

先端リソグラフィ技術の課題と革新

Challenges and Innovations in Advanced Lithography Technology

森 一郎 東木 達彦

■ MORI Ichiro

■ HIGASHIKI Tatsuhiko

半導体デバイスの高密度集積化は、性能・機能や信頼性の向上、コスト低減などの利点をもたらすが、それを実現するためには、微細な回路パターンを形成するリソグラフィ技術の進歩が求められている。リソグラフィ技術は、マスク、OPC (Optical Proximity Correction : 光近接効果補正)、露光装置、レジスト材料、レジスト塗布・ベーク・現像装置、寸法計測など多岐にわたる要素技術で構成される。

東芝は、各要素技術のみならず、それらを統合して性能を最大限発揮させるリソグラフィ設計技術の開発を推進し、半導体の微細化を加速している。

Large-scale integration of semiconductor devices offers such advantages as higher performance, enhanced functions, and greater reliability as well as reduced production cost. To achieve large-scale integration on a practical basis, there is a strong need for progress in ultrafine processing technology, which forms the critical circuit patterns. A lithography system to fabricate microcircuit patterns of semiconductors incorporates a number of key technologies; namely, mask making, optical proximity correction (OPC), exposure tools, resist technology, and metrology.

To promote semiconductor miniaturization, Toshiba is developing a lithography designing technique that realizes optimally effective lithography by integrating all related engineering technologies.

1 まえがき

半導体デバイスの高密度集積化は、性能・機能や信頼性の向上、コスト低減などの利点をもたらす。このため、ICの誕生以来、集積度向上のための技術開発が絶えず続けられてきた。高密度集積化を実現するには、微細な回路パターンを形成する技術が求められ、半導体製造工程でこの微細パターンを形成する技術をリソグラフィ技術という。

リソグラフィ (Lithography) ということばは、もともとギリシャ語の石版画 (lithos) に由来している。半導体製造の分野では、1980年代以降、電子ビーム描画装置などで回路パターンの原版 (マスク) を作り、これをウェーハ上に塗布した感光性樹脂 (レジスト) に、紫外光を用いた縮小投影露光装置によって転写する光リソグラフィ技術が主として使われている。

リソグラフィ技術には、デバイス世代ごとに回路パターンの最小寸法を70~80%の割合で微細化することが求められる。1990年代以降の光リソグラフィ技術においては、位相シフトマスク技術や変形照明技術、スキャン露光方式や化学増幅レジスト材料など、様々な技術革新がなされ、微細化のトレンドが維持されてきた。しかし、近年、光リソグラフィ技術の課題の解決が従来以上に難しくなっており、微細化の鈍化を危惧 (きぐ) する声有一段と高くなっている。ここでは、このような状況が起きている背景と、それを打破しようと

するアプローチについて述べる。

2 光リソグラフィ技術の変遷

光リソグラフィにおける解像度 R は、露光光の波長を λ 、露光装置のレンズの性能指標である開口数を NA (Numerical Aperture) とすると、次のように表される。

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

ここで k_1 は、レジストの解像性能や λ と NA 以外の光学系の特性に依存する定数であり、これの理論限界値は0.25である。光リソグラフィの解像度の進歩は、(1)式からわかるように、露光光の短波長化、投影レンズの高性能化 (高 NA 化)、及びレジスト性能の向上などによる低 k_1 化によってなされてきた。露光光波長は、水銀ランプの g 線 (436 nm) から、 i 線 (365 nm)、 KrF (フッ化クリプトン) エキシマレーザ (248 nm)、 ArF (フッ化アルゴン) エキシマレーザ (193 nm) へと短波長化が進んできた。1980年代末から1990年代半ばまでは、 i 線から KrF エキシマレーザへの移行が様々な課題のために遅れ、それに代わって k_1 値を小さくする技術、すなわち、位相シフトマスクや変形照明などの超解像技術と呼ばれる技術が提案され、実用化された。1990年代半ばには、 KrF エキシマレーザの採用とともに、化学増幅レジストや反射防

止膜、及びスキャン露光が実用化され、従来以上に微細化が進展した。2000年代に入ってから、KrFエキシマレーザからArFエキシマレーザへの移行が始まっている。

このように光リソグラフィ技術は着実に進展してきたが、近年、その進展が危惧されているのはなぜだろうか。表1に示した k_1 値の推移を見ることによって、次のように理解することができる。表1は、各デバイス世代における最小寸法、露光光波長、NA、 k_1 値、及び最小寸法の露光光波長に対する比率の推移を示したものである。ここでの k_1 値は、(1)式の解像度Rをその世代の最小寸法 R_{min} と読み替え、(1)式を次のように変形して求めた値である。

$$k_1 = R_{min} / (\lambda / NA) = NA \cdot (R_{min} / \lambda) \quad (2)$$

表1. 各デバイス世代における露光光波長、NA、 k_1 値の推移(メモリの場合)

Trends in numerical aperture (NA) and k_1 value in lithography

デバイス世代	(nm)	250	180	130	90	70	55	40
最小寸法	(nm)	250	180	130	90	70	55	40
露光光波長		KrF エキシマレーザ (248 nm)		ArF エキシマレーザ (193 nm)	ArF エキシマレーザ液浸			
NA		0.6	0.68	0.73	0.75	0.85	1.0	1.25
k_1		0.6	0.49	0.38	0.35	0.31	0.29	0.26
露光光波長に対する最小寸法の比率 (%)		100	72	52	47	36	28	23

微細化の進展とともに k_1 値が小さくなって、理論限界値0.25に近づいていることがわかる。 k_1 値は、(1)式を用いて解像度Rを議論するときには、その値が小さいほど解像度が向上するという意味で、小さい値ほど望ましい。しかし、(2)式のように、Rをその世代の最小寸法 R_{min} と置き換えてとらえなおしてみると、その値が小さいほど理論限界に近づいていくという意味で、リソグラフィの難しさを表す指標となると考えることができる。難しさをより直感的に理解するには、表1に示した R_{min} / λ の値、すなわち、露光光波長の何%の寸法を実現しなければならないのか、という尺度でとらえるとわかりやすい。例えば、250 nm 世代では最小寸法は波長と同じであったのが、180 nm 世代では波長の72%を、130 nm 世代では52%を達成しなければならないわけである。このような光リソグラフィの状況をSub-wavelengthリソグラフィ、あるいはLow- k_1 リソグラフィと呼んでいる。

Low- k_1 化が進むと何が問題になるのか。それは、①光リソグラフィのプロセスウィンドウ^(注1)が極端に狭くなってしまふことと、②ウェーハ上のパターンがマスクパターンに対して忠実に転写されなくなってしまうことである。この二つの問題の詳細と解決のアプローチについて次章で述べる。

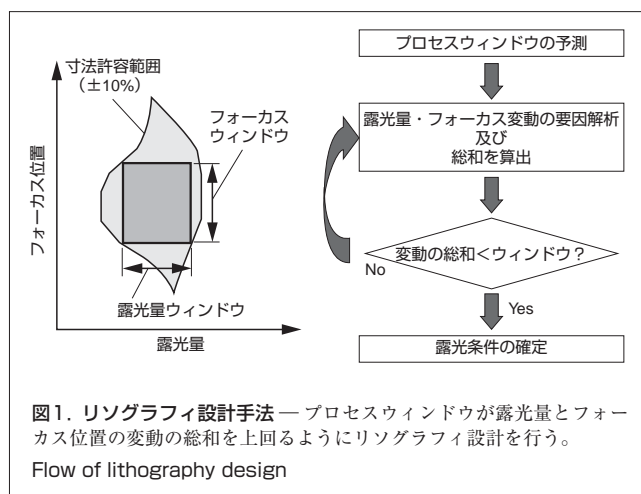
(注1) 露光量やフォーカス位置などのプロセス条件が最適な状態から変動したときの許容範囲。

3 Low- k_1 リソグラフィへのチャレンジ

3.1 リソグラフィ設計技術

リソグラフィ設計⁽¹⁾ということばは、Low- k_1 リソグラフィへのチャレンジの過程で生まれた東芝独自の用語である。光リソグラフィを構成する要素は、マスク、露光装置、レジスト材料、レジスト塗布・ベーク・現像装置、寸法計測など多岐にわたる。これらは大きな区分けであり、その一つ一つは、更に細部の要素から成る。例えば露光装置では、光源、照明光学系、投影レンズ、オートフォーカス機能などである。これらの要素は、微細パターンをウェーハ上に形成する際に、最適な露光条件からの変動を引き起こす原因になる。狭いプロセスウィンドウしか確保できないLow- k_1 リソグラフィでは、この変動を引き起こすすべての構成要素の誤差を定量的に、かつ統一的に取り扱うことが極めて重要である。

以下に、当社がリソグラフィ設計と呼んでいる手法について述べる(図1)。

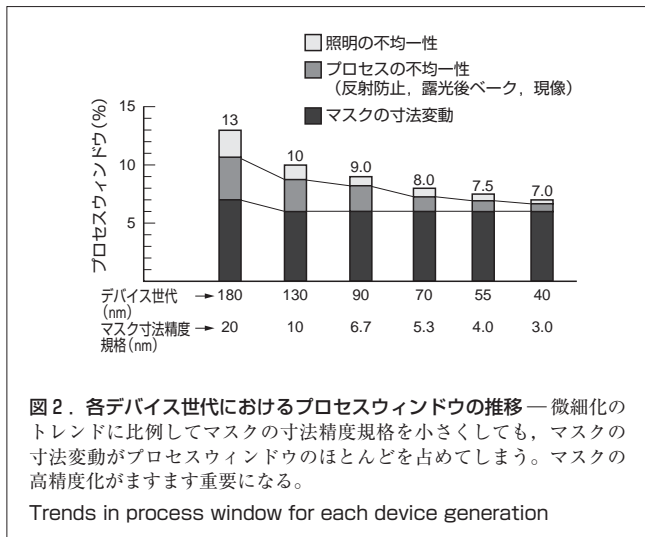


光リソグラフィにおいては、ウェーハ上に形成されるパターンの寸法は、露光量とフォーカス位置によって決定される。写真撮影をする際に、最適な露出条件とフォーカス条件があることと同様に考えることができる。リソグラフィ設計では、まず、その世代で使える光学条件やレジスト性能を予測して、露光量とフォーカスに関するウィンドウをシミュレーションによって見積もる。これと並行して、露光量とフォーカス位置に変動を引き起こす要因の解析を行い、各要因について、その世代で達成すべき目標値とその総和を算出する。これらの要因表を露光量バジェット、フォーカスバジェットと呼んでいる。露光量とフォーカスのウィンドウがそれぞれの変動要因の総和を上回るように、シミュレーションとバジェット解析を繰り返す。従来の光リソグラフィ技術開発では、いかに広いプロセスウィンドウ、特にフォーカスウィンドウを達成

するかに注目が集まっていた。今後も、この広ウィンドウ化の重要性は変わらないが、Low- k_1 化が進行すればするほど、精密なバジェット解析とそれに基づいたすべての要素技術の高精度化が重要になる。ここでは、露光量とフォーカスのすべての変動要因について触れることは不可能なので、代表的な二つの事例について以下に述べる。

3.2 リソグラフィ技術の開発におけるマスク技術の位置づけ

リソグラフィ設計手法の中で、特に重要な考え方は、寸法変動を引き起こす要因のうち、フォーカスにかかわる要因以外は、露光量バジェットの中で取り扱うことにある。ここでの露光量とは、単に露光装置での設定露光量という意味だけではなく、マスクの寸法誤差や塗布・ベーク・現像などのレジストプロセスがウェーハ上のパターン寸法に及ぼす影響を露光量に換算した実効露光量と呼ぶべきものである。露光量ウィンドウの世代ごとの推移を図2に示す。



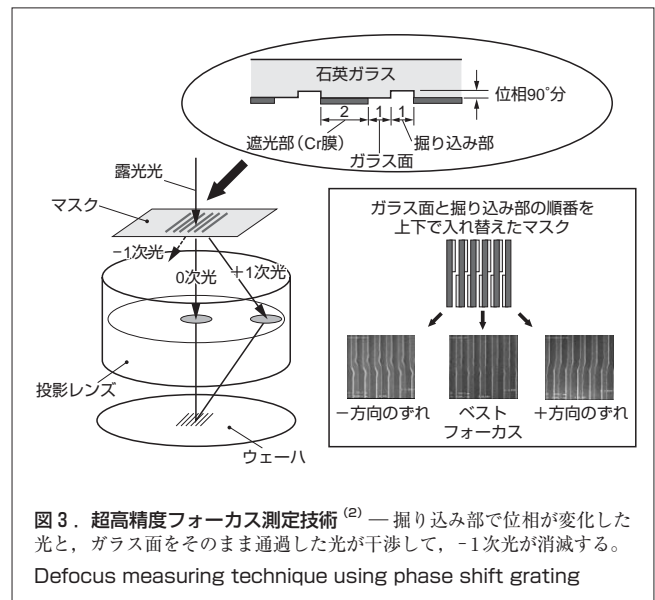
図には、バジェット解析による変動要因の配分結果も併せて示した。図からわかるように、露光量バジェットの中では、マスクの寸法変動の寄与分が50%以上を占めていることがわかる。マスクの寸法精度を世代間の微細化の比率と同じ比率で向上させても、マスクの寸法変動の寄与の割合は大きくなってしまふ。マスクの寸法精度向上がLow- k_1 リソグラフィの実現にとって極めて重要な位置づけにあることが理解できる。昨今、マスクコストの高騰が叫ばれて久しいが、その理由の一つもここにあると言える。マスク技術の開発とリソグラフィ技術の開発の強い連携が、今後ますます重要になると認識している。

3.3 フォーカス計測技術

フォーカス変動を引き起こす要因は、主に露光装置のフォーカス誤差(レンズ収差とオートフォーカス誤差)、ウェー

ハ平坦(へいたん)度及びマスク平坦度である。フォーカスウィンドウは、近似的には投影レンズのNAの2乗に反比例するので、高NA化に伴い、急激に狭くなる。そのため、フォーカス変動の低減が、大きな課題となっている。

この課題を解決するためには、高精度なフォーカス計測技術が求められている。当社で開発したフォーカス測定技術の一例を図3に示す。マスク上に遮光部(Cr(クロム)膜)／ガラス面／掘り込み部が、2:1:1の比になるようにラインパターンを作成し、これに光を照射すると、完全に非対称な回折光を発生させることができる。この回折光をウェーハ上に結像させると、フォーカス位置に応じてウェーハ上で位置ずれを引き起こす。このずれ量を計測すると、分解能3 nm以下という高精度なフォーカスの位置の計測を実現することができる。この技術を用いて、露光装置性能の向上だけでなく、ウェーハやマスクの平坦度の管理精度の向上を図っている。

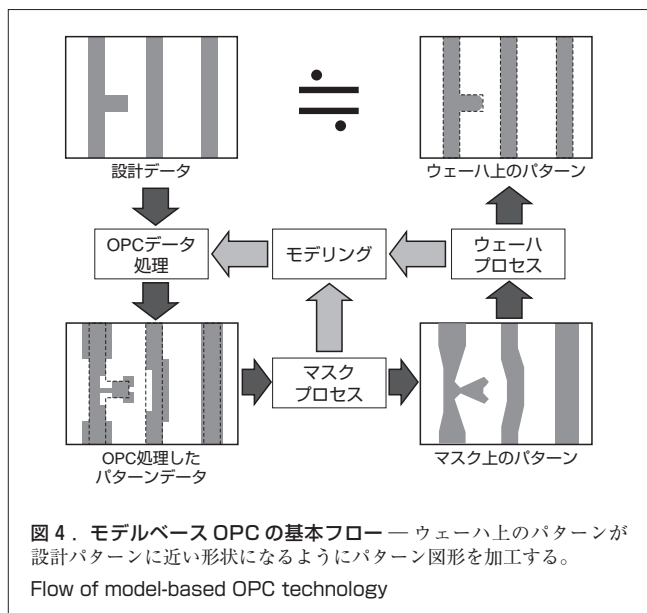


3.4 OPC技術とDesign for Manufacturability

Low- k_1 化が進むと転写パターンの忠実性が低下してしまう。その理由は、次のように理解することができる。光リソグラフィでは、マスクパターンによって回折された光をレンズを介してウェーハ上に集光し、パターンを形成する。Low- k_1 化が進行すると、マスクパターンで回折した光のうち、低次成分しかレンズを通過できなくなる。このため、マスクパターンをウェーハ上に忠実に転写できなくなる。この現象をOPE(光近接効果)と呼んでいる。このOPEを事前に予測し、マスクパターンを補正することで、ウェーハ上で設計に忠実なパターンを得ることをOPC(光近接効果補正)と言う。

OPC技術では、パターンの特徴に応じて定めた補正ルールによって補正を行う方式が250 nm世代から導入されたが、ルールによって補正を行う方式では高い補正精度が得られ

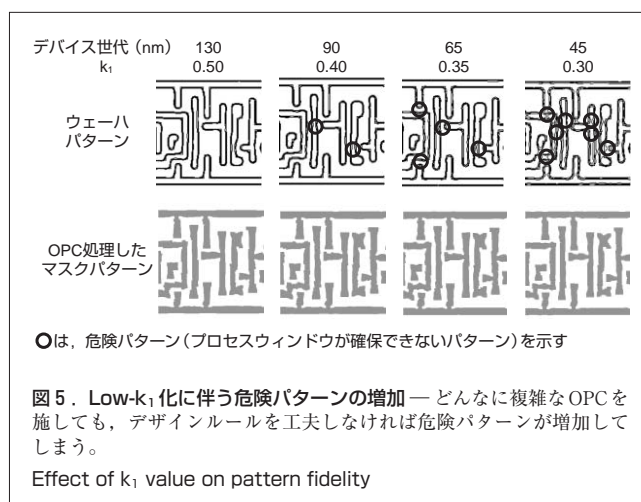
ないために、現状はモデルベース OPC と呼ばれる方式に置き換わってきている。この方式では、投影光学系やレジストの特性をモデル化して、これに基づいたシミュレーションによって補正パターンを求める(図4)。



最先端の OPC 技術⁽³⁾では、モデルの高精度化に加えて、どこまで細かくマスクパターン図形を変形させるかがポイントになっている。OPC 処理における図形加工は、図4に示すように、パターンのエッジにジョグと呼ばれる段差を作り、設計パターンに近い形状が得られるようにジョグの長さや大きさを決定する。ジョグ長を小さくして図形を複雑にすれば、設計パターンへの忠実性は向上するが、パターンのデータ量が爆発的に増加し、電子ビーム描画によってマスクを製造する時間が著しく増加してしまう。デバイス特性に影響が現れない範囲で適切にジョグ長を設定し、マスク描画時間を抑えることが重要である。

OPC 技術は、設計データをマスク製造のための電子ビーム描画用データに変換する技術を出発点として発展したが、その必要性は Low- k_1 リソグラフィに端を発しており、二つの技術の強い融合なくしては成立しえなかった。リソグラフィ技術の性能を最大限に発揮するには、多くの要素技術をリソグラフィ設計手法に基づいて統合することが重要であると 3.1 節で述べた。OPC の出現以来、これにデータ処理技術が加わって、リソグラフィ技術のインテグレーション技術としての性格がますます強まっている。今後、更に Low- k_1 化が進むと、このような流れは加速されると考えている。それは、次に述べる事態が出現するからである。Low- k_1 化が進んでいくと、設計と製造をつないでいるデザインルールが単純には規定できなくなる。複雑なデザインルールを規定して、これを

遵守して設計しても、プロセスウィンドウが確保できないパターンが現れてしまう(図5)。このようなパターンを事前に予測して、設計の段階からプロセスウィンドウが確保できるようにパターン設計を工夫しなければならない。設計側が製造側の問題点を把握し、これを考慮して設計する考え方は DFM (Design For Manufacturability) と呼ばれ、近年、注目されるようになった。リソグラフィ技術にかかわる DFM は、今後の微細化の実現には特に重要な課題の一つである。



4 次世代リソグラフィ技術の見通し

リソグラフィ技術は今後どのように推移していくのか、その見通しについて述べてみたい。

4.1 液浸露光技術

つい最近まで、ArF エキシマレーザの次は F_2 (フッ素) レーザ (157 nm) に移行すると考えられ、世界中で開発が進められていた。しかし、 F_2 レーザリソグラフィは、投影レンズに使われる CaF_2 (フッ化カルシウム) の安定供給と装置の高コスト化が問題であるとの指摘があり、これに代わる技術の模索も行われていた。ここ 1 年の間に、レンズとウェーハの間に水を浸して露光を行う液浸露光技術の実用化研究が進み、一躍脚光を浴びている。ArF エキシマレーザの場合、水の屈折率 n が 1.44 なので、液浸露光では従来に比べて NA が 1.44 倍高いレンズの設計が可能になる。短波長化ではなく、ArF エキシマレーザリソグラフィの高 NA 化に流れが移ったと言える。

液浸露光技術の主な課題は、欠陥の原因になる水中の微小な泡を抑制する技術、水に浸されても安定した解像度を得られる材料・プロセスの開発などである。Low- k_1 での対応を前提に、メモリでは 45 ~ 40 nm (ハーフピッチ) まで、ロジックでは 50 ~ 45 nm (ハーフピッチ) まで ArF エキシマレーザ液浸リソグラフィを適用したいと考えている。

4.2 NGLとマスクレスリソグラフィ

光リソグラフィもいずれは限界に到達してしまうため、NGL (Next-Generation Lithography) の呼称のもとに、様々な技術が提案されてきた。現在でも、何が主流になるか見解は分かれているが、当社は次のように考えている。

半導体製品は、メモリやMPUのように大量に生産されるものから、ASIC (用途特定IC) に代表されるようにそれほど大量には生産されないものまで生産数量は様々である。これまでのリソグラフィ技術は、DRAMやMPUなどの大量生産品をテクノロジードライバとして技術革新がなされ、その技術を少量生産品にも適用してきた。しかし、近年、微細化の進展に伴いマスクコストが高騰し、少量生産品ではリソグラフィコストに占めるマスクコストの比率が増大して、問題となっている。このような状況を考慮すると、中長期的には、大量生産品と少量生産品とで最適なリソグラフィ技術を使い分ける時代が到来すると考えている。大量生産品に対しては、あくまで高いスループット (生産性) が重要であり、一方、少量生産品に対しては、製品ごとにマスクを用意しなくてよいマスクレスリソグラフィが適している。

大量生産品に対しては、ArFエキシマレーザ液浸リソグラフィの次は、EUV (Extreme Ultra Violet : 極端紫外線 (13.5 nm)) リソグラフィを中心に開発を進めていく方針である。EUVリソグラフィは、期待は大きいですが、まだ多くの課題を抱えている。特に高出力光源の開発が急務である。また、ケミカルクリーン技術やペリクルレスマスクの運用技術の構築が、実用化に際して最後まで残る課題になると考えている。EUVリソグラフィ開発には多額の資金が必要で、米国や欧州、及び日本国内で様々な形態の共同開発が進行中であるが、当社も国内コンソーシアムに積極的に参加していきたい。

マスクレスリソグラフィについては様々な提案がなされているが、当社はCP (Character Projection) 方式の低加速電

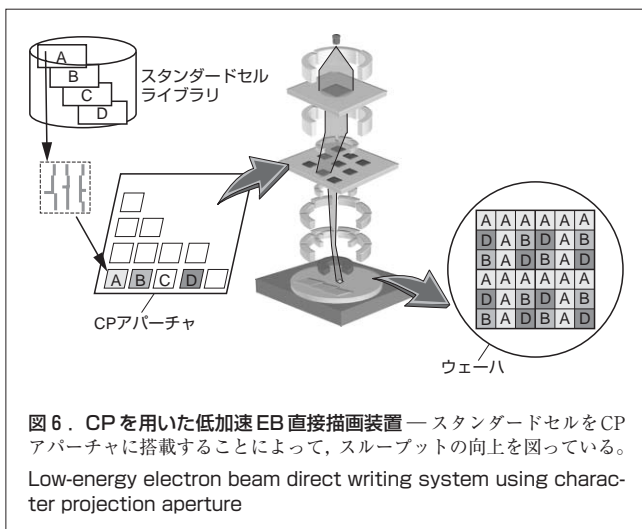
子ビーム (EB) 直接描画装置を開発⁽⁴⁾している (図6)。EB直接描画は微細パターンが形成できるが、課題はスループットが低いことにあった。EBを低加速にすることでレジスト感度を向上させ、CPを用いた露光でショット数を削減することで、スループットの向上が可能となった。デバイス試作段階でのサンプル出荷に活用して技術レベルを向上させ、少量生産品への適用につなげていく方針である。

5 あとがき

リソグラフィ技術は、半導体の微細化のキー技術として、半導体の今日の繁栄を支えてきた。この間、リソグラフィ技術は、マスク、露光装置、レジスト材料・プロセス、計測・検査技術、OPCなどを統合するインテグレーション技術としての性格を強めてきた。今後、更に発展させていくためには、リソグラフィを構成する各要素技術の革新と連携だけでなく、設計とリソグラフィの連携や、リソグラフィとリソグラフィ以外のプロセスとの連携による、総合的な最適設計技術がますます重要になる。設計から製造まですべてを持つメーカーである当社の強みを生かして、リソグラフィ技術の開発を進めていきたい。

文 献

- (1) Inoue, S., et al. "Level-Specific Strategy of KrF Microlithography for 130nm DRAMs". Technical Digest of International Electron Devices Meeting. Washington DC, 1999-12, IEEE. NJ, USA, IEEE, 1999, p.809 - 812.
- (2) Nomura, H. A Novel Technique for Measuring Defocus with Phase Shift Grating on a Photomask. Optical Review. 8, 3, 2001, p.184 - 190.
- (3) Tanaka, S., et al. "Impact of OPC aggressiveness on mask manufacturability". Proc. SPIE, 5130, Photomask & Next-generation Lithography Mask Technology X. Yokohama, Japan, 2003-04, PMJ, BACUS, and SPIE. USA, SPIE, 2003, p.23 - 32.
- (4) Nakasugi, T., et al. Maskless Lithography using Low Energy Electron-Beam: Recent Results of Proof-of-Concept Tool. J. Vac. Sci. & Tech. B20, 2002, p.2651 - 2656.



森 一郎 MORI Ichiro

セミコンダクター社 プロセス技術推進センター 半導体プロセス開発第二部長。リソグラフィ技術及びマスク技術の開発業務に従事。応用物理学会会員。
Process & Manufacturing Engineering Center



東木 達彦 HIGASHIKI Tatsuhiko, D.Eng.

セミコンダクター社 プロセス技術推進センター 半導体プロセス開発第二部長グループ長、工博。リソグラフィ技術の開発業務に従事。応用物理学会、精密機械工学会、品質工学会会員。
Process & Manufacturing Engineering Center