

第7章 WG5 リソグラフィ

7-1 はじめに

2006 年度の WG5(リソグラフィ WG)の主な活動は、国際活動として国際半導体ロードマップ ITRS の改訂に合わせ、技術世代に対応した解決策候補(Potential Solutions)の議論と絞込みを行ない、各種テーブルの見直しを行った。また、CD ばらつきやマスク技術に関する調査等の国内活動を行った。本報告では ITRS2006 Update の主な改訂内容について報告すると共に、解決策候補として取り上げられた主な露光技術について現状と課題についてまとめる。

ITRS2006 Update 版ではリソグラフィに大きな影響を与える技術世代およびそのタイミングの変更は無く、2005 年版を引き継いでいる。図表 7-1 に 2006 Update 版におけるリソグラフィへの要求を示す。技術世代の進展に対応した要求は厳しく 2007 年の 65nm ハーフピッチにおいても既に CD(Critical Dimension)バラツキに対する要求がゲート、マスクの両方において「赤」のカラーリングとなっている。また 2010 年の 45nm ハーフピッチ以降はほとんどの項目が「赤」となり、リソグラフィ技術は依然大きな問題を抱えている。

本命技術である ArF 液浸露光の装置も数多く出荷され、いよいよ Hyper NA の時代が始まろうとしている。しかし 45nm ハーフピッチ以降では、それを実現する露光技術自体にいろいろな課題を抱えており、技術選択も困難な状況が続いている。

Year of Production	2006	2007	2010	2013	2016	2019
DRAM ½ pitch (nm) (contacted)	70	65	45	32	22	16
DRAM ½ pitch (nm)	70	65	45	32	22	16
Flash ½ pitch (nm) (un-contacted poly)	64	57	40	28	20	14
Contact in resist (nm)	79	70	50	35	25	18
Contact after etch (nm)	72	64	45	32	23	16
Overlay [A] (3 sigma) (nm)	13	11	8	5.7	4	2.8
CD control (3 sigma) (nm) [B]	7.4	6.6	4.7	3.3	2.3	1.7
MPU gate in resist (nm)	48	42	30	21	15	11
Contact in resist (nm)	97	84	56	39	28	20
Contact after etch (nm)	88	77	51	36	25	18
Gate CD control (3 sigma) (nm) [B] **	2.9	2.6	1.9	1.3	0.9	0.7
Mask CD uniformity (nm, 3 sigma) isolated lines (MPU gates), binary or attenuated phase shift mask [H] *	3.4	2.6	1.3	1	0.7	0.5
Mask Image placement (nm, multipoint) [F]	8	7	4.8	3.4	2.2	1.5
Mask Image placement (nm, multipoint) for double patterning	5.7	4.9	3.4	2.4	1.6	1.1
Low frequency line width roughness: (nm, 3 sigma) <8% of CD *****	3.8	3.4	2.4	1.7	1.2	0.8

図表 7-1 ITRS2006 update におけるリソグラフィへの要求

7-2 ITRS2005 の主な改訂内容

ITRS2006 update 版では主に解決策候補の見直しとそれに伴うダブルパターニングに関する項目追加、さらにカラーリングの見直しが行われた。

● 解決策候補の見直し

リソグラフィのロードマップの中で最も注目される解決策候補の見直しを 2005 年度に引き続き行なった。選定の基準は 2004 年度に定められたものを踏襲しており変更は無い。

➤ 全てのインフラ(マスク、露光ツール、レジスト等)が相当するノードに対し準備されていること。

- ◇ α -Tool 及びそのインフラが3 年前に準備されること。
- ◇ β -Tool 及びそのインフラが2 年前に準備されること。
- ◇ 量産装置及びそのインフラが量産開始の1 年前に準備できる見通しであること。
- 少なくとも二つ以上のリージョンのIC メーカーが生産に使用することを計画していること。
- N+3 以降のノードではこの限りではない。
- 解決策候補として記載されるのは、最先端のクリティカル層に対応するテクノロジーであること。
- 対応する露光ツールが世界で100 台以上使われる見通しであること。

以上の定義は多量生産をターゲットにしたものであることから、多品種少量生産に対する解決策候補が必要との意見もあり、2006 Update 版ではマスクレスリソグラフィ(ML2)に関するテーブルが追加されたが、データ量とグリッドサイズに関する項目だけであり、今後のさらに議論が必要であろう。

解決策候補の主な改訂内容は、ArF 液浸露光技術に対するオプション技術を明確にし、ダブルパターニング技術を取り上げたこと、EUV 露光技術を含めた候補順位の見直しをおこなったことである。特に注目される 45nm、32nm 世代について、図表 7-2 に解決策候補を示す。45nm/32nm の両世代において第二候補として ArF 液浸露光技術(193i)を用いたダブルパターニング技術が取り上げられた。22nm/ 16nm については ML2 と imprint の順位が換わった以外に 2005 年版からの変更は無い。

解決策候補については 7-4 節にて技術内容を含め詳細に報告する。

	45nm	32nm
1	193i/H2O	EUV
2	193i double patterning	193i double patterning
3	193i with other fluids	193i with other fluids and lens materials
4	EUV, ML2	ML2, Imprint

図表 7-2 45nm/32nm 世代の解決策候補

● 困難な課題(Difficult Challenges)の見直し

2006 年版では解決策候補としてダブルパターニング技術が明確に示された。これに対応し困難な課題にダブルパターニング技術に関する項目が追加された(図表 7-3)。重ね合せ、パターン分割、コストという三大課題に加え、ダブル露光(DE)で効果を出すためのレジスト材料、レチクルとウェハの搬送が増加することに対する工場内ロジステックが課題として挙げられた。

ADD	<u>Double patterning</u>	<p><u>Overlay of multiple exposures including mask image placement</u></p> <p><u>Availability of software to split the pattern apply OPC, and verify the quality of the split while preserving critical features and maintaining no more than two exposures for arbitrary designs</u></p> <p><u>Availability of high productivity scanner, track, and process to maintain low cost-of-ownership</u></p> <p><u>Photoresists with independent exposure of multiple passes</u></p> <p><u>Fab logistics and process control to enable low cycle time impact that include on-time availability of additional reticles and efficient scheduling of multiple exposure passes</u></p>

図表 7-3 ダブルパターニングに関する困難な課題

● マスク関連テーブルの改訂

ITRS2006Update においては、解決策候補に Double Exposure/Double Patterning が挙げられたことから、Optical Mask Table の一部改訂が議論された。結果として、図表7-4 が提案されている。

Year of Production	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	80	70	65	57	50	45	40	35	32	28	25	22
MEEF isolated lines, binary or attenuated phase shift mask [G]	1.4	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
CD uniformity (nm, 3 sigma) isolated lines (MPU gates), binary or attenuated phase shift mask [H]	3.8	3.4	2.6	2.1	1.7	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7
MEF contacts [G]	3	3	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CD uniformity (nm, 3 sigma), contact/vias [K]	4.7	4.0	3.0	2.4	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3	1.3	1.2	1.0
Image placement (nm, multi-point) [F]	9	8.0	7.0	6.1	5.4	4.8	4.3	3.8	3.4	3.0	2.7	2.4
Image placement (nm, multipoint) for double patterning	6.4	5.7	4.9	4.3	3.8	3.4	3	2.7	2.4	1.9	1.7	1.6
CD mean to target (nm) [M]	6.4	5.6	5.2	4.6	4.0	3.6	3.2	2.8	2.6	2.2	2.0	1.8
Difference on CD Mean-to-target for two masks used as a double patterning set (nm)	3.2	2.8	2.6	2.3	2	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	1	0.9

図表 7-4 Mask Table からの抜粋

DE/DP 露光技術の採用に対して、Single Exposure の精度と同等レベルをキープすることを目的として、分割された 2 枚のマスク間のパターン位置精度 (Image placement)、および寸法精度 (CD Mean-to-target) が見直され、パターン位置精度については従来の $1/\sqrt{2}$ 、寸法精度に対しては中心値の制御を従来の $1/2$ 、の値としている。

これに伴って Coloring も見直され、パターン位置精度については 6nm 以下の位置精度を得ることは困難であり、現時点で解が無い (Red) となっている。これは、パターン描画装置の精度制御性に加え、パターン位置精度計測の精度についても、その改善が急務であることを示している。

また、寸法精度に関しては、2nm 以下の精度要求に対して、露光時種々の補正を考慮しても既存技術の延長線上では実現は困難としている。一方で、マスク製造の観点からは、マスク分割によってそれぞれのマスクでのパターン密度は軽減できることから、むしろ寸法精度が改善できる可能性も探る必要がある。

一方で、パターンを分割するためのソフトウェア、分割後のパターンへの OPC 付与、最終的なマスク描画パターンの検証、などがマスク描画データ処理の新たな課題として提起されることになる。このパターン分割によるマスク製造や前記の検証を容易に行うためには、パターン分割を前提とした DFM (Design For Manufacturability、製造容易性を考慮した設計手法) への取り組みと早期の実用化が望まれる。

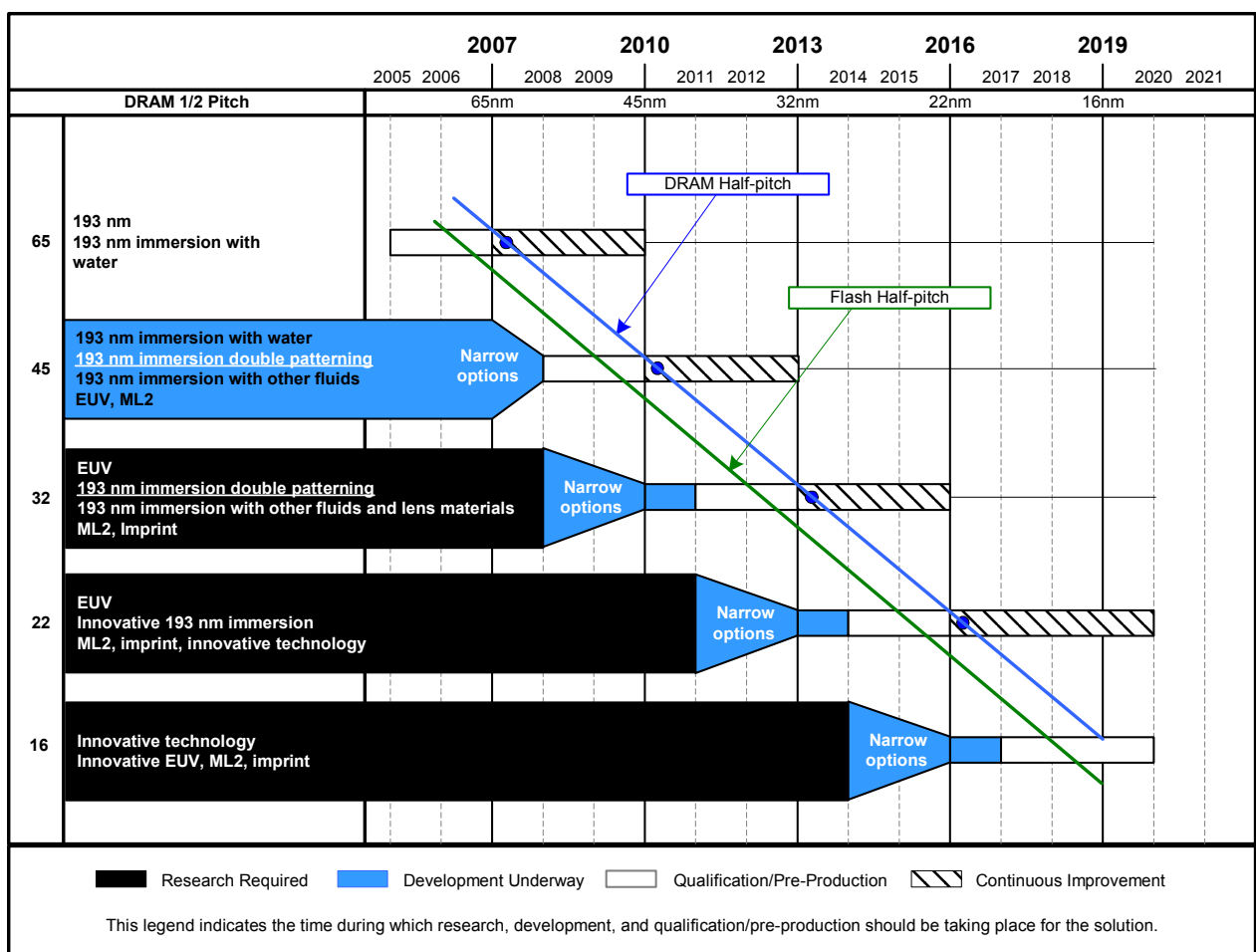
その他の見直しとしては、MEEF (Mask Error Enhancement Factor) についても、その数値だけでなく、Coloring の検討が行われた。35nm 以降の MEEF の値をキープしていくことは非常に困難であることが示されている。この課題の解決には、既存の RET (Resolution Enhancement Technology、超解像技術) の最適化、新たな RET の適用、なども考慮する必要があると考えられる。

Optical Lithography 以外へのマスクの対応としては、EUV、Nano-imprint、が挙げられるが、関連テーブルの見直しは 2007 年版で継続して議論していくこととなった。

7-3 ITRS2006 Update におけるリソグラフィ解決策候補 (Potential Solutions)

2006 Update 版の解決策候補を図表 7-5 に示す。2006 update 版では、2005 年版で定まった ArF 液浸露光

技術を延命し EUV 露光技術につなぐという流れを保ち、大きな変更はない。トピックスとしては ArF 液浸露光を用いたダブルパターニング技術が明確に打ち出されたことがある。これは EUV 露光技術や高屈折率液浸技術の技術課題やタイミングの点から現実的な解決策として期待が高まったためである。ダブルパターニング技術は 45nm ハーフピッチ、32nm ハーフピッチともに第二候補となっている。45nm ハーフピッチでは現在工場への導入が始まった純水を用いた ArF 液浸技術が第一候補として期待され、水以外の高屈折率液浸液を用いた ArF 液浸露光技術が第三候補となっている。これは高屈折率液浸液を用いた露光装置を実現するタイミングが課題であり、ダブルパターニング技術に順位を譲った。32nm ハーフピッチでは 2005 年版と同じく EUV 露光技術が第一候補であるが、第二第三候補には光露光(ダブルパターニング技術、高屈折率液浸液と高屈折率ガラスを用いた ArF 液浸露光)が続く。EUV 露光という新しい技術に期待する一方で、多くの解決すべき課題を抱える EUV 露光技術の状況から従来技術の延長も選択のオプションになっていることを示している。22nm ハーフピッチ以降に関しては 2005 年版と大きな変化はない。

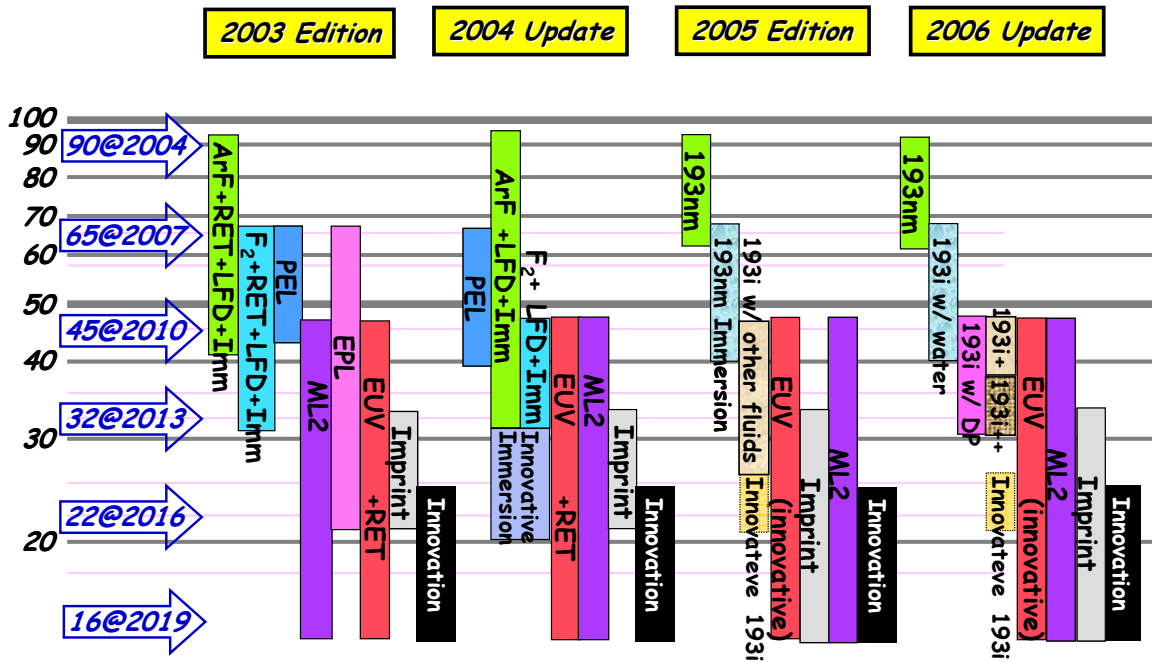


図表 7-5 2005 年版における解決策候補

図表 7-6 に 2003 年版以降の解決策候補の変遷を示す。以前は数多くの解決策候補が挙げられていたが年毎に絞り込まれ、この 4 年間で ArF 液浸の登場により F2(液浸を含む)、EPL、PEL など多くの技術が消えた。2005 年版以降では ArF 液浸露光技術とその改良/延命技術が細分化されると共に、EUV 露光技術が光露光を継承する技術として認知されてきた。ML2、インプリントは技術候補として継続して挙げられているが、量産技術としての可能性検証もまだ十分ではなく、解像性能の点から候補にとどまっていると考えてよい。22nm ハーフピッチ以降に対しては innovative technology としてまったく新しい技術の登場が必要との認識も変わって

いない。

以下、7-4 節では主な解決策候補について概説する。

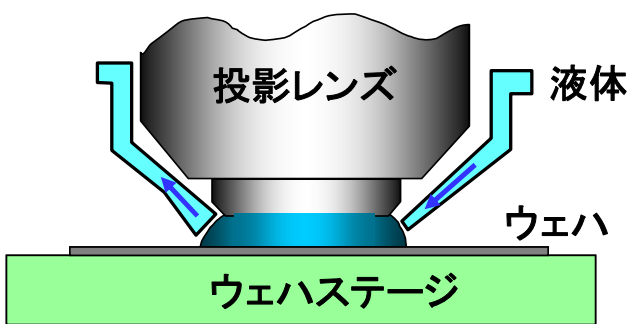


図表 7-6 解決策候補の変遷
(2004 Update では EPL は脚注に記述されている)

7-4 主なリソグラフィ解決策候補

7-4-1 ArF 液浸露光技術

液浸露光技術とは投影レンズとウェハの間に従来の空気ではなく液体を充填し露光する技術である(図表 7-7)。マスクからの回折光はパターンが微細になるほど空間に広がるため、投影光学系でその回折光を取り込む必要がある。液体を投影レンズとウェハの間に充填することで図表 7-8 に示すように、従来法(Dry)では達成

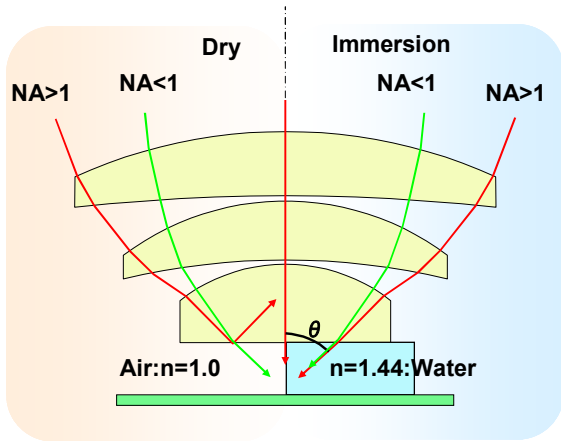


$$\begin{aligned} \text{開口数 } NA &= n \sin \theta \\ n &: \text{液体の屈折率} \\ \text{解像力 } R &= k_1 \lambda / NA \\ &= k_1 \lambda / (n \sin \theta) \\ &= k_1 (\lambda/n) / \sin \theta \\ &\text{解像力の向上} \\ \text{焦点深度 } DOF &= k_2 (\lambda/n) / 2 (1 - \cos \theta) \\ &\sim k_2 (\lambda/n) / \sin^2 \theta \\ &= k_2 n \lambda / NA^2 \\ &\text{焦点深度の向上} \end{aligned}$$

図表 7-7 液浸露光装置の概略

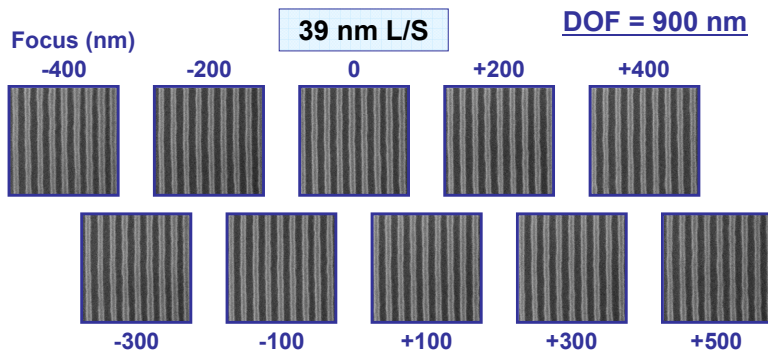
できなかった $NA > 1$ に相当する回折光を取り込むことが可能となり解像性能を向上できる。ArF 液浸露光は 2002 年頃より注目され、2006 年年初に(株)ニコンより世界で初めての $NA > 1$ の投影レンズを搭載する ArF 液浸機が出荷された。その後オランダの ASML から投影レンズに反射屈折光学系を用いた $NA = 1.2$ の露光装置が、2007 年年初には(株)ニコンより $NA = 1.3$ の投影レンズを持つ装置が出荷されている。図表 7-9 に $NA = 1.3$ の装置で露光した 39nm ライン&スペースパターンを示す。ArF 液浸露光の量産適用に向けた課題のうち、

特に大きな課題とされていた液浸起因による欠陥については、2006 年 2 月に開催された学会(SPIE Microlithography)にて大きく改善されたことが報告されたが、2007 年の学会でも欠陥に関する発表は依然多く、今後も注目しておくべき事項である。



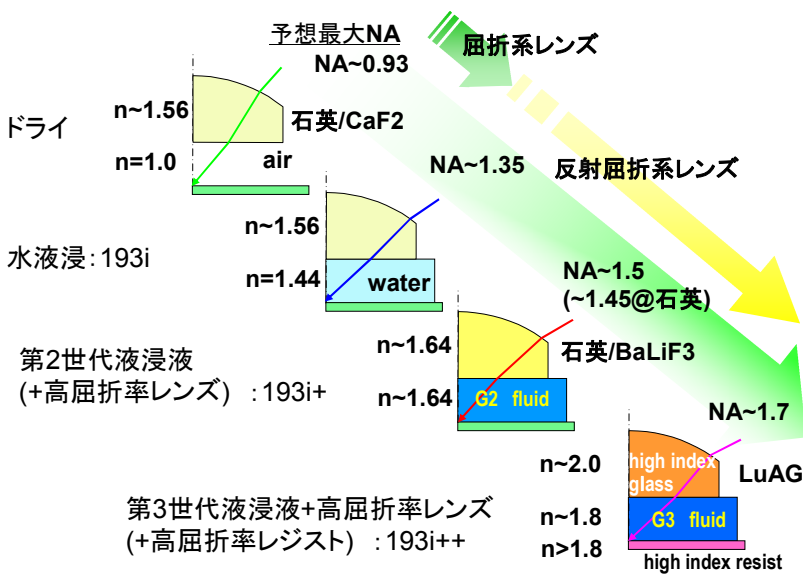
図表 7-8 従来法と液浸の違い

ArF 液浸露光の解像力を向上するためには従来と同様に NA を大きくすることが必要である。より大きな NA を実現するためには、投影レンズ-液浸液-レジストの二つの界面で全反射を起こさないことが条件となり、より大きな屈折率を持つ材料が必要である。NA は三つの材料(ガラス、液体、レジスト)の最も小さな屈折率で制限されるため、それぞれについて高屈折率材料の探索、開発が行なわれている。液浸液ではすでに屈折率が 1.64-1.65 の材料が第二世代液浸液として発表されている。ArF レーザー光での吸収が小さく、露光による液特性の劣化を精製することで再生利用



図表 7-9 NA=1.3 の液浸露光装置 (NSR-S609C)による 39nm パターン (株ニコンのご好意による)

できる材料と再生システムの報告もある。しかし粘性が高く表面張力が小さいため液浸液を保持するための新たなノズル機構が必要である。また dn/dT (屈折率の温度依存性) が大きく、より精密な温度設計が必要となる。屈折率のさらに大きな第三世代液浸液についても開発が進められているが十分な屈折率は得られていない。ガラス材料に関しては、 $BaLiF_3$ ($n=1.64$) や $LuAG$ (*Lutetium Aluminum Garnet: $Lu_3Al_5O_{12}$, $n=2.1$*) が材料候補として開発が行なわれている。しかし透過率、複屈折率、大口径化等の解決すべき課題が多く、実用化への道は険しいと考えられる。またレジスト材料についても高屈折率化の試みが大学を中心に行われている。



図表 7-10 今後の液浸露光システムと予想 NA

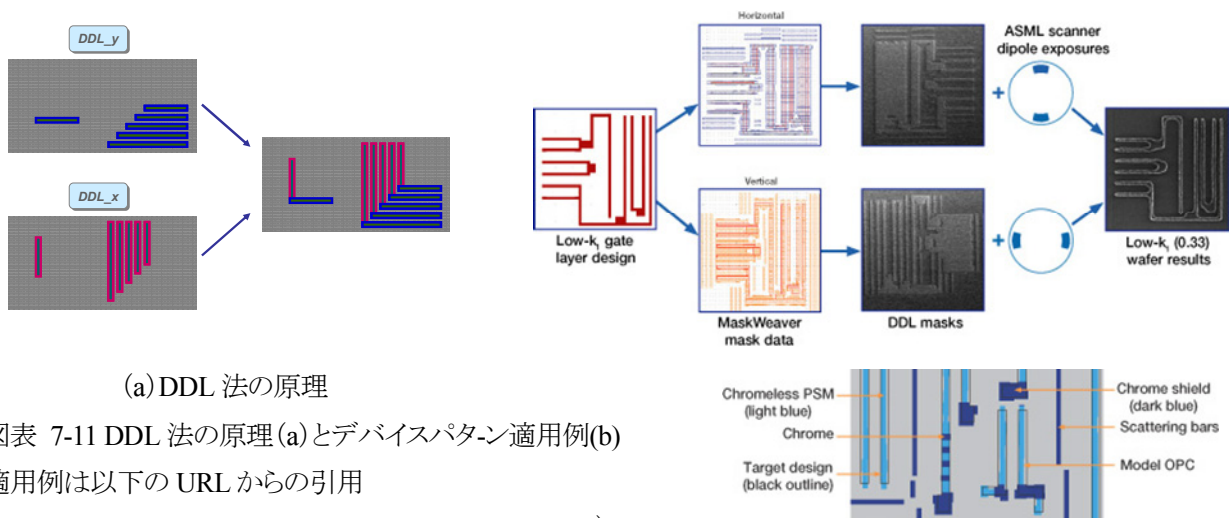
ArF 液浸露光での解像力は高屈折率材料を如何に用いるかによって決まる。図表 7-10 に材料の組合せにより予想される液浸露光システムと投影レンズの最大 NA の概略を示す。ガラ

材料として石英($n=1.56$)を仮定すると、液体として純水を用いた場合には最大 NA として 1.35 程度、第二世代液浸液を用いても 1.45 程度となる。第三世代液浸液と LuAG、さらに高屈折率レジストを組合せることで 1.7 程度の高い NA も期待される。

7-4-2 ダブルパターニング技術/ダブル露光技術

2006Update において、45nm、32nm の解決策候補の第二の候補に 193nm immersion Double Patterning を記載した。193nm 液浸露光技術の限界を打破する技術として多重露光技術への取り組みがなされている現状と、技術的なポテンシャルに鑑み、選択した。

既に、パターン制約を伴うレベンソン位相シフト露光などでは、不必要なパターンを除去する Trimming と呼ばれる処理のために、二回の露光を行っている。また、図表 7-11 に示す DDL(Double Dipole Lithography)法では、究極の二重極照明に加え偏光照明を行って、一方向のみの解像力を向上させ、x 方向と y 方向のパターンに特化した二つのマスクに分割して、照明条件を 90 度回転して二回の露光処理を行って、パターン形成



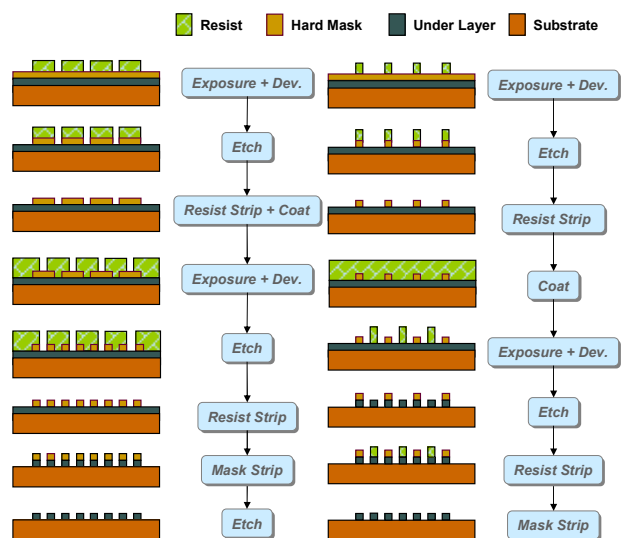
(a) DDL 法の原理

図表 7-11 DDL 法の原理 (a) とデバイスパターン適用例 (b)
適用例は以下の URL からの引用

[http://www.asml.com/asml.com/show.do?ctx=6843&ri\)=6713](http://www.asml.com/asml.com/show.do?ctx=6843&ri)=6713)

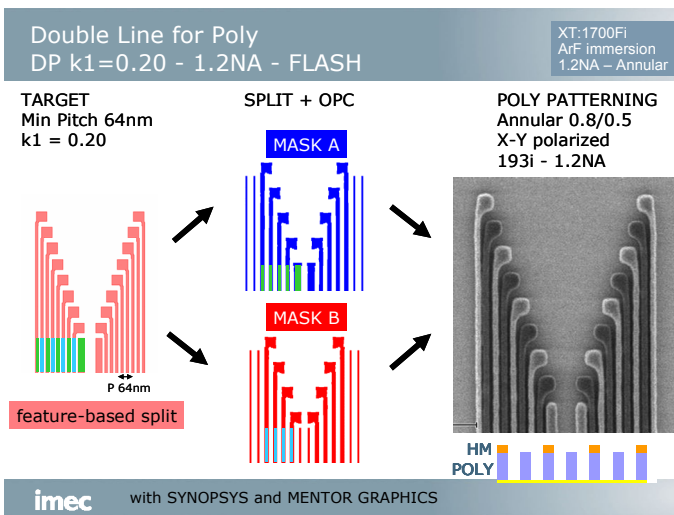
(b) 適用例

を行うなど、従来から、二回の露光処理を必要とする技術が知られている。しかしながら、これらの従来技術では、 $k1=0.25$ の限界を超えることは出来ない。今回、解決策候補に新たに Double Patterning として記載した技術は、実効の $k1$ 値 0.25 以下を狙った、解像力の二倍化を実現する露光技術である。Pitch splitting 技術と、Spacer(あるいは Sidewall) transfer 技術がある。Pitch splitting 技術は、露光処理とエッチングプロセスを繰り返して行う狭義の DPT(Double Patterning Technology)と、露光を二回行い、エッチングプロセスを一回行う DET(Double Exposure Technology)に大別される。共に、基本的には、最初の露光で形成されたパターンの中に新たなパターンを形成していく技術で、露光の間のエッチング加工の有無に違いがある(図表 7-12)。解像力の二倍化は、ピッチの 1/4 のパターンをそれぞれの

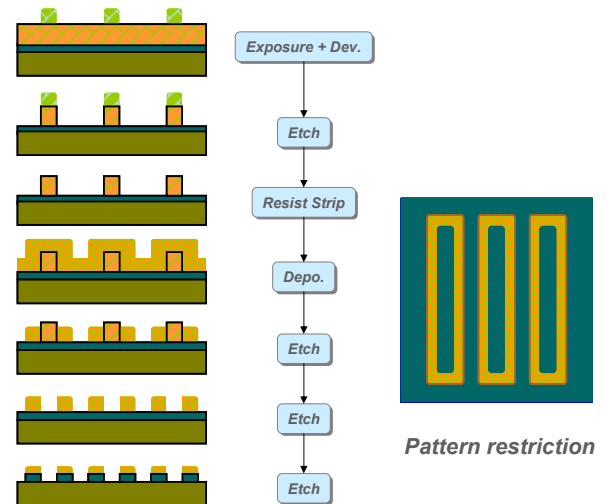


図表 7-12 ダブルパターニング技術のプロセスフロー

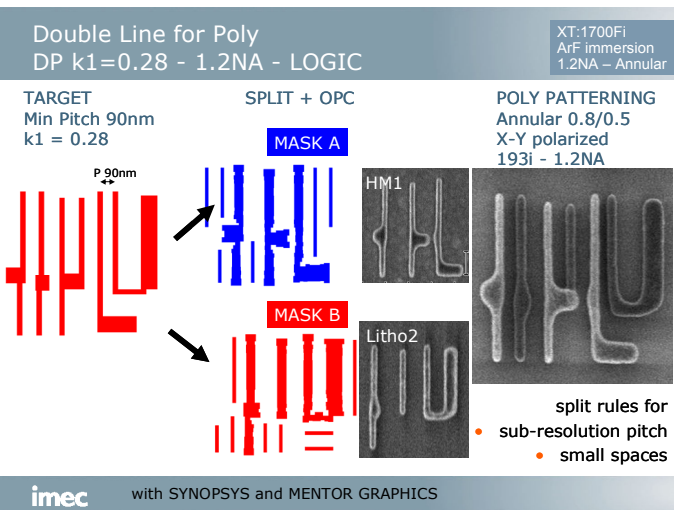
マスクに分割し、それらが、交互に規則的に配置されたデザインで実効の k_1 値 0.25 以下が可能になる。ラインアンドスペース、あるいはコンタクトアレイへの適用が精力的に検討されている。図表 7-13 に本方式によるパターンニング例を示す。FLASH メモリのゲートでは $k_1=0.2$ が、ロジックのゲートにおいても $k_1 < 0.3$ が達成されており、ダブルパターンニング技術が微細化に有効なことがわかる。また、Spacer(あるいは Sidewall) transfer 技術は、基板表面に露光処理を行ってパターンを設け、成膜処理を行って表面を覆う膜を等方的に設け、次に異方性エッチングにより膜全面を垂直方向に削り、平坦部の膜を除去し、側壁部にのみ膜を残置し、次に、元の芯となったパターンを選択的に除去し、残された側壁部をマスクとして用いて下地を加工することにより、二倍周期のパターンを得る(図表 7-14)。パターンは、元のパターンの輪郭に形成されるため、直接にデバイスパターンの形成に用いることは困難で、パターンの追加あるいは除去の為に第二の露光処理を行う必要がある。解像力の二倍化は、ピッチの 1/4 のパターンをそれぞれのマスクに分割し、それらが、交互に規則的に配置されたデザインで可能になる。ラインアンドスペース、あるいはコンタクトアレイへの適用が精力的に検討されている。



(a) FLASH Poly Gate



図表 7-14 Spacer Transfer 技術



(b) Logic Gate

図表 7-13 ダブルパターンニングの適用例
(IMEC のご好意による)

DP/DE の課題は、まず、微細パターンを形成するための二回の露光において、厳しいアライメント精度が要求される点にある。第一の露光の両側のエッジで CD が決まるパターン、第二の露光で決まるパターン、それらに挟まれた、異なる露光で転写されるエッジで CD が決まる、すなわち、第一及び第二の露光のアライメント精度に CD が影響を受け、アライメント精度の CD への影響が正負反対に出る二つのパターンが混在するためである。また、Spacer Transfer 技術においては、最初に形成されるパターンの線幅、側壁に残される膜厚の組み合わせで、CD と位置精度が決まり、側壁のプロファイルが、側壁に残されるパターン

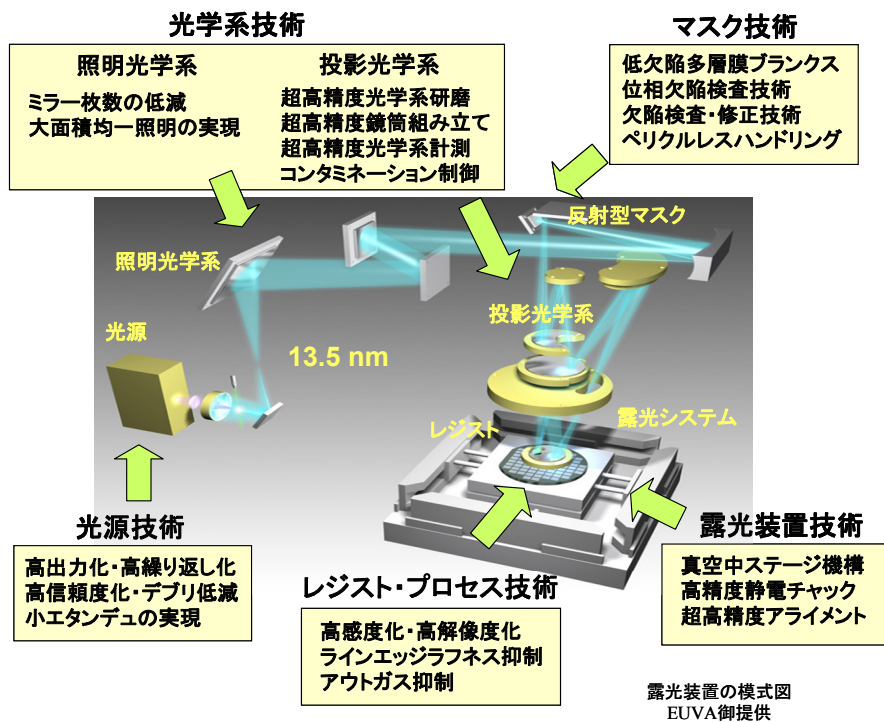
のプロファイルに影響し、交互に非対称性を持ち、CD と位置精度が、残しのライン二つとその間、及び、隣との間隙の組み合わせの繰り返しになる。CD と位置精度に関わる膜厚に厳しい制御を要求される。また、パター

ンが分割されて二つのマスクに分かれる場合には、接続部にアライメントに伴って発生する段差が問題になる。DE においては、Magic Material と総称される新たな材料の登場が期待されている。これらには、異常にコントラストの大きいレジストや、短時間で復活する CEL(Contrast Enhancement Layer)や、レジストパターンに、直に新たなレジスト膜を設けて、露光・現像を行っても最初のレジストパターンが保持されるレジスト材料、あるいはレジストパターンの硬化処理材料(及びプロセス)などがあり、複数回の露光処理相互の影響を受けない材料が望まれている。Magic Material は、まだ提案段階であり、今後の開発に期待が寄せられている。

2006Update においては、Table の見直しは限定的である。Mask Table 及び Resist Table には、DPT に対応する数値を提案した。アライメント精度に関しては、Single Exposure で示されている $CD \times 20\%$ の数値が DPT において 10% になるとしている。しかし、多重露光技術は、選択肢も多く、また、実用化の道筋も不透明で、合理的な数値の検討は進んでいない。デバイスパターンの特徴と多重露光の選択肢、コストの検討が重要になっている。

DPT は、パターンの自由度を制約する。そのため、設計に関わる要素が重要になっている。Cell パターンが単純で、L&S や規則的なコンタクト配置が多用される Flash memory は、パターンの規則性を最大限に利用する多重露光技術の導入が比較的早いと考えられ、Spacer transfer 技術が適するとする指摘がある一方で、Cell パターンが二次元的で複雑な DRAM や SRAM では、多重露光技術も複雑で課題が多いとされている。Logic 系のデバイスでは、さらに複雑になる。パターンの自由度が制約される為、設計負担が増大するとともにチップサイズの増大を招く。多重露光を適用するためには、設計段階からの取り組みが不可欠である。デバイス開発の初期段階、Cell Library、IP の設計段階から、取り組まなければならない。品種の多い Logic 系のデバイスへの多重露光技術の適用には、Memory 系以上に技術的な困難さが伴う。多品種少量生産デバイスへの多重露光技術の適用は、さらにコスト的に困難である。ウェハ処理コストとともに、設計、マスクのコストは重い。多重露光技術に関わるデータ処理負担の検討も不可欠である。設計データをそれぞれのマスクに分割する処理、SB、OPC、PSM などの RET 処理とその検証など現在の設計環境では対応できない。また、特に、DE において指摘されている Magic Material の

可能性も精査しなければならない。いずれにせよ、多重露光技術は、チップサイズの増大、設計、データ処理、マスク製作、多重露光に伴う工程数の増大など、全てコストを上昇させる。2007版では、多くの多重露光の選択肢の中から実用化に発展する技術の絞込みを図る。多重露光技術で要求される個々の露光パターンの精度には、従来の Table 以上に厳しい数値が要求される。ピッチは緩和されているものの、CD、位置精度などの要求値は、抜本的に見直しなければならない。2007改訂作業を通じて Table の数値の議論を深めていく。



図表 7-15 EUV 露光システムと技術課題

7-4-3 EUV 露光技術

EUV リソグラフィ技術は、従来の光リソグラフィ技術と同様の縮小投影型の露光技術であり、波長が 13.5nm という短波長であるため、大幅な解像度の向上が期待できる。さらに現在の光リソグラフィ技術で大きな課題である光近接効果が大幅に軽減され、また解像度向上技術に頼らない高解像度化が可能のため、設計側への負担が小さい等、多くの利点が期待できる。しかし、EUV リソグラフィ技術は、図表 7-15 に示すように、光源から装置、マスク、レジストまで、露光システム全体に渡って様々な新しい技術開発を必要とする。このため、開発コストが膨大であり、個別の企業での開発が難しく、世界的にもコンソーシアムでの開発が不可欠となっている。

EUV 技術の本格的開発は、1997 年より米国の EUV LLC で開発が進められ、ETS と呼ばれる露光装置の開発が行われた。しかし、当時は 90nm 技術以降への適用を目的としていたため、NA が 0.1 と小さく、解像度も 65nm 程度であった。この研究は、米国の国立研究所である LLNL、SNL、LBNL が、共同で研究する組織 VNL で行われた。EUV LLC が 2002 年に終了後も、VNL は一部存続し、EUVL 技術の研究が引き継がれ、研究は現在も続けられている。資金的には ISMT がこれを支えている。また ISMT は、NY 州の Albany 市に ISMT-N を設立し、NY 州のナノテク研究構想の一環として、EUVL 用の多層膜マスク基板とレジスト評価の研究を 2003 年から開始している。さらに最近では、同じ Albany Nanotech 内の IBM が中心となっている研究組織 INVENT において、後述するように、 α 機を導入して EUVL の開発を開始している。

これに対し、ヨーロッパでは、MEDEA+や More Moore PJ 内に EUVL のテーマを設け、多くの国が参加する形で研究を進めて来た。昨年からは EAGLE と呼ぶ研究PJで装置を中心とした開発を進めると共に、後述するように、IMEC に α 機を導入して実用化開発を加速している。

一方、我が国では、ASET が EUV LLC の研究に呼応して 1998 年から研究を開始し、2002 年には、EUVA を組織し、光源と露光装置の研究を進めている。さらに文部科学省のリーディング PJ として、大阪大学を中心に、光源の候補の一つであるレーザープラズマ光源の研究を進めている。また MIRAI-PJ のリソグラフィ関連の研究として、EUVL 用多層膜マスクの欠陥検査手法の研究を行っている。さらに昨年度からは、Selete で hp45nm 技術および hp32nm 技術への EUVL の適用を目的として、マスク技術に関する NEDO の委託研究及び EUV リソグラフィ技術に関する民間側の自主研究が発足した。これらの研究をまとめると図表 7-16 のようになる。

地域	機関名称	研究期間	主なテーマ
米国	EUULLC/VNL	1997-2002	EUV 基本技術と ETS の開発
	ISMT-N	2003-2007	MET の評価と光源信頼性
	INVENT	2003-2007	多層膜基板開発とレジスト評価
		2006-	α 機の導入による実用化開発
ヨーロッパ	EUCLIDES	1998-2000	EUV 露光装置の基本技術検討
	MEDEA+	2001-2006	EUV 要素技術と α 機の開発
	More Moore	2004-2007	22nm 技術対応 EUVL 技術の開発
	EAGLE	2006-2008	装置技術の開発
	IMEC	2006-	α 機の導入による実用化開発
日本	ASET(委託研究)	1998-2001	EUV 基本技術の開発
	ASET(継続研究)	2002-2006	マスクとレジスト技術の開発
	EUVA	2002-2007	光源と露光装置技術の開発
	MIRAI	2001-2005	多層膜基板欠陥検出技術の開発
	Selete(委託研究)	2006-2010	EUV マスクの技術開発
	Selete(自主研究)	2006-2010	EUV リソグラフィ技術の開発

図表 7-16 各種研究機関と研究内容

具体的な研究状況を次に紹介する。従来、EUV リソグラフィの最大の技術開発課題は、光源の出力向上であった。EUV リソグラフィを LSI の量産技術とするには、従来の光リソグラフィ並みのスループットが要求され、露光装置コストが上昇することを見込んで考えれば、さらに高いスループットが要求される。このスループットの目安として、Intel が提案した仕様では、300mm ウェハ 100 枚/時間以上とされている。これを実現するために必要な光源出力は、Nikon・Canon 及び ASML の共通仕様では、少なくとも 115W であるとされている。このため、この目標に向かって、各研究機関、光源メーカーにより、研究が進められている。しかし、一昨年の EUVL シンポジウムでは、レジスト感度への懸念からさらに高い光源出力の要求が ASML から出された。要求出力を 180W にしようというものである。最近では、この 180W が実質的な要求出力と、認識されるようになっている。

こういった要求出力の増大と、光源出力の伸びの停滞、さらにレジスト材料の発展から、第 4 回 EUVL シンポジウムで議論された最重要技術課題” (Critical Issues) では、レジスト材料の課題は、トップの座を光源関連の課題に譲った。これらの最重要課題がここ数年どのように変遷してきたかを、図表 7-17 に示す。この表にあるように、昨年度の議論では、信頼性の高い光源開発がトップで、感度・解像度・LER を満たすレジスト材料の開発が 2 番目、無欠陥マスクが第 3 位となった。勿論ここ数年、これらの 3 つの課題が上位 3 位を占めている状況は変化がない。

EUV Critical Issues List 2003-2006

2003	2004	2005	2006
1. Source power and lifetime including condenser optics lifetime	1. Availability of defect free mask	1. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	1. Reliable high power source & collector module
2. Availability of defect free mask	2. Lifetime of source components & collector optics	2. Collector lifetime	2. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously
3. Reticle protection during storage, handling and use	3. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	3. Availability of defect free mask	3. Availability of defect free mask
4. Projection and illuminator optics lifetime	4. Reticle protection during storage, handling and use	4. Source power	4. Reticle protection during storage, handling and use
5. Resist resolution, sensitivity and LER	5. Source power	5. Reticle protection during storage, handling and use	5. Projection and illuminator optics lifetime
6. Optics quality for 32-nm half-pitch node	6. Projection and illuminator optics lifetime	6. Projection and illuminator optics lifetime	

図表 7-17 EUV最重要技術課題の年次推移

2006 年は、ASML の Alpha-Demo 機がベルギーの IMEC と、米国の Albany Nanotech に納入されたことが、非常に大きな出来事であった。2007 年 2 月の SPIE では、ASML から Alpha-Demo 機の露光結果として、32nmL&S や 32nmDens C/H の解像を報告したことも特記できる。またわが国では Selete へ、小フィールド露光機である SFET が導入されたことや、EUV1 と呼ばれるフルフィールド露光機の導入が始まったことも実用化への序章が始まったという意味で、大きな出来事であった。

光源の開発にも最近大きな変化が報告された。一昨年までは、数十 W レベルの IF での出力が、DPP 光源で報告されているのに対し、LPP 光源では数 W の出力に止まっていた。この結果、 α 機レベルの光源としては、DPP 光源の採用が当然の結果として受け入れられていた。しかし、昨年 CO₂ レーザを励起光源として用い、Sn をターゲットとする LPP 光源が、有力であるとの提案が、複数の光源開発機関から報告された。2007 年の SPIE で、この方式を用いて、30-40W レベルの IF での出力が示された。元々 LPP 光源は、励起レーザの出力で EUV 出力がスケールアップできるとされていたため、再び LPP 光源が注目されるようになった。

一方、材料的には様々な課題が明らかになっている。一つは現在利用されている化学増幅型材料における、酸拡散の問題である。現在利用されている化学増幅型材料における酸の拡散距離は、20nm 程度あり、酸拡散に伴うパターンの変形が問題として、指摘されている。この問題は光近接効果と同じような現象として観測され、微細化を阻害する。このため、今後の微細化には、酸拡散距離をさらに抑制する必要がある。問題はレジスト感度の向上と、酸拡散距離の抑制をどう両立させるかである。

二つ目の課題は LER、LWR の低減である。現状では数 nm(3 σ)という値が多く報告されているが、ITRS の目標は hp 32nm で <1.7nm(3 σ)であり、まだまだ大きな開きがある。この問題に対しても、レジスト分子の低分子量化等の試みが行われており、最近では、最先端の ArF レジストと同等か、勝るようなデータの報告もある。

マスク技術としては、多層膜欠陥の低減が最大の課題であるが、DUV 光及び EUV 光を用いた欠陥検査技術が進展しており、今後位相欠陥を含めた欠陥の低減が加速されることが期待される。またマスクのハンドリ

ングに関しても、SEMATECH と共に Selete での技術開発の準備が整って来た。今後さらにデータの集積が図られ、実用化への道が拓かれていくことが期待される。

7-5 クロスカット活動

ITRS2006Update 及び ITRS2007 年版の作成に向けて精力的にクロスカット活動を行った。今年度の特徴として液浸関連と DE/DP 関連の議論が多かった。また、今年度のクロスカットの特筆すべき成果として WG11 メトロロジと行った LER/LWR の計測方法の議論が SEMI のスタンダードとして採用されたことが上げられる。今年度の ITRS 及び STRJ のクロスカットで議論された個別の案件は以下のように要約できる。

ERM とは 2007 年度版で新規チャプタとして独立するにあたり、分子レジストによる LER/LWR 改善、ブロックポリマーを応用した自己整合パターンニング、Nano Particle を応用した高屈折率液体、新規概念のレジスト材料(通称:Magic Material)などの材料での議論を始めた。新規機能性材料開発が必要で時間もリスクもあるが、達成時のインパクトは大きく積極的な活動を続ける。

PIDS/FEP とはリソグラフィの CD Uniformity の見通しが議論となる。リソグラフィが提示する CD Uniformity の数値が ITRS の要求値を満たせず“赤”になってしまう。エッチング後のゲート CD Uniformity も関連し議論を続けるが、設計を交えたクロスカットでも結論を得るに至っていない。この他にウェハの規格で、ウェハ外周規格やウェハ平坦度の議論が進められている。微細化要求とリソグラフィのバランスが崩れ始め PIDS/FEP/設計とのクロスカットは益々重要性を増してきている。

Modeling とは微細化に伴いマスクパターン面上での電磁気効果(パターンの方向により偏光した光の透過率が影響を受ける現象)を考慮したモデルの構築、多重露光時の収差の影響などが議論されている。

Metrology とは LER/LWR の計測に関する SEMI のスタンダード化で大きな成果を得たが、それ以外の議論としてウェハ上での CD 測定が議論されている。計測装置の互換性、キャリブレーションなどが継続的に議論されている。今後 DE/DP における線幅と重ね合わせ計測の計測方法と計測精度の議論が 2007 年度版に向けて必要となる。

Yield Enhancement とはリソグラフィに係わる用力・環境の不純物レベル・ガスなどの純度が議論された。露光波長の短波長化により露光機のレンズやレチクルが環境中の残存不純物の化学反応により曇る現象が指摘されていることから、環境中の不純物レベルの議論が重要となってきている。Reticle Storage での環境規格は 1 年で影響が出ないレベルを前提としたが、具体的な数値の議論には至らなかった。また、リソが要求する環境中の不純物レベルが測定検出限界を超えている場合があり(0.1-0.3ppb)、その取り扱いが議論されたがサンプルリング(コンデンス)時間と感度がトレードオフの関係にあることが再度指摘されるなど今後繋がる積極的な意見交換がなされている。EUV についてはデータ不足で今年度の議論は見送った。更にウェハ裏面検査や液浸特有の欠陥検出の必要性が指摘されたが、議論は来年度に持ち越されている。

ESH とのクロスカットでは欧州での PFOS 問題が報告された。更に EUV のパワー消費量が再度指摘されたが、具体的な数値の見通しが示せず議論は終結していない。

設計との議論では CD Uniformity <12% の定義が Lot to Lot → Shot to Shot の全てを含むことが再確認される。12% 以上に CDU を緩められるかについては今後も議論が必要である。今後のリソがデザインに与える問題として Pitch 固定、LER/LWR、DE/DP を前提としたデザイン制約を指摘している。

微細化に伴いリソグラフィの困難さが増す中で、設計や他のプロセスへの制約が微細化達成の条件となり始めている。クロスカットでの議論と情報交換が今後のリソグラフィの発展に不可欠である。今後も活発なクロスカット活動を進めてゆく必要がある。

7-6 まとめ

2006 年は NA>1.0 の ArF 液浸装置が出荷され Hyper NA 元年とも言える年となった。リソグラフィ性能としての解像力は装置技術、延命技術や新しい技術の登場で年々向上していくであろう。しかし、ロードマップのテーブルのカラーリングに見られるように、求められる要求に対する技術障壁は高く、残された時間も限られている。ダブルパターニングや高屈折率液浸などの ArF 液浸露光技術をベースとした延命技術と EUV 露光技術が本命となってきたが、解決すべき課題はまだ多く残され、しばらくは技術選択が困難な状況が続くと考えられる。この状況を抜け出し、さらに次の世代に進むための指針となるロードマップを目指し今後も活動していきたい。