

98号では半導体微細化のキーとなるリソグラフィについて解像度を規定するレーリーの式から伺える露光装置及びプロセス上のブレークスルーと装置メーカーの経営戦略について論説した。今号では次世代リソグラフィとして期待される EUV 戦略、リソグラフィの要となるレジスト、フォトマスク (以下マスク) のブレークスルー、半導体装置戦略の変遷、革新的製造技術としてのミニマルファブについて論説する。

次世代リソグラフィのブレークスルー

(1) EUV (Extreme Ultraviolet)

EUV は波長 λ を一気に十分の一以下にした次世代リソグラフィの画期的な挑戦と言える。13.5nm の λ を選択した EUV は光を反射する多層膜の反射特性から決定したもので、従来の波長選択とは異なる。EUV に使われるマスクや光学系は従来の透過型ではなく多層 (Si/MoSi) を使った反射型となる。その構造は約 3nm 厚の Mo と約 4nm 厚の Si 膜を交互に 40~50 層積み重ねたもので、各層の境界で僅かに反射される EUV の位相が波長の整数倍になると反射光が互いに干渉して強め合う原理を使う。EUV がマスクから反射した後、6 枚の非球面多層膜ミラーを使った反射型投影光学系で 1/4 に縮小されウエハに転写される新たな方式である。

現状のリソグラフィでは k1 を小さくするために 1 工程でマスク枚数を 4~5 枚使うケースがあるが、EUV では 1 枚マスクで可能となり生産性が大きく向上することになる。課題のスループットは現状 104 枚/時間であるが光源の改良で 2018 年前半までに 125 枚/時間に達する予定である。NA についても現状 0.33 であるが今後 0.55 を視野に入れており、k1 は現状の 0.34 から更なる改善が考えられ 10nm 世代のロジック量産に大きな期待が持たれる。

(2) レジスト

IBM の伊藤洋氏と Grant Wilson 氏による化学増幅型レジストの発明は半導体製造に革新的なプロセスをもたらした。この技術は 1980 年代に発明されたが、実用化は 1993-94 年頃で KrF ステップからである。

化学増幅レジストの原理は、まず露光によってレジス

ト内部に活性種と呼ばれる触媒を発生させ、この触媒がレジスト内部で連鎖的な化学反応を起こすことでわずかな光が当たただけでもレジスト高分子の性質を一気に変化させることができ、KrF 以降の短波長では困難とされたレジストの高感度化が可能となった。前述した EUV や EB (Electron Beam) レジストの高感度化にも影響を与え大きなブレークスルーとして位置付けられる。上記化学増幅型レジストの欠点は活性種として酸が次々と連鎖的に反応をするため感度は上がるが解像度は落ちることである。EUV だと 20nm のプロセスに対しエッジラフネス (露光、レジストプロセスに起因したパターン粗さ) は 2nm に抑える必要がある。この問題解決のためには錫系のメタルを使った分子レジストが次のブレークスルー技術として米国の INPRIA 社とコーネル大学から提案され、その開発が急がれる。

(3) マスク

リソグラフィで用いられるパターンの原版であるマスクは微細化が進むにつれ高度な精度、品質 (低欠陥) が要求される。98号で述べたステップに用いられるレチクル (主に 4 倍マスク) は等倍マスクに比べパターン欠陥、パーティクル欠陥に対して完全性 (ゼロ欠陥) が要求される。技術的ブレークスルーとして登場したのが設計データとレチクルを比較する検査方式 (Die-to-Database) とレチクルを保護するペリクルである。前者は設計データから変換された検査データとマスク光学像との比較検査を行う。実際のマスク光学像は微妙な変形を伴い、その補正処理アルゴリズムは地道なデータの積み重ねで体系化される。後者のペリクルはマスクのパターン面上 (高さ約 10mm) にアルミ合金フレームに形成した防塵対策の保護膜で材料は短波長に対応したフッ素ポリマーや非晶質フッ素樹脂が使われている。EUV に対してはポリシリコン、SiN、カーボンナノチューブなどが検討されている。

VLSI 設計の最終工程である物理設計においてレイアウトパターン情報を作成するが、光学的近接効果が顕著な箇所に関して OPC (Optical Proximity Correction) と呼ばれるツールを用いて図形としての補正を行う。その後 DRC (Design Rule Check) と呼ばれるツールを用いて設計規則違反個所有無の検証を行い、最終的に EB 装置や検査装置の専用形式マスクデータが作成される。

OPCにおいて、マスクデータ量の増加抑制を考慮して最低限必要な補正箇所を見極める必要があるが、そのノウハウが他社との差別化に結びついている。

先端デバイスの微細化とそれに伴うデータ量増加はEB装置に新たなブレークスルーを生んだ。

一つは電子光学系の改良によりEBの加速電圧を10kVから50kVへ高加速化することで大幅に解像度が向上したこと。当然50kVに対する後方散乱補正は装置側でされている。もう一つはEBのマルチビーム化によるスループット向上である。近年の高精度なMEMS技術{アパーチャサイズ(2~4μm)}で512×512本のビームに精度良く振り分けることで露光時間を従来の1/4~1/5に短縮した。また、マルチビーム化と同時にエアベアリングステージ採用も次世代マスクの精度向上に繋がる大きなブレークスルーとして注目したい。

先端マスク設備投資の膨大化に伴い、1990年~2000年にかけて半導体各社は自前のマスクショップCM(Captive Mask-shop)を専用マスクメーカMM(Merchant Mask-shop)へ売却する動きが始まった。投資の効率化を図るための戦略である。ただ、皮肉にも世界の半導体大手3社(Intel、サムスン、TSMC)はCMを維持し、寧ろ強化している。日本の半導体メーカ東芝もDNPとの共同事業として維持していることは興味ある現象である。CMにとって開発設計の機密保持とターンアラウンドタイム(TAT)の短縮は大きい。特に製造工程へのマスクの投入時に技術者間の綿密な仕様の話が効率良く行えることは大きな利点である。半導体市場の約1%のマスク市場規模はCMが60~65%で、残りをDNP、凸版、フォトリソのMM大手3社で分け合う厳しい状況である。しかしながらMMの中にはナノインプリント用マスクに力点を置いた差別化戦略を立てているメーカもある。複数枚のマスク工程が1枚のマスクで行えることや通常の現像工程が省かれ生産工程簡略化によるコストメリットもある。大手半導体メーカとの共同研究で3DNANDやDRAMへの適用を視野に入れているようだ。

半導体装置戦略

絶好調の半導体装置メーカではあるが、非常に特徴ある装置戦略がうかがわれる。嘗てAMATがトータルソリューションを打ちたて装置導入すればどこでも半導体が製造できる戦略であった。しかしながら、先端デバイスではメモリとロジック等デバイスの種類、構造に依存した専用のプロセス技術が必要になってきている。例え

ばエッチングにおいては微細化に伴いアスペクト比(幅に対する深さ)が大きくなりエッチングガスとキャリアガス(不活性ガス)の微妙な制御等のプロセス調整が顧客と装置メーカの間で必要となる。それだけに装置メーカは全てのプロセス装置を扱うことは難しくなっている。

一方で各装置メーカの特徴が発揮できることにもなりデバイスメーカとの共同開発戦略に変化が現れてきている。今後一層の微細化に伴い成膜ではALD(Atomic Layer Deposition)方式やエッチングではALE(Atomic Layer Etching)方式など原子レベルの技術が注目され、装置メーカとデバイスメーカの開発一体化は一層加速するであろう。

平成24年度経済産業省関連予算「革新的製造プロセス技術開発(ミニマルファブ)」の採択を受け2012年度から3年間の国家プロジェクトとして研究開発を実施した。生産規模や装置サイズが1/1000でクリーンルーム不要等の特徴を持ちウエハサイズは0.5インチとしてEB直描を使ったTATの短縮で少量多品種生産を行う。10万個以下の半導体および電子部品を含めた高付加価値製品をターゲットに置き、ミニマルファブの1ラインとして50万個/年の生産規模を想定している。ファブラインをソリューションビジネスとして展開しており従来とは異なった産業構造の変革に成りうるものとして期待される。

まとめ

今号では次世代リソグラフィとしてのEUVを取り上げ、その利点が解像度だけでなく半導体製造工程を簡略化すること、化学増幅型レジストは短波長での感度向上へのソリューションを提供したこと、レチクルの登場は検査や管理の概念を大きく変化させたこと、EBのマルチビーム化が露光時間を短縮させ先端マスクの生産性向上を可能にしたこと、さらに顧客と一体になった共同開発重視の半導体装置戦略、従来とは異なったビジネス戦略としてミニマルファブについて論説した。

次号100号ではデバイスに関するブレークスルーについて論じる予定である。デバイスとして特に次世代不揮発メモリと次世代論理素子を取り上げる。

* * * * *

ご意見を論説委員会 ronsetsu@ssis.or.jp までお寄せください。

論説委員：渡壁弥一郎(委員長)、鈴木五郎(副委員長)、井入正博、川端章夫、長尾繁雄、伏木 薫、市山壽雄(アドバイザー)