半導体リソグラフィ技術の進展とEUVリソグラフィの開発状況

岡崎 信次

技術研究組合 極端紫外線露光システム技術開発機構 (〒210-0007 神奈川県川崎市川崎区駅前本町11-1 パシフィックマークス川崎11階)

Evolution of Lithography and Development Status of EUV Lithography

Shinji OKAZAKI

Extreme Ultraviolet Lithography System Development Association,
11th Floor, Pacific Marks Kawasaki, 11-1 Ekimae-honcho, Kawasaki-ku, Kawasaki, Kanagawa 210-0007

(Received June 17, 2010)

The development of ULSI devices are promoted by the development of lithography. In the development of lithography, optical lithography played an important role. Higher numerical aperture (NA) optics, shorter exposure wavelength light and various resolution enhancement technologies are introduced to obtain higher resolution. However, optical lithography is now facing the resolution limit. To overcome this situation, various ideas in optical lithography have been investigating. Adopting extremely shorter exposure wavelength, that is the use of Extreme Ultraviolet (EUV) light, is another choice. Various research institute and universities in the world are intensively investigating EUV lithography. In this paper the evolution of optical lithography is introduced first. Then current status and future prospects of EUV lithography are discussed.

Key Words: Optical lithography, Resolution enhancement technology, EUV lithography

1. はじめに

半導体集積回路の高性能化・高集積化によって、我々の生活は大きく様変わりした。昔、一部の限られた研究者しか使えなかったような高性能の計算機、いやそれを数段上回る性能の計算機が、いまや我々の机の上のノートパソコンとして、誰でも使えるようになった。またそれは、単独の計算機としての機能に止まらず、ネットワークを介して、世界中とつながっている。さらに携帯電話をはじめとするモバイル型の携帯機器は、世界中のどこに居ても自分のオフィスと同様の便利さを提供できるようになっている。こういった高速で、高性能な機能は、殆どが半導体集積回路の高性能化、高集積化によってもたらされたものであろう。

この高性能化・高集積化を支えてきた中心技術が、半導体微細加工技術である。特に半導体基板上に微細なパターンを創り出す、半導体リソグラフィ技術の進화가、それを牽引したといっても過言ではない。中でも光リソグラフィ技術の果たしてきた役割は大きい¹⁾。

この微細化のトレンドをFig. 1に示す。集積回路の開発が始まった当初は密着型露光技術が主流で、解像度も数 μm レベルであった。本格的な高解像度化は、縮小投影型の露光技術の登場で始まった。後に詳述するが、高

解像度化はまず露光光学系の改良という形で進み、さらに露光波長の短波長化がこれに続いた。またマスクの改良や露光装置の照明系の改良等、いわゆる解像度向上技

Fig. 1 Miniaturization trend of ULSI devices and exposure wavelength reduction trend.

術の導入によって、解像度の向上が進んだ。さらに最近では、光学系の開口数を、空气中露光では限界であった1.0を超える純水を用いた液浸露光技術が採用され、露光波長の3分の1程度の加工も実現されるようになっていく。

これらの技術の開発の経緯を紹介すると共に、今後さらなる高解像度化を狙ったダブルパターンニング技術、さらに次世代の技術として期待されている様々なリソグラフィ技術を紹介したい。特に次世代技術の本命として注目されているEUV露光技術について、レーザー技術の応用である光源技術との関係を中心に、その可能性と課題について議論したい。

2. 半導体リソグラフィ技術の発展

2.1 光リソグラフィ技術の開発経緯

Fig. 1で示したように、光リソグラフィ技術は、密着露光技術、等倍投影露光技術を経て、縮小投影露光技術によって、その継続的な高解像度化が始まった。投影露光技術における解像度 R は、次のレーリーの式で与えられる²⁾。

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

ここで、 λ は露光波長、 NA は投影光学系の開口数、 k_1 は、レジスト材料や露光方式により決まる比例定数である。

最初に縮小投影露光技術が導入された当時の露光波長は、高圧水銀灯の輝線であるg線(436 nm)であった。当時、要求される最小加工寸法は、縞状のパターンのピッチの半分の値として2 μm ないし1.3 μm 程度と、露光波長に比べ、十分に大きい値であった。このため、投影光学系の開口数も、 $NA:0.28$ 程度と、比較的小さなものが使われた。

リソグラフィ技術における解像度は、一般に縞状のパターンのピッチの半分、すなわちハーフピッチ(hp)で表される。以降、解像度をこのハーフピッチの値で表記する。

その後、要求される最小加工寸法の微細化と共に、まず開口数の向上が露光装置メーカーによって進められた。しかし、当時の半導体デバイスの構造は、表面の段差が大きく、深い焦点深度が要求された。このため、高NA化と共に、短波長化も模索された。最初に試みられたのは、遠紫外光(Deep UV光)であるKrFエキシマレーザー光(248 nm)の導入であったが、レジスト材料の開発が間に合わず、やはり水銀灯の輝線であるi線(365 nm)がg線に続いて、 hp 0.8 μm 時代、 hp 0.5 μm 時代に実用化された³⁾。

しかし、半導体集積回路の高集積化は続き、さらなる微細化が要求された。KrF用のレジスト材料の開発進展と共に、 hp 0.25 μm 時代にエキシマレーザー露光技術が実用化された⁴⁾。しかし、KrFの波長は248 nmであり、要求される最小加工寸法と露光波長が同じ時代となった。

これとほぼ同じ時期に、短波長化以外に解像度を向上させる、いわゆる解像度向上技術が盛んに検討された⁵⁻⁷⁾。これは、パターン原版であるマスクに工夫を加える方式や、光源形状を変形することによって、 k_1 値を小さくする技術である。この結果 k_1 値は0.8程度であったものが0.5以下にできるようになった。しかし、 k_1 値を小さくするといっても、1回の露光での原理的な k_1 値の限界は0.25である。孤立したパターンを微細にする方法は、様々な存在する。例えば、パターンを形成後、オーバーエッチングすることで、パターンを細らせることができる。しかし、パターンのピッチを微細化することはできない。このため、リソグラフィ技術の解像度の高さを示す尺度は、パターンのピッチかその半分のハーフピッチとなる。一般には、このハーフピッチ(hp)が解像度の尺度となる。

また、ウエハの上面を平坦化する化学機械研磨技術(CMP技術)の導入によって、半導体デバイスの段差が小さくなり、焦点深度の制限が緩和され、短波長化だけでなく高NA化への展望も開けたことも特記すべき事柄である。

その後、露光波長は、ArFエキシマレーザー光(193 nm)となったが、要求される最小加工寸法は hp 130 nm- hp 90 nmと、露光波長に比べてはるかに小さい。このため、次に紹介する様々な解像度向上技術の採用が進んだ。

2.2 解像度向上技術

解像度向上技術には、大きく分けて、次の2つがある。マスクを透過する光の位相を制御する位相シフト法と、照明光源の形状を制御する変形照明法である。Fig. 2に従来の露光法(通常照明)と、位相シフト法、変形照明法を比較する。位相シフト法はFig. 2 (c)に示すように、マスクの隣り合った開口部の位相を180度反転させることで、隣り合った開口部の干渉を抑制する方法である。この方法には、開口部パターンの周辺の遮光部分から位相を反転させた光を一部透過させるハーフトーン型や、遮光部分を設けず、すべて位相を反転させた透過パターンで構成するクロムレス型などのバリエーション

Fig. 2 Principles of resolution enhancement technology.

ンがある。

一方、変形照明法は、Fig. 2 (b)に示すように回折光の一部を使うことで、通常照明では透過しない大きな回折角の光を取り込むことが可能となり、解像度を向上することが可能となる。

しかし、これらの解像度向上技術では、隣り合うパターン同士の配列や、回折光の方向をそろえるため、設計上の制約も多いという問題がある。このため、パターンの形成が容易になるように、設計側が歩み寄る、いわゆるDFM (Design for Manufacturability) が必要な状況である⁸⁾。

2.3 液浸露光技術とSMO技術

ArF露光技術に続いて、さらなる短波長化としてF₂レーザー光(157 nm)を用いる技術が、一時盛んに検討されたが、レジスト材料等の光透過率向上に課題が多いため、断念された。これに変わる技術として、最終レンズとウエハの間に、屈折率の大きな液体を介在させることで、1を超えるNAを実現しようという動きが盛んになった⁹⁻¹²⁾。実用的には液体として水が用いられ、NAも1.35程度の投影レンズが実用化されている。

Fig. 3にこの液浸露光技術の原理を示す。最終レンズとレジストの間が空気の場合、全反射してしまうような、大きな角度で入射する光も、水が介在することで、レンズとの屈折率の差が小さくなり、透過することが可能となる。この結果、大きなNAの光学系を作ることが可能となり、hp 65 nmやhp 45 nmレベルのパターンの加工も、解像度向上技術を併用することで可能となった。

しかし、先にも述べたように、解像度向上技術は、パターン設計上の制約があり、複雑な形状のパターンへの適用は難しい。そこで、計算機シミュレーションを駆使してマスク形状や光源形状を最適化してしまおうという動きが、最近盛んに行われている¹³⁻¹⁵⁾。これは、計算機リソグラフィ技術と呼ばれる動きである。特にSMO (Source Mask Optimization) 技術では、マスクに様々な補助パターンを付けたり、光源形状を複雑に制御することで、設計パターンへの忠実性を高くできる。こういった動きは、本質的な解像度の向上技術ではないものの、設計形状の制限が緩和され、実効的に半世代程度の解像度向上が得られる。

Fig. 3 The principle of immersion lithography.

2.4 ダブルパターニング技術

本質的な解像度向上には、先にも述べた k_1 値の0.25を打破する必要がある。これを実現する方法としては、露光を複数回に分けることで実現できる^{16,17)}。様々な方法が提案されているが、Fig. 4にその基本的な原理を示す。Fig. 4 (a)に示すのは、露光とエッチングをそれぞれ2回繰り返す、リソエッチリソエッチ型と呼ばれるダブルパターニング法である。まず1回目の露光で、限界に近いピッチでパターンを露光し、これを何らかの方法で寸法を細らせて、パターンを下地膜に転写し、その後、レジストを塗布して、ピッチを半分ずらして、再び露光することで、倍ピッチのパターンが得られる。原理的にはこれを繰り返すことで、さらに細かいパターンの形成も不可能ではない。但し、2回目以降のパターン形成は、1回目のパターンに重ね合わせる必要があるため、重ね合わせ精度が悪いと、寸法精度が悪くなってしまうという課題があり、露光装置の重ね合わせ精度の飛躍的な向上が必要である。

この課題を解決する手法として、縞状のパターン形成というものにはほぼ限定されるものの、重ね合わせ精度に依存しない、ダブルパターニング法が提案されている¹⁸⁾。Fig. 4 (b)にその手法を示す。ここでは、通常のダブルパターニング手法と同様に、寸法を細らせた縞状のパターンをまず形成する。ここでパターンの寸法は、ピッチの3分の1とする。次いでこれにスペーサ膜を形成する。ここで膜厚をパターンピッチの3分の1とする。次いで、パターン全体をエッチングして、最初に形成したパターンの側壁部分にのみ形成した膜が残るようにする。その後、最初に形成したパターンを除去すると、当初の2倍のピッチのパターンが形成できる。この場合、露光装置の重ね合わせ精度は、パターンの寸法には影響されないというメリットがある。平面的には、最初に形成したパターンの周囲に全て側壁が残るので、これを除去するための2回目の露光が必要となり、これもダブルパターニングということになる。実際この技術は、すでに一部のフラッシュメモリーの製造に実用化されている。

これらのダブルパターニングに共通する課題は、露光回数が2回になるだけでなく、新たな多くのプロセス工程が必要であり、コストが大幅に高くなり工程が長くな

Fig. 4 Double patterning.

ることである¹⁹⁾。

3. EUVリソグラフィ技術への期待

3.1 EUVリソグラフィ技術の概要

露光波長の短波長化という意味で、13.5 nmという極端紫外光(Extreme Ultra-violet)を用いるEUVリソグラフィ技術は、解像度向上技術やダブルパターンングといった、パターン形状への制限や、複雑な工程が不要となるという利点がある²⁰⁻²²⁾。一方、EUV光というX線領域の光を用いるため、光源や光学系だけでなく、露光システム、マスク、レジスト材料等にまったく新しい技術を開発する必要がある。Fig. 5にその課題を示す。最大の課題は、13.5 nmの波長を効率的に発生させる光源の開発と、波長13.5 nmの光を効率的に反射する多層膜光学系の開発である。13.5 nmの光を効率的に透過する材料はないため、マスクも多層膜を用いた反射型となる。

3.2 EUV光源の開発

EUV光は、XeやSnのプラズマから発生する光を用いることが提案されている。プラズマの発生方式で、レーザー励起型(LPP: Laser Produced Plasma)と放電励起型(DPP: Discharge Produced Plasma)に分けられる²³⁻²⁴⁾。前者は、YAGレーザーやCO₂レーザーをターゲット物質である、XeやSnに照射して得られるプラズマから発生する光を利用する。一方後者は、XeやSnの蒸気中で放電により得られるプラズマから発生する光を利用する。これらの方式の、開発経緯をFig. 6に示す。

LPPでは、当初YAGレーザー光をXeに照射する方式が用いられてきた²⁵⁻²⁷⁾。Xeの密度を高めることにより変換効率が高められることから、ターゲットとして、Xeのクラスタジェットや、液体Xe、固体Xeがターゲットとして検討されたが、変換効率は1%程度と低かった。これに対し、SnをターゲットとしてCO₂レーザーを用いることで、変換効率を2%以上に高められるという理論的な検討結果や実験結果が報告された²⁸⁻³⁰⁾。この結果、最近ではSnのドロップレットにCO₂レーザーを照射する方

Fig. 6 Evolution of EUV light source.

式の開発が進められている^{31,32)}。

DPPでは、Xeガス中で様々なピンチプラズマの形成方式が検討された³³⁻³⁵⁾。さらにXeガスをSn蒸気することで、変換効率の向上が図られた。しかし、DPPにおける最大の課題は、電極の放熱にあり、これが出力の上限を支配していた。放熱を効率よく行う方式として、回転電極方式が提案された^{36,37)}。この方式により、放熱効率が飛躍的に向上している。さらにレーザー照射で放電のトリガーとするLA-DPP(Laser Assisted-DPP)方式が検討されている³⁸⁾。

実用的な露光装置で要求されるパワーは、少なくとも100-200 Wであり、量産用としてはさらに大きな出力が要求されている。現状ではLPP, DPP両方式共に、ピークパワーとして100 W程度が報告されているが、平均出力ではまだ数十Wである。今後、平均出力を100 Wから200 Wとすることが、当面の課題であろう。

3.3 その他のEUVリソグラフィ技術の開発状況³⁹⁻⁴²⁾

光源以外のEUVリソグラフィ技術の課題としては、光学系、マスク、レジストがある。特に光学系は、照明光学系と投影光学系から成り立ち、どちらも多層膜反射鏡から構成される。多層膜反射鏡としては、Mo/Siの多層膜が用いられ、その最大の反射率は70%程度である。従って反射鏡を2枚使っただけで光強度は半分になってしまう。均一で広い面積を照明する照明光学系で6枚程度、高精度で高解像な投影像を得るために少なくとも6枚の反射鏡が必要となる。さらにマスクも多層膜反射マスクを使うため、13回程度多層膜反射が必要となる。この結果、光源から出た光は、100分の1程度しかウエハに到達しない。

現在研究開発に用いられているフルフィールド露光装置では、NA:0.25であり、6枚系の光学系が用いられている。従来のArF露光用光学系が30枚程度のレンズ、すなわち60面程度の光学面が使われているが、10分の1の枚数でより高い解像度を得るため、1枚の反射面により多くの機能を持たせる必要があり、超高精度な非球面光学系が用いられている³⁹⁾。

マスクの最重要課題は、ブランク(吸収体パターン

Fig. 5 Issues of EUV lithography.

形成前の多層膜が形成された状態のマスク基板)における位相欠陥の検出にある。基板上の異物や傷の上に多層膜が形成されたり、多層膜形成中に異物が取り込まれたりした場合、完成した多層膜の表面はほぼ平滑化されてしまうことが多いため、多層膜の上からは通常の光では欠陥を検出できない。このため、こういった欠陥の検出には露光波長での欠陥検出が必要となる⁴⁰⁾。

レジスト材料としては、高感度、高解像度、低LWR (Line Width Roughness)を同時に実現することにある。材料としては化学増幅型レジストが用いられ、最新のデータとして20 nm程度の解像度、15 mJ/cm², LWR: 5 nm程度が得られている。化学増幅系材料では、酸の拡散距離の制御や反応基の均一性の向上が今後の課題である⁴¹⁻⁴³⁾。

露光装置の開発は、現在ASML社が、実用機の開発を提示しており、2010年秋にも6台のプレ量産機のデバイスメーカー等への納入を発表している⁴⁴⁾。さらに高NA化し、スループットを向上した(すなわち光源の出力を大きくした)装置の開発を明言している。一方ニコンは、当面ArF液浸露光とダブルパターニング技術の進展で対応すること。EUVリソグラフィ技術の採用はその先との考えで、hp 16 nm以降への導入を考慮して、光学系の高NA化を進めている⁴⁵⁾。

4. まとめ

リソグラフィ技術は、半導体集積回路の高集積化の原動力として発展してきた。特に光リソグラフィ技術の進展は非常に顕著であり、現在もリソグラフィ技術の主流である。しかし、解像度の限界も近く、解像限界を突破するため、DFMと呼ばれる設計側からの歩みよりや、マスクから光源まで最適化するSMO技術が重要となってきた。さらに本質的な高解像度化を実現するため、ダブルパターニング技術なども採用され始めているが、コスト的な課題も大きい。この状況を突破する技術としてEUVリソグラフィ技術が期待されている。しかし、従来技術と大きく異なるX線領域の光を用いるため、開発課題も多い。特にレーザー技術を駆使した大出力光源技術の開発が、その実用化の鍵を握っているといっても良い。

謝 辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の研究プロジェクトとして行われたものである。

参考文献

- 1) S. Okazaki: J. Vac. Sci. Technol. B **8** (1991) p.2829.
- 2) 例えば久保田 宏著: 光学, 岩波書店 (1964).
- 3) 長谷川 昇雄, 柳沢 寛, 黒崎 利栄, 橋本 哲一: 電子通信学会論文誌 **J66-C** (1983) p.1084.
- 4) V. Pol, J. Bennewitz, G. C. Escher, M. Feldman, V. A. Firtion, T. E. Jewell, B. E. Willcomb, and J. T. Clemens: *Proc. SPIE* **633** (1986) p.6.
- 5) M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, and R. A. Simpson: *IEEE ED-29* (1982) p.1828.
- 6) 渋谷 真人: 透過照明用被投影原版 特公昭 62-50811.
- 7) 堀内 敏行, 鈴木 雅則: 第32回応用物理学学会講演予稿集 **2** (1985) 294.
- 8) L. Liebman, Z. Baum, I. Graur, and D. Samuels: *Proc. SPIE* **6925** (2008) p.69250C.
- 9) W. W. Tabarelli and E. Lobach: European Patent 0023231 (1979).
- 10) 高梨 明紘, 原田 達男, 明山 正元, 近藤 弥太郎, 黒崎 利栄: 特願昭 56-37977 (1981).
- 11) S. Owa and H. Nagasaka: *Proc. SPIE* **5040** (2003) p.724.
- 12) B. Streefkerk, J. Baselmans, W. G. Ansem, J. Mulken, C. Hoogendam, M. Hoogendorp, D. G. Flagello, H. Sewell, P. Graupner: *Proc. SPIE* **5377** (2004) p.285.
- 13) A. E. Rosenbluth, D. O. Melville, K. Tian, S. Bagheri, J. T. Azpiroz, K. Lai, A. Waechter, T. Inoue, L. Ladanyi, F. Barahona, K. Scheinberg, M. Ssakamoto, H. Muta, E. Gallagher, T. Faure, M. Hibbs, A. Trichtkov, and Y. Granik: *Proc. SPIE* **7274** (2009) p.727409.
- 14) A. Poonawala, W. Stanton, and C. Sawh: *Proc. SPIE* **7640** (2010) p.76401M.
- 15) J. Zimmermann, P. Gräupner, J. T. Neumann, D. Hellweg, D. Jürgens, M. Patra, C. Hennerkes, M. Maul, B. Geh, A. Engelen, O. Noordman, M. Mulder, S. Park, and J. De Vocht: *Proc. SPIE* **7640** (2010) p.764005.
- 16) S. D. Hsu, W. P. Corcoran, M. Eurlings, W. T. Knoe, T. L. Laidig, K. W. Nampler, S. Roy, X. Shi, C. M. Hsu, J. F. Chen, J. Findors, R. J. Socha, and M. V. Dusa: *Proc. SPIE* **4691** (2002) p.476.
- 17) C.-M. Lim, S.-M. Kim, Y.-S. Hwang, J.-S. Choi, K.-D. Ban, S.-Y. Cho, J.-K. Jung, E.-K. Kang, H.-Y. Lim, H.-S. Kim, and S.-C. Moon: *Proc. SPIE* **6154** (2006) p.615410-1.
- 18) W.-Y. Jung, C.-D. Kim, J.-D. Eom, S.-Y. Cho, S.-M. Jeon, J.-H. Kim, J.-I. Moon, B.-S. Lee, and S. K. Park: *Proc. SPIE* **6156** (2006) p.61561J-1.
- 19) G. Hughes, L. C. Litt, A. Wuest, and S. Palalyanur: *Proc. SPIE* **7028** (2008) p.70281P.
- 20) 木下 博雄, 金子 隆司, 武井 弘次, 竹内 信行, 石原 直: 第47回応用物理学学会講演予稿集 **2** (1986) 322.
- 21) H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii, and Y. Torii: J. Vac. Sci. Technol. B **7** (1989) 1648.
- 22) J. E. Bjorkholm, J. Boker, L. Eichner, R. R. Freeman, J. Gregus, T. E. Jewell, W. M. Mansfield, A. A. MacDowell, E. nL. Raab, W. T. Silfvast, L. H. Szeto, D. M. Tennant, W. K. Waskiewicz, D. L. White, D. L. Windt, O. R. Wood II, and J. H. Bruning: J. Vac. Sci. Technol. B **8** (1990) 1509.
- 23) H. Fiedorowicz, A. Bartnik, Z. Patron, and P. Parys: *Appl. Phys. Lett.* **62** (1993) 2778.
- 24) U. Stamm et al: 3rd International Workshop on EUV Lithography (2001).
- 25) G. D. Kubiak, L. J. Barnerdez, K. Krenz, and W. C. Swertt: *Proc. SPIE* **3676** (1999) p.669.
- 26) H. Fiedorowicz, A. Bartnik, H. Daido, I. W. Choi, M. Suzuki, and S. Yamagami: *Opt. Commun.* **184** (2000) 161.
- 27) B. A. M. Hanssen, M. Berglund, O. Hamberg, and H. M. Hertz: J. Appl. Phys. **95** (2004) 4432.
- 28) H. Tanaka, A. Matsumoto, K. Akinaga, A. Takahashi, and T. Okada: *Appl. Phys. Lett.* **87** (2005) 041503.
- 29) K. Nishihara, A. Sasaki, A. Sunahara, and T. Nishikawa: *EUV Sources for Lithography*, V. Bakshi Ed. (SPIE Bellingham 2005) Chap. 11.
- 30) 西村 博明他: プラズマ・核融合学会誌 **80** (2004) 325.
- 31) D. C. Brandt, I. V. Fomenkov, A. I. Ershov, W. N. Partlo, D. W. Myers, R. L. Sandstrom, N. R. Böwering, G. O. Vaschenko, O. V. Khodykin, A. N. Bykanov, et al.: *Proc. SPIE* **7636** (2010) p.763611.
- 32) H. Mizoguchi, T. Abe, Y. Watanabe, T. Ishihara, T. Ohta, T. Hori, A. Kurosu, H. Komori, K. Kakizaki, A. Sumitani, et al.: *Proc. SPIE* **7636** (2010) p.763608.
- 33) V. Fomenkov, R. M. Ness, J. R. Oliver, S. T. Melnchuk, O. V. Khodvkin, N. R. Böwering, C. L. Rettig, and J. R. Hoffman: *Proc. SPIE* **5037** (2003) p.807.

- 34) Y. Teramoto et al: Symp. on Pulsed Power and plasma application (2003) p82-87.
- 35) J. Pankert, K. Bergmann, J. Klein, W. Neff, O. Rosier, S. Seiwert, C. Smith, S. Probst, D. Vandrevange, G. Siemons, et al.: *Proc. SPIE* **5374** (2004) p.152.
- 36) V. M. Borizov, et al.: Russian Patent Application 2002120301 (2002).
- 37) J. Pankert, R. Apetz, K. Bergmann, M. Damen, G. Derra, O. Franken, M. Janssen, J. Jonkers, J. Klein, H. Kraus, et al.: *Proc. SPIE* **6151** (2006) p.61510Q.
- 38) M. Yoshioka, Y. Teramoto, P. Zink, G. Schriever, G. Niimi, and M. Corthout: *Proc. SPIE* **7636** (2010) p.763610.
- 39) M. Lowisch, P. Kuerz, H-J. Mann, O. Natt, and B. Thuering: *Proc. SPIE* **7636** (2010) p.763603.
- 40) T. Terasawa, T. Yamane, T. Tanaka, O. Suga, T. Kamo, and I. Mori: *Proc. SPIE* **7636** (2010) p.763602.
- 41) S. Tarutani, H. Tsubaki, H. Takahashi, T. Itou, K. Matsunaga, G. Shiraishi, and T. Itani: *Proc. SPIE* **7639** (2010) p.76391N.
- 42) T. H. Fedynyshyn, R. B. Goodman, A. Cabral, C. Tarrio, and T. B. Lucatorto: *Proc. SPIE* **7639** (2010) p.76390A.
- 43) R. Gronheid, A. V. Pret, B. Rathasack, J. Hooge, S. Scheer, K. Nafus, H. Shite, and J. Kitano: *Proc. SPIE* **7639** (2010) p.76390M.
- 44) C. Wagner, N. Harned, P. Kuerz, M. Lowisch, H. Meiling, D. Ockwell, R. Peeters, K. van I.-Schenau, E. van Setten, J. Stoeldraijer, et al.: *Proc. SPIE* **7636** (2010) p.76361H.
- 45) T. Miura, K. Murakami, H. Kawai, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada, and Y. Ohkubo: *Proc. SPIE* **7636** (2010) p.76361G.

レーザーワード

縮小投影型露光 (reduction projection exposure)

原版となるマスク(レチクルとも呼ばれる)を実際の回路寸法の数倍(一般的には4倍)の大きさで作成し、これを、縮小投影光学系を用いて、半導体等の基板上に投影する方法を縮小投影型露光と呼ぶ。この時、マスクと基板を静止させ、マスク全体の回路図形を一度に投影露光し、露光後に基板を載せたステージを一定距離(一般的には回路の大きさで規定される距離)移動し、再び露光を行う方式の露光装置をステッパと呼ぶ。これに対して、マスク基板と半導体基板を、相対的に縮小比に応じ

た速度でスリット状の露光領域を同期走査しながら露光し、走査が終わったら、再び反転走査して露光する、同期走査方式の露光装置をスキヤナと呼ぶ。前者に比べ、後者は同じ露光領域を露光する場合、投影光学系が小さくできることや、焦点合わせや重ね合わせにおける自由度が高いため、高精度化しやすい等の理由から、最先端の露光装置としては、後者が用いられることが多い。

(岡崎 信次)