

半導体製造用 低加速電子ビーム近接転写装置

株式会社 リープル

代表取締役社長 島津信生

(株)リープル 取締役 執行役員専務

遠藤 章宏

(株)リープル 執行役員常務

野末 寛

(株)東京精密 半導体社 執行役員 リソグラフィシステムグループ リーダー

高野 英明

(株)東京精密 半導体社 リソグラフィシステムグループ サブリーダー

福井 豊治

はじめに

半導体の製造では、パターンをシリコンウェーハ上に何層にも渡って転写・形成するリソグラフィ工程が重要であり、実際、この工程は全ての製造工程の1/2から2/3を占めている。ここで転写・形成されるパターンの微細化は、半導体の性能向上と低価格化の鍵であり、膨大なリソースと期間をかけた技術開発が進められてきた。しかし、この技術開発も限界に直面しつつあり、今後の半導体産業の展望消失の危機、いわゆる、「リソグラフィ危機」が現実のものとなっている。

「リソグラフィ危機」とは、微細化のために装置価格とマスク価格が高騰し、また、プロセスマージンが狭くなった結果、歩留まりが下がり、半導体生産が経済的に成立しないことである。

従来のリソグラフィは光を用いているが、今後は、光の波長の概ね1/2 (90nm)から1/4 (45nm)の微細パターンの転写が必要とされている。これは、光の回折効果という物理現象との戦いであり、その実現は至難の業である。

装置価格の推移を図1に示す。既に、現在は指数関数的な価格上昇の局面に突入していることがわかる。微細化のために、レンズ構成が複雑になり、かつ、短波長光(遠紫外光)の使用を余儀なくされていることが原因である。また、パターンの微細化と平行して(下地パターンへの)重ね

合せ精度の向上が必須であるが、これは、光を用いる場合には機械精度を高めて対処するしか方法はなく、装置価格上昇のもう一つの原因である。

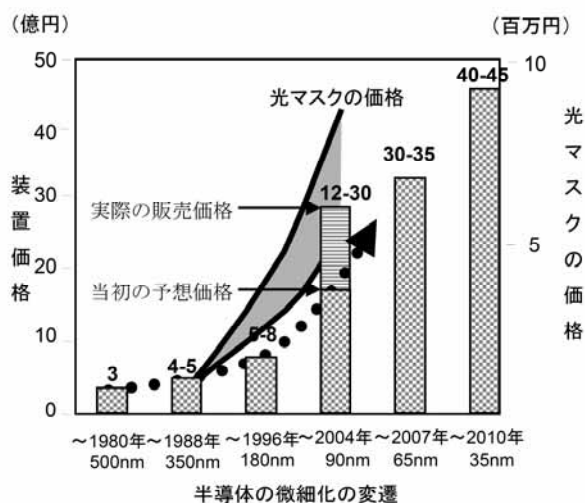


図1 リソグラフィ装置とマスクの価格の推移

同図に示すマスク価格の上昇はさらに深刻な状況を示している。微細化実現のため、今後のマスクには、補助パターンの付与や位相シフトマスクの使用が必要である。ほぼ等倍の補助パターンの付与は、本来の4倍パターンマスクの長所を無くするばかりか、パターンデータ量を膨大にし、マスクパターンの描画時間と検査時間を長大にして、マスク価格を急騰させる。位相シフトマスクは、本来、2次元で済んでいたマスクパターン形

成に3次元的な加工を施すもので、マスク価格はさらに高騰する。

少中量の半導体生産では、マスクコストが半導体の価格に直結する。少中量生産が大半を占めるシステムLSIに活路を見出そうとしている我国半導体産業にとってマスク価格急騰の抑制は急務である。

開発のねらい

内海孝雄（㈱リーブル代表取締役会長）は、シンプルを旨とすべく、リソグラフィのあるべき姿を基本に戻って考察した。その際、回折効果が無視できる電子ビームの使用を前提に、以下の条件を課した。

- (1) パターン発生機能を要するウェーハ直接描画方式ではなく、量産性に優れる転写方式であること。
- (2) 電子ビームがマスクやウェーハに与えるエネルギーが小さいこと
- (3) マスクからウェーハまでの間で発生する空間電荷効果が小さいこと
- (4) ウェーハ内の電子散乱で発生する近接効果が小さいこと

以上を踏まえて内海が得た着想が、2 kVの低加速電子ビームを用いて、ウェーハに近接させた穴あき（ステンシル）マスクのパターンを転写する低加速電子ビーム近接転写技術（LEEPL）である。

装置の概要

図2にLEEPLの原理を示す。穴あき（ステンシル）マスクをウェーハに近接させる構成は、等倍X線リソグラフィと同じであるが、X線の代わりに電子ビームでマスク上を走査する点異なる。この方式は、20年前にIBMが研究を行っていた。しかし、10kVの高加速電子ビームを用いたためマスクが厚くなり、高アスペクト比のステンシルマスクパタンが必要となって、将来の微細化に対

応できないとして開発が中止された。一方、LEEPLでは2 kVの低加速電子ビームを用いるため、マスク膜厚は10kVの場合の1/25で済み、高アスペクト比の問題は大幅に軽減する。すなわち、等倍マスクを用いる転写方式（上記の条件(1)）に将来性を見出すことができた。

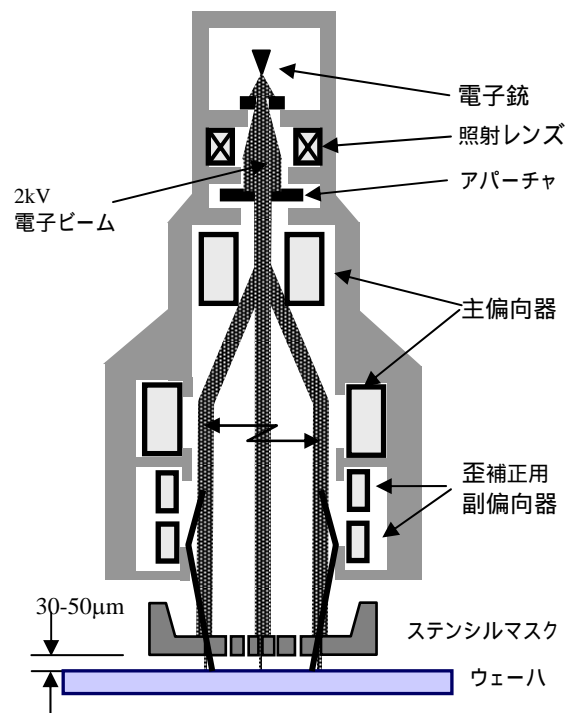


図2 LEEPLの原理

低加速電子ビームを用いる結果、電子ビームがマスクとウェーハに与える熱量（パワー）が大幅に低減でき、条件(2)を満足する。これは、電子ビームの加速電圧とレジスト感度が反比例の関係にあることと、電子ビーム自体が低加速であることとの相乗効果による。

条件(3)の空間電荷効果とは、電子が持つ電荷の相互の反発作用によってビーム軌道が乱される（ビームぼけの発生）ことを言う。ビームの電子数が多い（大電流）程、また、電子の集結箇所（クロスオーバー点）が多い程、さらに、マスクから結像面であるウェーハまでの距離が長いほど空間電荷効果は大となる。高スループット（一般に大電流ビームを必要とする）と微細パターン転写を両立させようとする

き、この空間電荷効果が大きな障壁となる。しかし、LEEPLは小電流ビームでも高スループットが実現でき、マスク - ウェハ間で電子ビームは平行であってクロスオーバーが存在せず、また、この間の距離はEPL方式の数10cmに比べて数10 μm と短く、条件(3)の空間電荷効果は無視できる。

条件(4)の近接効果とは、高加速電子ビームではウェハ内部での散乱領域が大きく、後方散乱電子が再度レジストを感光させ、このため近接したパターンの分離ができなくなる現象を言う。2kVの低加速電子ビームを用いるLEEPLでは、電子はレジスト層のみで散乱し、かつ、散乱領域が小さいため近接効果が殆ど無視できる。

装置構成がシンプルなLEEPLは装置価格が低減でき、さらに、前述の条件を全て満たす方式である。これに加えて、電磁界の印加で容易に軌道を制御できる電子ビームを使用しているため、マスクやウェハ上の下地パターンの歪を補正でき、高い重ね合せ精度を実現できる。下地パターンの歪補正が可能なのは、転写する層毎に光リソグラフィとLEEPLを使い分けること(ミックス&マッチ)を可能とする。すなわち、半導体製造ラインにおいて複数のリソグラフィを最適な組合せで使用可能とする。

写真1は完成したLEEPL-3000の外観である。従来装置との置き換えを容易にするため外形、フットプリントともに最新の光リソグラフィ装



写真1 装置の外観写真

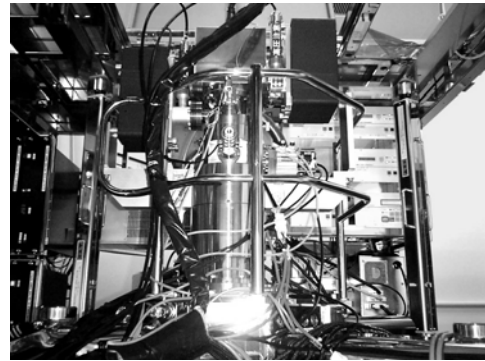


写真2 電子光学系の外観

置(ステッパ)に合わせている。

写真2は内蔵する電子光学系の外観である。

技術上の特徴

1. 微細パターン形成能力

LEEPLの微細パターン能力を評価するための実験結果を写真3に示す。

この転写実験では、直径52nmのホールを持つマスクを用いて、直径48nmのレジストパターンを形成できた。

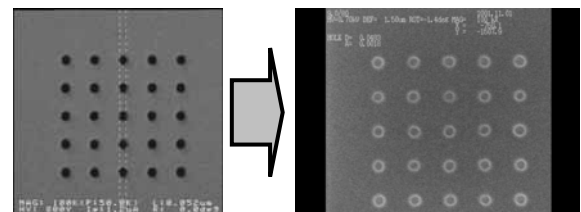


写真3 解像度(微細度)評価結果

図3に、稠密に配置された微細パターンの解像性能を、光リソグラフィと比較した結果を示す。光リソグラフィとしては、最先端技術のArFスキャナーを使用している。LEEPLはArFスキャナーの約1/2の微細パターンが解像している。同図に、この転写に用いたマスクパターン(ホール4個分)を示す。光リソグラフィ用マスクでは、光の回折効果を低減するために、4個の主パターンに加えて32個の補助パターンを必要としている。

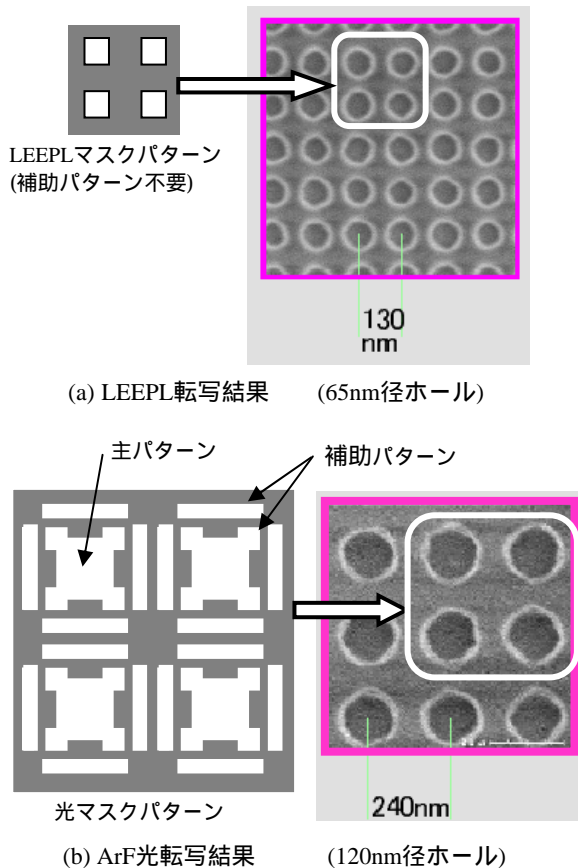


図3 稠密パターン形成能力における LEEPLと光リソグラフィとの比較

2. プロセス余裕度

プロセスの余裕度は、歩留まり向上の観点から半導体生産にとって極めて重要である。

露光マージンの実測結果では、直径90nmのホールで24%と大きな値を得ている。また、焦点深度も、数 μm と十分大きな値を持っている。

3. 位置精度

歪補正偏向器を搭載しているLEEPLは、マスク面を支点にビーム照射角度を垂直から微小に傾けて、パターン転写位置誤差を補正することができる。

光リソグラフィで転写した下地パターンに対して、上記の技術を用いてLEEPLで重ね合せ転写をした結果、(平均+3)値で20.7nm(X)、18.5nm(Y)と極めて高い値を達成している。

4. スループット

LEEPLは多重走査でビーム照射分布を均一化できるため、ビームブラー(ぼけ)に対する制限

が緩和されて、大電流ビームが使用できる。このため、一般にスループットが低い電子ビーム転写(描画)装置の中において、LEEPLは抜群に高いスループットを実現している。

実用上の効果

半導体産業は、巨額の設定投資を行っている。この中で、ステッパ(リソグラフィ装置)の占める割合は一貫して増加しており、2005年には7,000億円に達すると予測されている。

LEEPLは、光が不得意な狭ピッチのコンタクトホール層への適用から始める。

リソグラフィ転写装置の価格急騰に歯止めをかけるために、LEEPL転写機は同世代の光リソグラフィ転写機(ステッパ)の半額以下にすることを目標としている。

この事業が予定通りに進めば、LEEPL用の多層レジスト・プロセス用のレジストと、下層レジスト用エッチング装置の市場創出が見込まれる。等倍マスクの市場も新たに創出される。

工業所有権の状況

LEEPLの基本特許は、米国、独国と日本において成立しており、その専有実施権を(株)リープルが保有している。なお、同特許の発明者は、(株)リープル代表取締役会長の内海孝雄である。

国内出願で公開中の特許は32件、出願中の特許が63件と、国内出願特許の合計は95件である。

むすび

LEEPLは前述のリソグラフィ危機を突破する技術である。この半世紀間、世界の産業の発展は、半導体の発展と歩みを一にしていたことを考えると、LEEPLの適用でリソグラフィ危機を突破できれば、その波及効果には計り知れないものがある。