45 nm 世代以降のリソグラフィ技術*

Lithography Technology since 45 nm Generation

今井基勝**

Motokatsu IMAI

Key words

immersion lithography, resolution, overlay, throughput, RET (Resolution Enhancement Technology), DP (Double Patterning), SW (Side Wall), EUV (Extreme Ultra Violet)

1. はじめに

リソグラフィ技術は光の短波長化をベースにして微細化を推進してきた。しかし i 線 (365 nm), KrF エキシマレーザー (248 nm), ArF エキシマレーザー (193 nm) と続いた短波長化の流れは F₂ レーザー (157 nm) の複屈折問題などによる実質上の開発休止に象徴されるように不透明な状態になっている。

それに対し、投影レンズの開口数 (NA) を高くすることで解像度を高める試みも行われており、その一つに液浸露光技術がある。

しかし、液浸技術はレンズの非球面化によって NA を高めるような技術とは異なり、光の通過する媒質を大気から液体へと屈折率を変えてしまうのであるから、見方を変えればこれも短波長化による微細化といえなくもない。

2006 年には NA が 1 を超える本格的な液浸露光装置が量産機として半導体メーカーに納入され始めた。この装置は ArF ドライ露光装置の標準的な量産の限界解像度である 65 nm 以降の微細化、特に 55 nm NAND フラッシュメモリや 45 nm ノードのロジックの本格的な量産を可能にした。さらに 2007 年では NA = 1.30 の液浸露光装置の出現により、45 nm 世代のリソグラフィ技術が現実のものとなった。

2. 45 nm 世代の露光技術

ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) をウェブサイトで検索すると、2006 年改訂版のロードマップを見ることができる。そこには 45

nm のソリューションとして

- 45 nm
 - 193 nm immersion with water
 - 193 nm immersion double patterning
 - 193 nm immersion with other fluids
 - EUV, ML2

と記載されている。

純水の液浸、ダブルパターンニング、高屈折液浸、EUV、マスクレスの 5 つが候補としてあげられているが、現状の他の露光装置の進捗状況を見ると 45 nm 世代は純水を使用した液浸露光装置でほぼ決定したと考えられる。

2.1 液浸露光技術

液浸露光技術とは、投影レンズの最下面とウエハとの間に液体を入れることで、解像度および焦点深度を向上させる技術である。この原理は顕微鏡などでは油を入れた油浸技術として従来から用いられており、特に目新しいものではない。しかし、固定された対象物を観察する顕微鏡とは異なり、液浸露光装置はウエハが動くのが特徴である。

液体を入れると解像度が向上する理由を図 1 に示す。図 1 からわかるとおり、NA = 1.0 以上になるとレンズで全反射を起こして大気中に光が通らなくなる。これに対し、液体をレンズとウエハの間に入れると、液体の屈折率が空気より高いため NA = 1.0 を超えても光が通るようになる。

一般に露光装置の解像度は、

$$R = k_1 \times \lambda / NA \quad (1)$$

図 1 液浸のメリット

*原稿受付 平成 20 年 2 月 20 日

** (株) ニコン (埼玉県熊谷市御綾威ヶ原 201-9)

今井基勝

1982 年中央大学理工学部精密機械工学科卒。同年日本光学工業(株)、現(株)ニコンに入社。アブソリュートエンコーダの開発、半導体露光機のステージ、液浸ノズルの開発を経て現在に至る。

図2 斜め照明による結像

で表される。ここで、 R は解像度、 k_1 はプロセスファクター、 λ は露光波長、 NA は投影レンズの開口数である。式(1)より、 λ が短く、 NA が大きいほど高い解像度が得られることがわかる。ここで NA は、 $NA = n \times \sin \theta$ で与えられ、 n は露光光が通過する媒質の屈折率、 θ は露光光と光軸が形成する最大角である。従来の露光は大気中で行われるので、 $n=1$ となる。これに対し液浸露光では、 n が1よりも大きな液体中で行われるので、同一の露光光の入射角 θ では解像度を $1/n$ に向上することができる。純水を用いた場合の屈折率は $n=1.44$ である。

そのため、露光光源に ArF エキシマレーザーを用いた露光では波長を $193 \text{ nm}/1.44$ の 134 nm に短縮させた効果を得ることができる。これが見方を変えれば液浸も短波長化による微細化といえる理由である。

また、プロセスファクターは一般に半導体メーカのプロセスに対する余裕度、レジスト材料の解像度や制御性と考えられている。そのため k_1 はデバイスの種類によって異なり、メモリーでは $k_1 > 0.3 \sim 0.35$ 、ロジックでは $k_1 > 0.35 \sim 0.4$ 程度と考えられている。

メモリーの $k_1 = 0.3$ だと、式(1)より $45 \text{ nm} = 0.3 \times 193 / 1.28$ となり、45 nm 世代の液浸露光装置には $NA = 1.28$ 以上が必要であることがわかる。

ロジックの場合、45 nm ノードというようにノードという表現が慣用的に使われている。この45 nm ノードとは最小線幅では一つ前の世代、65 nm である場合が多い。そのため $k_1 = 0.35$ を用いると、 $65 \text{ nm} = 0.35 \times 193 / 1.04$ となりロジックでは $NA = 1.04$ 以上が45 nm (ノード) 世代に適合しているといえる。

かたや露光装置側から見るとプロセスファクターは照明系最適化ファクター (RET ファクター: Resolution Enhancement Technology Factor) と言い換えた方が適切かもしれない。

図2に示すような理想的な照明系からの2光束干渉系を考えた場合、

図3 液浸ノズルの原理図

液浸のメリット：屈折率： n の向上
 $NA = n \sin \theta$
 ・解像度 (Resolution) の向上
 $R = k_1 \lambda / NA$
 $= k_1 \lambda / n \sin \theta$
 $= k_1 (\lambda / n) / \sin \theta$
 焦点深度 (DOF) の向上
 $DOF = k_2 n \lambda / NA^2$

$$P \times (\sin -\phi + \sin \theta) = n\lambda \quad (2)$$

P はレチクル上に描かれた線幅のピッチ、 n は整数（この場合は1とする）である。

理想的な照明系として $-\phi = \theta$ であるので、

$$P = \lambda / 2 \sin \theta$$

$NA = \sin \theta$ とすると、 $P = \lambda / 2 NA$ 、 $NA = \lambda / 2 P$ また $R = P / 2$ であるのでこれを(1)に代入すると、

$$R = k_1 \times \lambda / NA \text{ より、}$$

$$P / 2 = k_1 \times \lambda / \lambda / 2 P$$

$$k_1 = 1/4 = 0.25 \quad (3)$$

このように露光装置側からのプロセスファクター k_1 は0.25が理論的な限界となり、これ以上 k_1 値を低くすることはできない。

2.1.1 液浸露光装置のキーテクノロジー

2.1節で記載したように、液浸露光技術とは投影レンズの最下面とウエハとの間に液体を入れることである。そのため液浸に関わる3つの要素技術がキーテクノロジーとなる。

(1) ノズル技術

ノズルは液体を保持するためのユニットであり、液浸露光機では投影レンズの最下面とウエハの露光部分だけに液体を充填するローカルフィルノズルと呼ばれる方式を用いている。図3にローカルフィルノズルの原理図を示す。

ノズルの開発ポイントは

1. ディフェクトが無い（少ない）こと。
2. 汚染に強いこと。
3. プロセスへの制約が少ないこと。

である。

そのためノズルはウエハとの距離、ワーキングディスタンス (WD) を広く、またできるだけ安定した液体を止めずに大量に流し続けることが重要である。これによりディフェクトや汚染、特にケミカルな汚染から露光装置やウエハを守ることができる。また、バブルによるディフェクトを防ぐためにノズル部とウエハとの間にある液体はできるだけ静粛な環境が望ましく、さらに広くプロセス条件が選択できるように、例えばトップコートレスレジストのような撥水性の高い材料などを使用したい場合にもノズル内の液体の静粛性が必須である。

液体に純水を用いた場合にはさらに気化熱の問題も重要である。ノズルからの飛沫（ドロップレット）で生じる気化熱によるウエハ歪みを防ぐためにもノズル内の液体の静

図4 液浸用ステージシステム

粛性が望まれる。

(2) ステージ技術

ステージの開発ポイントは重ね合わせ（オーバーレイ）とスループットであり，そのためには専用のステージ開発が必要である。図4に液浸用に開発されたステージシステムの概略図を示す。

このステージシステム（Tandem Stage System）は目的の異なる2つのステージ，露光ステージとキャリブレーションステージから構成されており，露光ステージがウエハを交換するときにキャリブレーションステージが協調した動作（スクラムスイープ）でノズルの下に入ることにより液体を流し続け，かつ投影レンズのキャリブレーションを行うことができる。これによりスループットが低下することなく，またウエハ交換ごとにキャリブレーションが行えるため，重ね合わせの精度向上が期待できる。

特に最近ではデバイスの微細化により，さらなる重ね合わせの向上が求められている。そのためウエハホルダの形状（フィンガープリント）まで考慮の対象となっている。これには単純に2つのステージを並べたシステムは相互のホルダの形状が異なるため対応が難しい。それに対して図4のステージシステムは1つのホルダで構成されているため，フィンガープリントの問題はない。さらにこの露光ステージはセンサーケーブルなどからの外乱が無くシンプルのため，制御性が向上するメリットもある。

(3) 投影レンズ

レンズとウエハの間に液体を入れることで $NA=1$ を超えても光が通るようになるが，図1の左右のレンズを見比べてみると NA を大きくするためにはそれを取り込むためのレンズも大きくしなければならないことがわかる。レンズ径の物理的な限界，クリーンルームの高さなどを考慮すると全屈折系の投影レンズで $NA=1.07$ 程度が限界であり，それ以上の NA を求める場合は光路をミラーで折り曲げた反射屈折系の投影レンズが必要となる。

図5はそれぞれの光学設計のイメージである。反射屈折系の投影レンズの場合は3枚の球面，平面ミラーを用いたマルチアキシャルタイプと4枚の非球面ミラーを用いたシングルアキシャルタイプが代表的である。どちらにもメ

図5 液浸用投影レンズのイメージ図

リットデメリットがあり，その選択は設計思想による。

フレアー，ミラー加工の安定度を考慮するとマルチアキシャルタイプ，振動による光軸のぶれを懸念する場合はシングルアキシャルタイプを選択していると考えられる。

投影レンズの開発のポイントは光学設計だけの検討ではなく振動が心配ならば機械設計と事前検討を行って懸念事項を取り除くなどのコラボレーションを充分に行うことである。光学設計は純粋に光学の観点から最適だと考えられる投影レンズを選択することが重要である。

3. 32 nm 世代の露光技術

前出の ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors)，2006 年改訂版によると，32 nm のソリューションは

- 32 nm
 - EUV
 - 193 nm immersion double patterning
 - 193 nm immersion with other fluids and lens materials
 - ML2, Imprint

となっている。

それに対して2007年の後半から半導体メーカを始め，多くのエンジニアが32 nmへのソリューションを明確にし始めている。

メモリー関係は32 nm世代を純水による液浸露光装置のダブルパターンニングで行う。

ロジック関係は特殊照明系（RET）を駆使し，レチクルデザイン，デバイス設計の最適化を徹底して行うことで，32 nmノードを純水による液浸露光装置のシングル露光で行う。これがトレンドとなっている。

2回露光することによる生産工程の増大などの問題はあまるものの目前に迫っている32 nm世代に対して他の選択肢の無いことがダブルパターンニングになった一番の要因であると考えられる。しかしこれにより純水による液浸露光装置は一代延命できたともいえるし，これを次世代に

図6 ダブルパターンニングの例

つなぐブリッジツールとして割り切って考えている場合もある。

3.1 ダブルパターンニング

ダブルパターンニングも特に新しい技術ではなく、その考え方は古くからあった。図6にダブルパターンニングの代表的な手法を示す。

左側のDE (Double Exposure) とは非線形のレジスト材料を用いてレチクル交換だけを行って2回露光するものである。原理的にはこれが一番簡単だが、非線形のレジスト材料 (マジックマテリアル) が存在していないため現実的ではない。

中央の最初の露光後にエッチングを行い、また露光する、DP (Double Patterning) が一番知られたダブルパターンニングの手法である。

この手法は一度露光したウエハをステージから取り出すため、製造工程の増加によるコストアップとそれぞれの露光間の精度が課題である。

露光装置にはコスト低減、精度向上のためにスループットと重ね合わせの精度向上が求められている。

右側のSW (Side Wall) は露光後のパターンに対して蒸着とエッチングを行う、いわゆる側壁を残す手法である。

この手法は露光が一度だけなので、露光装置側への負担は少ないが複雑なパターンの作成が難しいため、よりデバイス設計の負荷増大、DP 以上のコストアップが課題である。しかしメモリー関係ではこのSW と DP を組み合わせて32 nm 世代に対応することが予想される。

本来は中央のDP だけをダブルパターンニングと呼ぶべきなのだろうが、一般には図6の3つ、特に右側の2つをダブルパターンニングと呼ぶことが多い。

また、ダブルパターンニングは一度の露光で線幅のピッ

図7 DP で求められる重ね合わせの精度

チ、例えば32 nm 場合、その2倍の64 nm と同等の解像度で済む。そのため前出のプロセスファクター k_1 が1/2となった ($k_1=0.3$ から0.15) という言い方をすることもある。

図7～9に露光装置に求められる重ね合わせの精度見積りを示す。ダブルパターンニングの手法によっても重ね合わせの精度見積りは変わってくるが、これは線幅と隙間を1:3の関係で設計した場合のものである。

線幅均一性 (ΔCD_{line}), 線幅平均値 (L), 重ね合わせのばらつき (ΔOVL), 重ね合わせのオフセット ($\bar{m}_{overlay}$) とすると、重ね合わせ (Overlay) は隙間 (Space) への影響が大きく、それは次の式(4)で表される。

$$\Delta CD_{space} = \sqrt{(\Delta CD_{line1}/2)^2 + (\Delta CD_{line2}/2)^2 + \{3(\bar{m}_{overlay})\}^2 + (\Delta OVL)^2} \quad (4)$$

図 8 DP で求められる重ね合わせの精度

図 9 DP で求められる重ね合わせの精度

図 10 EUV の露光結果

式(4)より重ね合わせは従来の $\bar{m}_{\text{overlay}} + \Delta\text{OVL} (m + 3\sigma)$ が $\bar{m}_{\text{overlay}}^2 + \Delta\text{OVL}^2 (9m^2 + (3\sigma)^2)$ に影響が増大していることがわかる。これを 32 nm の精度に振り分けると図 7~9 のように重ね合わせのオフセット値 ($\bar{m}_{\text{overlay}}$) が 0.6 nm, ばらつき (ΔOVL) で 2 nm, トータルの重ね合わせへの要求が $\bar{m}_{\text{overlay}} + \Delta\text{OVL} (m + 3\sigma)$ で 2.6 nm となる。

この 2.6 nm がダブルパターンニングを用いた場合の 32 nm 世代に対する露光装置の重ね合わせの精度への具体的な要求値と考えられる。

4. 22 nm 世代以降の露光技術

ITRS (International Technology Roadmap for

図 11 EUV1 全景

Semiconductors), 2006 年改訂版を再度用いると, 22 nm 世代以降のソリューションは

- 22 nm
 - EUV
 - Innovative 193 nm immersion
 - ML2, imprint, innovative technology
- 16 nm
 - Innovative technology
 - Innovative EUV, ML2, imprint

となっている。

革新的 (Innovative) が何を意味するのか, よくわからないが何らかの新しい技術, または従来の技術の巧みな応用を期待しているのだと思われる。確かに液浸露光技術も 2003 年度の ITRS に突然登場して瞬く間に主流となっているのであるから, 今後もそのようなことが起こっても不思議ではない。

4.1 EUV 技術

NGL (Next Generation Lithography) と呼ばれている中で現在 EUV がもっとも次の露光技術に近く, かつ勢いのある方式である。これは液浸のダブルパターンニングで細かいピッチの線を作ることではできてもコンタクトホールができないことから EUV に期待が集まっているためである。

EUV は光源の波長が 13.5 nm であり, まさに光の短波長化というリソグラフィ技術の微細化の王道を歩んでいる。

図 10 は光源からの光がウエハ上に達している写真を示す。このように開発は精力的に進められており, 2009~2010 年には EUV の量産装置が半導体メーカに納品されるのではないかとわれている。

しかし課題がないわけではない。現在の課題は極端紫外線 (EUV) という光がガラスや大気中を通らないため, レンズはすべてミラーで構成され, かつ装置内部が真空構造になること。これにより図 11 に示すように構造が複雑, 大型化する。

また光源自体の高出力化, 高寿命化が難しく, 現在 DPP (Discharge Produced Plasma), LPP (Laser Produced Plasma) などが光源として開発中であるが半導

18 Lithography

Notes: RET and lithography friendly design rules will be used with all optical lithography solutions, including with immersion; therefore, they are not explicitly noted.

Figure 67 Lithography Exposure Tool Potential Solutions - IS

図 12 リソグラフィのロードマップ (2006 年度 ITRS 改訂版より)

体の量産ベースに見合うだけの性能がまだ得られていないことがある。さらに工場の用力も大がかりな設備を必要とする可能性が高いなど露光装置側の課題だけでもかなりのテーマがある。

EUV 露光装置に求められている課題をまとめると、半導体メーカーが使うために必要な生産性、光源などの部品の寿命も含めた CoO (Cost of Ownership) を満たすことである。

4.2 光屈折液浸露光技術

液浸露光技術の急速な開発進捗の要因に多くの既存技術をそのまま用いることができたことが挙げられる。

前項の「2.1.1 液浸露光装置のキーテクノロジー」で液浸の 3 つのキーテクノロジーを紹介したが、逆にいえばその 3 つの技術を開発して既存の装置と組み合わせれば液浸露光装置が完成するわけである。

高屈折液浸露光装置もその延長線上にある。45 nm 世代の液体には純水が用いられているがその屈折率 $n = 1.44$ を上回る液体を用いることで NA ($NA = n \times \sin \theta$) を高めることができる。

ただし、そのためには高屈折液体、それに見合う高屈折ガラスの材料の開発を行う必要がある。材料の開発にはそれなりの時間がかかるため、高屈折液浸露光技術の課題は材料開発のタイミング、時間との戦いだと考えられる。

逆にそれ以外の部分は既に開発できているため、高屈折液浸露光装置を望む半導体メーカーの研究者も多い。

4. お わ り に

ITRS のロードマップを図 12 に示す。これによるとフラッシュメモリーの 45 nm の生産は 2009 年ごろから、32

nm の生産は 2012 年ごろから始まると考えられる。実際のプロセス開発はそれよりも 2 年程度早いいため、露光装置はそれに合わせて装置を供給する必要がある。45 nm 用の $NA = 1.30$ の液浸露光装置は 2007 年に出荷が始まっている。32 nm 用のダブルパターンニング対応の液浸露光装置は重ね合わせの精度 2.6 nm、コスト低減のためによりスループットを高くした装置が 2010 年には必要とされるだろう。

基本的に露光装置には解像度 (Resolution)、精度 (Overlay)、生産性 (Throughput) の 3 つが大きな要素として求められる。その 3 つに時間軸を足し合わせて考えると、22 nm 世代以降は EUV がもっとも近いが生産性にまだ不確実な要素が多い。

高屈折液浸技術は要求されている時期に間に合わない可能性が高い。

22 nm 世代以降の微細化でクリティカルな課題はコンタクトホールを生産性良く作る技術である。この課題を解決できる技術が明確になれば、それを用いた露光装置が本命である。

本文をまとめるにあたり、(株)ニコンの馬込伸貴フェロー、大和壮一フェロー、蛭川茂氏には大変お世話になりました。ここに謹んで御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) ITRS : http://www.itrs.net/Links/2006Update/FinalToPost/08_Lithography2006Update.pdf
- 2) 大和壮一：45 nm 以降を狙う液浸露光装置戦略、「セミコンジャパン 2005 特集」、半導体産業新聞。