

☆ 委員会報告 ☆

論説委員会

半導体のブレークスルー(1)

誕生して70年を迎える半導体は、昨年史上最高の市場規模\$339Billionを記録した。1980年代から微細化をドライブしてきたDRAMはその勢いを維持している。一方、昨年来IoTやAIを背景にNANDフラッシュメモリやGPUなどのロジックが半導体市場を大きく牽引している。微細化の限界が囁かれムーアの法則に陰りが見られてきたと言われているが、メモリでは18nm、ロジックでは14nmから10nmの世界に突入している。

一方、微細化が進む中、東芝の64層3D-NANDやサムスンのVertical NAND(V-NAND)に見られる縦方向のチップ構成で新たな技術が市場を創出している。この様な状況の中、半導体成長を支えてきたブレークスルーを技術的、ビジネス的側面から取り上げ、そこから見える今後のブレークスルーの展望について論じることにする。半導体プロセス、その関連装置、次世代メモリ、スピントロニクス等のデバイス、設計、ミニマルファブやビジネスモデルなどのテーマを4回に分けて論説していく予定である。今回と次回は半導体プロセスの根幹であるリソグラフィ及びその関連する技術のブレークスルーについて論説する。

リソグラフィ分野におけるブレークスルー

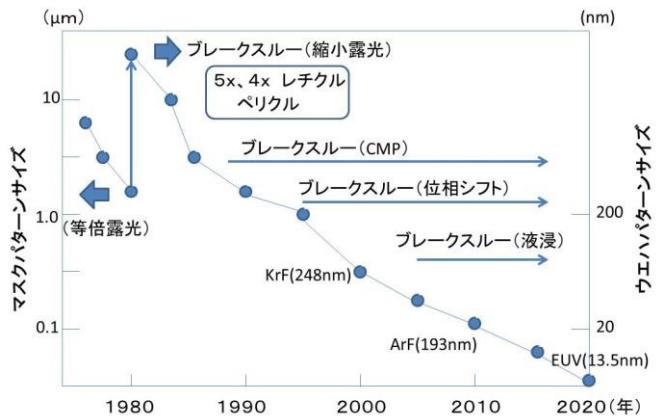
露光装置の性能を表す以下のレーリー(Rayleigh)式から伺える幾つかのブレークスルーを見てみよう。

$$R = k_1 (\lambda / NA) \quad DOF = k_2 [\lambda / (NA)^2]$$

ここで、Rは解像度(小さな値が良い)、DOFは焦点深度(大きな値が良い)、 k_1 と k_2 はプロセスパラメータで様々な要因で決まる定数、 λ は光源波長、NAは実効的なレンズ性能である開口数(numerical aperture)を表す。

70年代初頭、露光装置の技術的限界が2~3μmと言われていた。当時 k_1 はプロセス技術の未成熟さと経験則として $k_1=1$ と信じられ、RとDOFとのトレードオフからNAは0.167が限界であると考えられていた。この前提から、当時安定光源として水銀ランプの輝線スペクトルとしてのg線(436nm)、i線(365nm)を考えれば2μm前後がRの限界になる。そのためRをあげるためにλを短くすることが必要となり、X線、電子ビームに注目が集まった。 λ に着目したX線、電子ビーム技術はプロセス、装置等多くの技術課題を解決する必要があり特にX線はマスク、電子ビームはスループットと言うハードルが立ちはだかった。

一方、従来の光露光技術は k_1 を小さくすること、NAを大きくすることへのあくなき追求が行われていた。下図は、パターンサイズとブレークスルーの時系列な変化を表す。



(1) NAを大きくするブレークスルー

縮小露光方式(ステッパー)の概念はまさに発想の転換であった。これまでの露光装置は等倍でウェハ全面に一括露光する方式でその平面度の問題でDOFを十分とする必要があった。縮小露光方式は小さな領域を露光する分割露光でDOFの問題も軽減することができ高NA化が可能となったのである。当然ウェハの大口径化に依存しない非常に理にかなった露光方式と言える。この方式は1976年開始した官民共同プロジェクト「超LSI技術研究組合」の研究成果として知られている。さらに走査型縮小投影露光方式(スキャナ)を使うと露光領域がスリットでスキャンするため一層小さくて済むことになる。このことによりDOFの制約は大きく緩和されて高NA化が可能となり、現在に至っている。

もう一つのブレークスルーとして屈折率(n)を変える液浸技術がある。顕微鏡の世界では教科書にも載っている当たり前の手法でレンズと基板の間に水を挟んで顕微鏡の解像度を上げるという手法である。これを機械的に、しかも高速に動かして転写していくという大胆な手法を生産現場に適用したのである。このことにより、前記したNAの値が1.3 (NA=nsinθ:水の場合; 屈折率n=1.44)になり、これだけでRは約1桁改善し20nmへの道が開けたのである。

(2) k_1 を小さくするブレークスルー

k_1 を小さくするために化学增幅型レジストに代表されるように高感度、高解像度レジスト開発や塗布、現像、

ベーキング等プロセス開発、さらに露光装置の照明系、レチクル光情報を利用した位相シフト技術等超解像技術により k_1 の理論上の限界値 0.25 に近づいている。超解像と呼ばれる各種の手法としての輪帶照明、分割照明(四開口照明；四重極照明)などの変形照明は、レチクルに垂直に入射させていた光を、少し斜めから入射させることにより R と DOF を向上させたものである。位相シフト技術は光強度情報と位相情報を併用することにより、 R を格段に向上させた。 X 線リソグラフィで登場したハーフトーンの概念(米国 MIT)は、光リソグラフィの中で大きく開花し、材料面でも決して目新しいものではない MoSi のマスク材料への実用化に繋がった(三菱電機)。その登場は、解像度、生産性において非常に有用な技術として成功したのである。

ここで忘れてはならないプロセス技術のブレークスルーがある。CMP(Chemical Mechanical Polishing、米国 IBM)技術である。半導体プロセスの工程が進む中でウェハ表面の凹凸が大きくなり、ますます微細化する半導体プロセスのネックになっていた。表面を平らにする PSG 等の材料やアニール等工程に工夫がされたものの、画期的な改善がなされなかつた。そこで登場したのが 1970 年前半から Si ウェハをミラー・ポリッシュするのに使われていた CMP 技術がウェハ平坦化を促進したのである。1980 年当時、CMP は汚染管理が難しく邪道と呼ばれていたが、パッド寿命、スラリー効率化、装置メーカーと顧客の高信頼性情報の共有化、などにより技術が大きく進歩し、DOF を大きく改善させた。結果として k_1 は 70 年代の 1 と信じられていた時代から約 1/4 に低減し、更に光近接効果を軽減するためのダブルパターニング、ダブル露光を使えば k_1 は実用レベルで 0.13 まで小さくなっている。

露光装置をリードする ASML の戦略

優れた光学技術と精密機械技術で露光装置の 70-75% 占めていた日本の露光装置メーカーは 90 年後半に劇的な変化が現れた。ASML(オランダ)の出現である。大きなブレークスルーは露光装置のモジュール化つまりステージ、照明系、投影レンズ、アラインメント系、搬送系等の基幹ユニットに分解する考えである。光源が変化しても(i 線から ArF 液浸まで)できるだけ共通の基幹ユニットを長く使うことができる。長期的にアップグレード可能なマシンを提供することにより稼働率や徹底したスループット向上(ツインステージ採用)を目指したデバイスメーカーへの満足度を高め、投資効率を飛躍的に高めること

を狙った起死回生の製品戦略であった。勿論 ASML の戦略はそれだけではない。1984 年にフィリップス社から独立し、2001 年米国最大手で反射光学系の技術を有する SVG 社(Silicon Valley Group Lithography)を買収し急速に勢いを伸ばし、近年においても、独光学機器大手カールツァイスの子会社カールツァイス SMT への出資、台湾の半導体検査装置大手、漢民微測科技(エルメス・マイクロビジョン)を買収した。研究開発では IMEC(ベルギー)と ASML 連合体を構成するフィリップスとの間には長期に亘る戦略的 R&D 排他契約が結ばれ半導体デバイスのライフサイクル短期化、Time to Market に対応する柔軟な経営姿勢が伺える。経済学者中馬宏之一橋大学名誉教授による「機能別モジュール化による安価な NC 旋盤の実現で世界市場を席巻した日本工作機械産業と ASML のモジュール化戦略の比較論評」は実に興味深い。その中でモジュール化だけではない別の戦略の必要性も示唆している。

まとめ

今回微細化のキーとなるリソグラフィについてレーリーの式からうかがえる技術的側面からみたブレークスルーと ASML の巧みな経営戦略を論じた。前述したステッパー、CMP 等は過去の経験則から自らを狭めることなく挑戦した成果ではないだろうか。今後の展開として波長 λ を 13.5 nm に選択した EUV(Extreme ultraviolet) 露光への挑戦は更なる微細化に期待が持たれる。R 向上のために NA、 k_1 の改善をはかるには幾つかの課題はあるがそれを克服するためのブレークスルーは今後も続くであろう。

一方で微細化のみならず生産性、市場性、チップ構成からみた半導体ビジネス戦略は重要である。例えば 3D-NAND(現状 64 層)や TSV(Through Silicon Via、東芝)を多用してプロセッサチップ上にメモリチップを重ね置きする 3D-LSI などのプロセス技術は新たなブレークスルーが必要となっている。

次号 99 号では引き続き半導体プロセス特にリソグラフィとそれに関するフォトマスク、レジスト等のブレークスルーと今後の展望について論じる予定である。

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

論説委員会

委員長 渡壁弥一郎 副委員長 鈴木五郎

委員 井入正博 川端章夫 長尾繁雄 伏木 薫

アドバイザー 市山壽雄 吉澤六朗