもなる。現状の最高技術でも、1ショット当たり描画時間は200 ns程度はかかるので、これだけで2時間以上かかることになる。

そこでEB-Hでは、図9(b)に示すようにメモリの数マイクロメートル角の1セルにあるパターンを一括して描画しようというものである⁸⁾。同図に示すように第1絞りを通過したビー

ムを、第2絞り上の所望のパターン上に偏向する。このパターンを約 $\frac{1}{25}$ に縮小し、ウェーハ上に転写する。この方式ではショット数を従来の可変整形方式に比べ約 $\frac{1}{100}$ に減少させることができ、描画時間が80 s/ウェーハで済むことになる。一括露光方式の予備実験結果を図10に示す。同図(a)は、Siプロセスを用いて作製した $50\mu\text{m}$ 角のアパーチャパターンであり、ウェーハ上では $2\mu\text{m}$ 角の大きさとなる。同図(b)は、レジストへの転写パターンで最小 $0.2\mu\text{m}$ の解像性が得られている。

EB-Hではこの一括露光方式以外に、描画以外に要する時間の徹底的排除を図っている。その一つが、ステージ速度可変連続移動方式である。パターン密度の大小に応じて、ステージの速度を変えながら描画する方式である。もちろん精度が落ちないくふうが必要であり、ステージ移動に伴う電子ビーム制御や、振動対策には十分な注意が払われている。

4.3 その他の課題

EB描画システムが $0.3\mu\text{m}$ 以降の全面的なリソグラフィ技術手段として使われるためには、以上に述べた装置開発以外に次の課題がある。

EB描画システムとしての課題は、ウェーハローディングとデータ変換の時間短縮があげられる。異物付着を嫌うウェーハは、極力人間の介入を避けなければならず、CADシステムと直結した自動ローディングが必要となるであろう。また、デバイスの微細化に伴いLSIのデータは膨大となり、EB描画データへの変換時間を短縮するためのくふうも必要になると考えられる。

次にプロセス技術では、レジストの高感度化とチャージアップ対策がそれぞれスループット、高精度化の上で課題となってくる。

さらに、描画されたパターンの寸法、位置(長寸法100 mm, 短寸法精度0.01 μm)を正確に計測しなければならず、現在主流となっている光計測技術に代わる新たなブレイクスルーが求められている。日立製作所で開発した電界放射形の電子ビーム測長技術がその例である。

日立製作所は単にEB描画システムだけでなく、これらプロセスや計測技術などを含め、総合的に研究・開発・製品化を進めている。

5 おわりに

EB装置「HL-700シリーズ」の、ハーフミクロンLSIのリソグラフィー装置としての応用例について述べた。特に直描技術では、ASIC生産で製造期間を約 $\frac{1}{2}$ に短縮し、多品種搭載とマスクレスの効果を遺憾なく発揮している。またレチクル描画技術では、平均1枚/hの高スループットで安定生産に寄与している。

将来、光リソグラフィー技術の限界が論議される中で、微細加工性、多様な高精度パターンニング性を持つEB技術は、今後ますます有望なリソグラフィー技術として認識されると思われる。

日立製作所は0.3 μm 以降をねらって、スループット、位置精度、解像度のすべての点でシステムチックなEB描画の技術革新を進めている。

参考文献

- 1) パソコン情報誌：ログイン, **5**, 32(1991)
- 2) 中村, 外：電子線描画装置の高度利用技術の開発, 日立評論, **68**, 9, 699~704(昭61-9)
- 3) M. Fujita, et al.: Application and Evaluation of Direct-write Electron Beam for ASIC's, IEEE J. of Solid-state Circuits, **SC-23**, 2, 514(1988)
- 4) 斎藤, 外：超微細電子ビーム描画装置(HL-700F)の開発, 機械振興, **23**, 11, Nov., 57(1990)
- 5) N. Saitou, et al.: Electron Beam Direct Writing Technology, Solid State Technology, Nov., 65(1987)
- 6) T. Yamanaka, et al.: A 5.9 μm^2 Super Low Power SRAM Cell Using a New Phase-shift Lithography, IEDM Technical Digest, Dec., 477(1990)
- 7) H. C. Pfeiffer: Variable Spot Shaping for Electron-beam Lithography, J. Vac. Sci. Tech., **5**, 3, 887(1978)
- 8) N. Saitou, et al.: EB Cell Projection Lithography, Proc. 1990 International Micro Process Conference, 44(1990)