

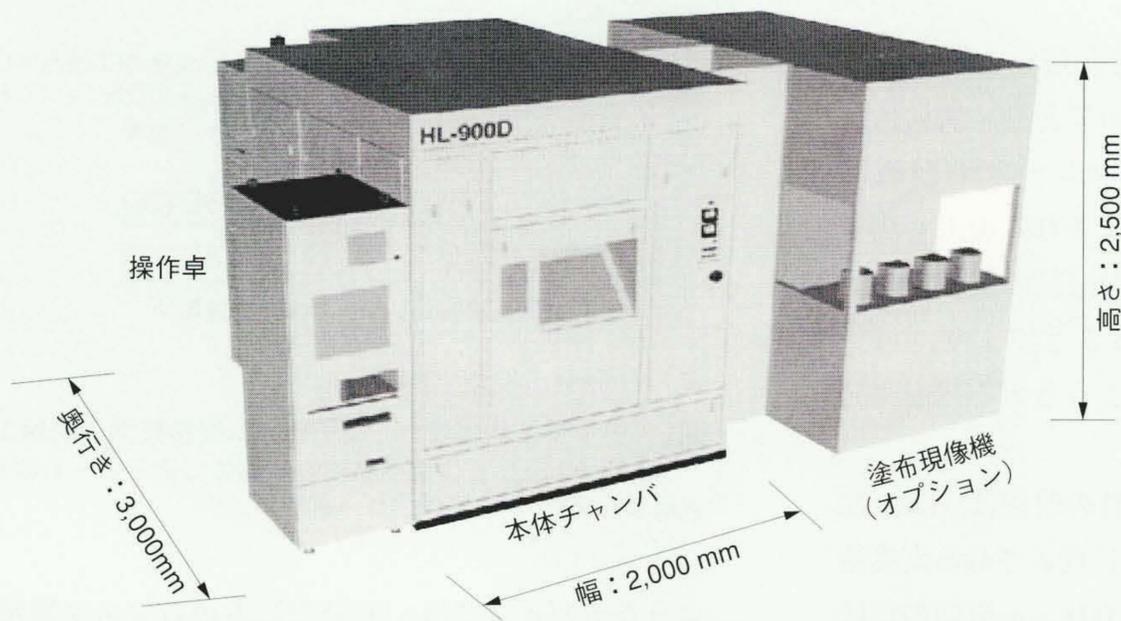
ナノメートル領域を迎えた電子ビーム直接描画システム

Electron Beam Lithography System in Nanometer Fabrication

松坂 尚 Takashi Matsuzaka
早田康成 Yasunari Sôda

特徴

- (1) セルプロジェクション技術
- (2) ステージ可変速連続移動技術
- (3) ハードウェアによる近接効果補正技術
- (4) 操作性の向上



電子ビーム直接描画システム“HL-900D”の外観

HL-900Dと塗布現像機をインライン接続した場合の設置イメージを示す。本体は恒温制御のチャンバに実装されている。

0.1 μm に迫るナノメートル領域でのリソグラフィーが、大きく変容しようとしている。超解像技術が光リソグラフィーを延命させてきているが、複雑なマスク技術を必要とすることから、マスクコストの高騰を招いている。開発に占めるマスクコストの割合は、高付加価値であるが少量多品種のシステムLSIで顕著であり、その収益力を左右しかねない。このため、微細加工性と量産性の追求は必須のことになると予想されるが、キーワードは「マスクレス加工」である。

電子ビーム直接描画システムは微細性に優れ、パターンジェネレーション機能があるので「マスクレス」という特徴を持っているが、描画すべき画素数(ショット数)の増大に反比例してスループットが低下することが課題となっている。システムLSIの開発では、毎時1~3枚のスループットの実現が求められている。

日立製作所が開発した電子ビーム描画システム“HL-900D”では、(1)セルプロジェクション技術と、(2)ステージ可変速連続移動技術の高度化を核に、高解像化と高スループット化を実現しており、また、いっそうの操作性向上を図っている。

1 はじめに

半導体デバイスの微細化は、ロジックデバイスの高速化をけん引役として、目覚ましい前倒し傾向にある。一方、リソグラフィー技術は、露光機の進化と超解像技術との組合せにより、0.18 μm から0.15 μm レベルに至る領域までの解像を可能としている。

0.1 μm に達するナノメートルの入口の領域ではArFスキュナに期待がかかっているが、ArFリソグラフィー技術全体の成熟度は、KrFリソグラフィーの成熟度に今一步及ばない状況にある。

また、半導体デバイスも、従来のメモリ中心の大量生産から、システムLSIに代表される高付加価値デバイスへと支点を移しつつある。転写されるパターンはロジックデバイスに特有のランダムパターンへと急速に変化しつつあり、超解像技術を適用するうえでの制約の一つとなってきている。このため、量産性と微細加工性を実用的に両立させる解が見つけにくくなっているのが現状である。

こうした状況の下では、量産性と微細加工性のトレードオフ(二律背反性)をある程度容認すると、解像性に優れる電子ビーム直接描画技術が、ナノメートル領域でのリ

ソグラフィーの有力候補技術として浮かび上がってくる。

ここでは、日立製作所が開発、販売している電子ビーム直接描画システムについて述べる。

2 リソグラフィー技術を取り巻く状況

これまで、リソグラフィー技術には、量産性を第一の指標として、光リソグラフィーが用いられてきた。この光リソグラフィーの高解像化は、露光する光の短波長化によって達成されてきた。

光リソグラフィーの中核として現在用いられているKrFエキシマレーザの波長は0.248 μm であり、次世代技術として期待を集めるArFエキシマレーザの波長は0.193 μm である。したがって、必要とされる加工寸法そのものはすでに露光に用いられる光の波長の限界を超えているため、超解像技術を併用することにより、波長の $\frac{1}{2}$ に至る領域まで解像性を拡張しようとする技術開発が続いている。

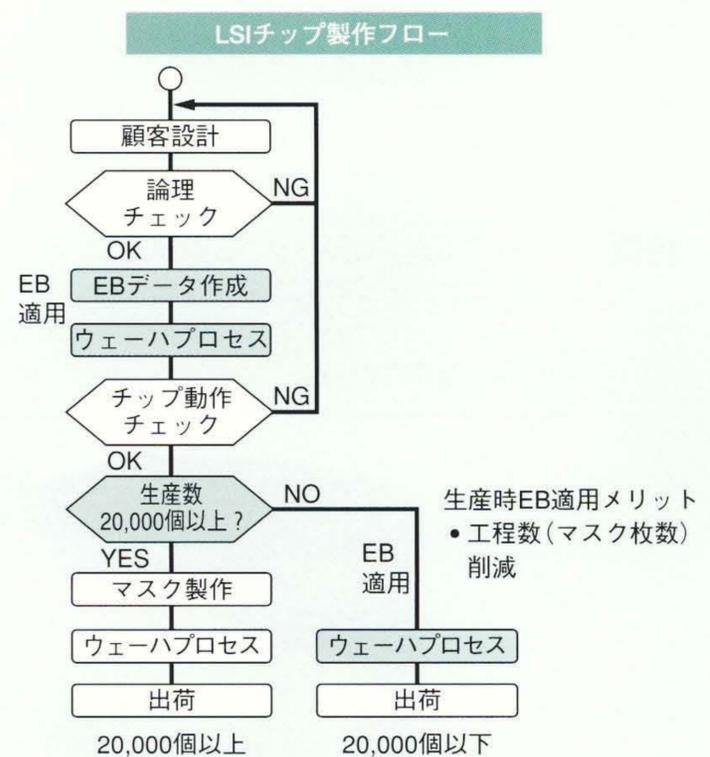
一方、0.25 μm までの領域での解像性の改善は、DRAM (Dynamic Random Access Memory)に代表される高集積メモリがけん引役を果たしていたが、0.18 μm 以降の領域では、ロジックデバイスの高速化がけん引役となっている。リソグラフィーの高解像性が要求される転写パターンも、高密度周期的パターンよりも非周期的な「ランダムパターン」が主流になりつつある¹⁾。

また、生産されるデバイスも、汎用性がある大量生産される高集積メモリから、個別機能を搭載することによって付加価値を高めたシステムLSIへと中心が移りつつある。その特徴から、今後の生産形態は、少量多品種のデバイスの高効率生産が中心となっていくものと予想する。

3 電子ビーム直接描画技術の位置づけ

転写パターンの原画であるマスクを作成し、縮小投影する技術を「転写系リソグラフィー」と総称すると、転写系リソグラフィーでは、高解像化を達成するためには、リソグラフィー装置の開発とともに、マスク作成技術がきわめて重要な位置づけにある。

マスク作成技術の高度化は転写系リソグラフィー技術の命運を担っているばかりでなく、デバイス生産でのマスクコストの上昇を招く可能性を秘めている。特に、高集積メモリのように生産量の多いデバイスでは、開発も含めて生産に占めるマスク費用は生産量に反比例して負担が軽減できるが、生涯生産量の少ないシステムLSIの



注：略語説明 NG (No Good)

図1 少量多品種生産への電子ビーム直接描画の適用工程

システムLSIなど少量多品種の半導体に電子ビーム直接描画を適用した場合のLSI製作フローを示す。

ようなデバイスでは、開発費に占めるマスク費用が深刻なコスト要素となる。

このため、従来から着目されている高解像性だけでなく、マスクレスのリソグラフィーという側面から、電子ビーム直接描画技術が注目を集めはじめている。LSIの製作フローと少量多品種生産への電子ビーム直接描画の適用工程を図1に示す。具体的には、少量生産での開発から生産に至るマスク費用の削減であり、中量生産では、生産フェーズに移行する場合に光リソグラフィーのマスクを作成するにしても、開発フェーズでは、マスクレスによるコスト削減を実現することに新たなニーズが生まれつつある。

この場合のCOO (Cost of Ownership)を試算すると、生産時に光リソグラフィーに移行するか否かのターニングポイントは、直径約20 cm (8インチ) ウェーハ換算で毎時1~3枚のスループットと想定できる。したがって、当面、このスループットを実現する電子ビーム直接描画システムを市場に投入していくことが課題である。

4 電子ビーム直接描画システム“HL-900D”

日立製作所の電子ビーム直接描画システム“HL-900D”には、これまでのHL-800Dシステムの特徴である、(1) セルブプロジェクト技術、(2) ウェーハステージの可変速連続移動技術、および(3) 近接効果補正技術を継承、発展させて

表1 HL-900Dの基本仕様

標準的な使用条件での基本性能を示す。最小加工寸法と合せ精度がリソグラフィー装置の性能の指標となる。

最小加工寸法	150 nm
限界解像度	120 nm
合せ精度	50 nm(平均値+3σ)

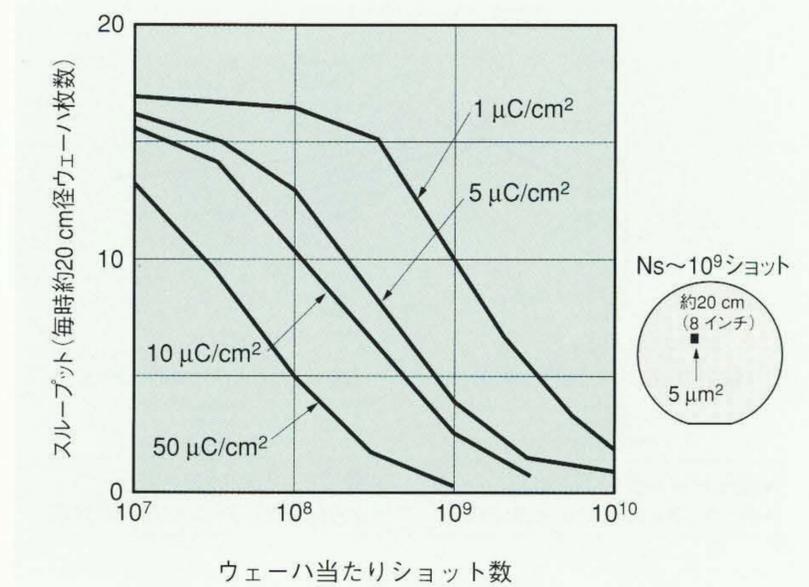
搭載している²⁾。これに加えて、このHL-900Dでは、システムの操作性の向上に留意した。基本仕様を表1に示す³⁾。

4.1 解像性と焦点深度

HL-900Dの解像度と焦点深度を図2に示す。限界解像度は標準状態で120 nmであるが、レジスト膜厚を限定すると、100 nmを解像することができる。同図からも判読できるように、このときの焦点深度は30 μmに及び、光リソグラフィーの約30倍である。

4.2 高スループット化技術

HL-900Dでの高スループット化のかぎは、(1) セルプロジェクション技術と、(2) ステージ可変速連続移動技術にある。電子ビーム描画システムのスループットを規定する主な要因は、描画対象であるウェーハを埋め尽くすのに必要な画素数(ショット数)である。特に、100 nmに迫るナノメートル領域ではショット数が大幅に増加する傾向にあり、ショット数を低減することが、実用的な



注1: 略語説明
 T(ウェーハ1枚当たりの処理時間), Ns(Number of Shots)
 S(Resist Sensitivity), J(Beam Density), Td(Settling Time)
 Toh(Overhead Time)
 注2: $T = Ns(S/J + Td) + Toh$
 $J = 10 \text{ A/cm}^2$
 $Td = 100 \text{ ns}$
 $Toh = 300 \text{ s}$

図3 ショット数とスループットの関係

ウェーハ上のパターンを塗りつぶしていくのに必要なショット数とスループットの関係を示す。スループットは、ショット数の増大とともに減少する傾向にある。

スループットを実現するうえで重要である。

セルプロジェクションは、LSIパターンのうち出現頻度の高い図形を5 μm × 5 μm (25 μm²)単位で抽出して一つの画素としてまとめて描画する機能であり、一括描画した分だけ総ショット数を低減することができる。総ショット数とスループットの関係レジスト感度をパラメータとしてプロットしたものを図3に示す。パターンデータを作成する際に抽出したこの図形は、セルアパーチャに作り込む必要がある。HL-800Dでは作り込む図形数が5種類に限定されていたが、HL-900Dでは、21種類に拡張している。

4.3 近接効果補正機能⁴⁾

電子ビーム描画には、同じ設計寸法にもかかわらず、パターンの粗密によって出来上がり寸法が変化する「近接効果」と呼ばれる現象が存在し、高解像化を妨げる要因となっている。ウェーハに照射される電子ビームは、感光に必要なエネルギーをレジスト膜に与えながら透過していき、ウェーハ表面に達すると後方に散乱され、レジスト膜内を再び透過していく。この散乱により、所望のパターンの周辺には感光に不要なエネルギー蓄積される。孤立したパターンでは散乱によって蓄積されるエネルギーの影響は小さく、密集したパターンでは周囲のパ

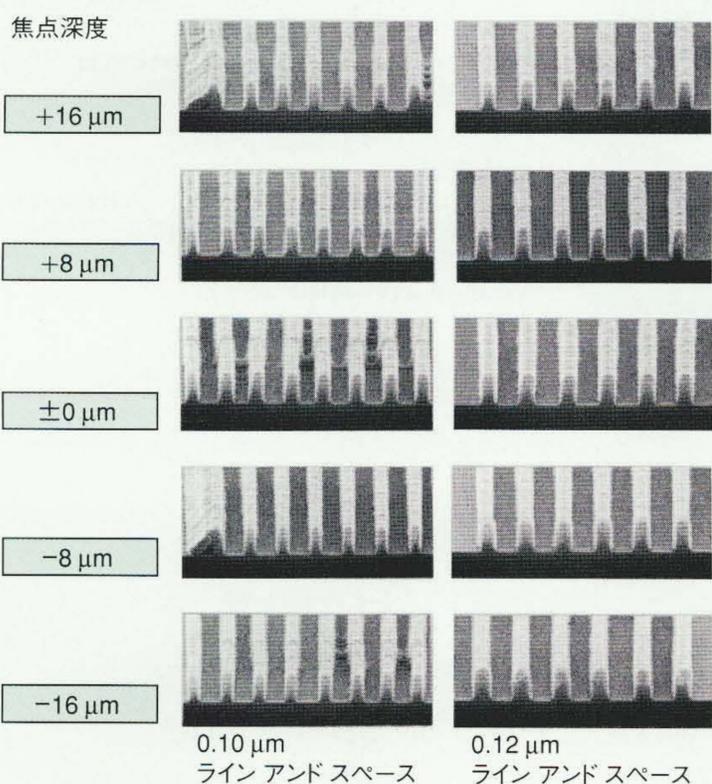


図2 解像性と焦点深度

0.10 μmと0.12 μmのライン アンド スペースの解像性と焦点深度を示す。焦点深度は光リソグラフィーの約30倍に達している。

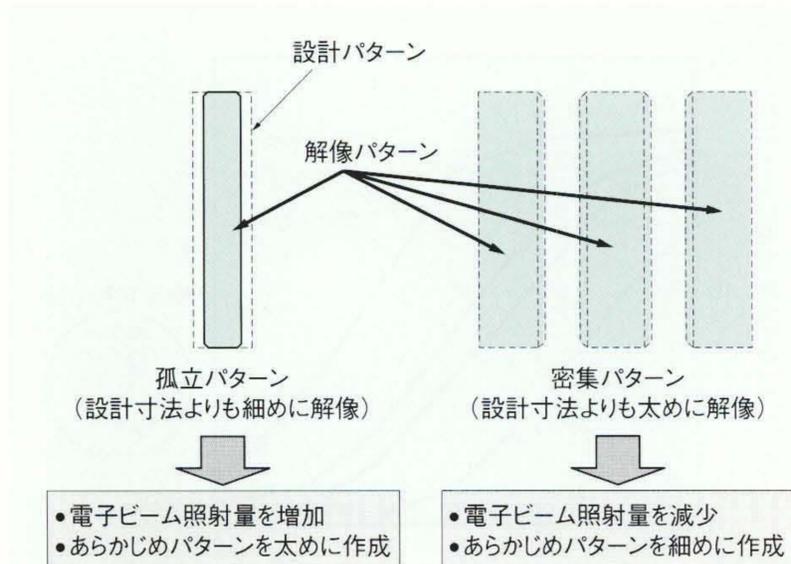


図4 近接効果補正

近接効果の発生の様子を示す。パターンの密集したところでは、パターン寸法の設計値からのずれが大きくなる。

ターンからの散乱の影響を合わせて受けるため、より多くエネルギーが蓄積される。このため、出来上がり寸法を設計寸法に近づけようとしても、孤立パターンでは設計よりも細めに、密集パターンでは設計よりも太めにそれぞれの寸法が形成される(図4参照)。近接効果補正は、電子ビームの照射量をパターンの密集度に応じて増減するか、または、パターン寸法の変動をあらかじめ見込んで寸法を増減させる方式が主流であり、パターンデータを作成する際にソフトウェアで補正を行っていた。この場合、0.25 μm クラスのデバイスでも補正処理時間は10時間以上に及び、この時間を短縮することが、電子ビーム直接描画システムを運用するうえでの課題であった。

HL-800Dでは、ハードウェアによる補正機能を搭載してきた。パターンの疎密による蓄積エネルギーを算定して、描画時の照射量の増減を制御するもので、補正をハードウェアで行うため、処理時間は10分以下と大幅な高速化が図られている。

HL-900Dでは、下地の補正データを取り込み、これか

ら描画する層の補正データと合成することにより、下地層の存在を考慮した近接効果補正をハードウェア上で実行することを可能とした。

5 おわりに

ここでは、ナノメートル領域を迎えた電子ビーム直接描画システムについて述べた。

ここで述べた電子ビーム直接描画システムの機能の一部は、通商産業省のプロジェクト「超先端電子技術開発促進事業」の一環として、超先端電子技術開発機構(ASET)が新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受け、日立製作所がこれを実施したものである。

電子ビーム描画技術の課題は高スループット化であり、いっそうの高速化実現に向けて技術開発に取り組んでいく考えである。

参考文献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors, SIA(1998)
- 2) H. Itoh, et al.: J.Vac. Sci. Technol., B10(6) (1992)
- 3) 赤羽, 外: 電子材料, pp.59~64 (1999-3)
- 4) F. Murai, et al.: J. Vac. Sci. Technol., B10(6) (1992)

執筆者紹介



松坂 尚

1977年日立製作所入社、計測器グループ エレクトロニクスシステム本部 第2設計部 所属
現在、電子ビーム描画装置の設計、開発取りまとめに従事
応用物理学学会会員
E-mail: matsuzaka @ cm. naka. hitachi. co. jp



早田康成

1981年日立製作所入社、中央研究所 先端技術研究部 所属
現在、電子ビーム描画装置の研究開発取りまとめに従事
応用物理学学会会員
E-mail: Soda @ crl. hitachi. co. jp