

0.1 μm 世代以降の SR 縮小リソグラフィ

木下 博雄

姫路工業大学高度産業科学技術研究所*

SR Lithography for Manufacturing Integrated Circuit beyond 100 nm

Hiroo KINOSHITA

Himeji Institute of Technology, Laboratory of Advanced Science and Technology

EUV lithography is a powerful tool for printing features of 0.1 μm and below; and in Japan and the USA, there is a growing tendency to view it as the wave of the future. With Schwarzschild optics, replication of a 0.05- μm pattern has been demonstrated in an area 25 μm square. With a two-aspherical-mirror system, a 0.15- μm pattern has been replicated in a ring slit area of 20 mm \times 0.4 mm; and a combination of this system with illumination optics and synchronized mask and wafer stages has enabled the replication of a 0.15- μm pattern in an area of 10 mm \times 12.5 mm. Furthermore, in the USA, the Sandia National Laboratory has succeeded in fabricating a fully operational NMOS transistor with a gate length of 0.1 μm .

The most challenging problem is the fabrication of mirrors with the required figure error of 0.28 nm. However, owing to advances in measurement technology, mirrors can now be made to a precision that nearly satisfies this requirement.

Therefore, it is time to move into a rapid development phase in order to get a system ready for practical use by the year 2004. In this paper, the status of individual technologies is discussed in light of this situation, and future requirements for developing a practical system are considered.

1. はじめに

1970年頃に1kビットのDRAMの生産が開始されて以来、集積度は3年に4倍の速度で増大してきており西暦2007年には16 GbitのDRAMの生産が予測されている。図1にリソグラフィの年次推移を示すが、技術的には等倍転写から縮小転写へと、そして光源の波長がG線(436 nm)からi線(365 nm), KrF(248 nm)と短波長化をたどってきている。このように露光波長を短くすることによって、また種々の新しい技術の導入によって光でも0.18 μm 程のパターンをもつデバイス製作の可能性が明らかになってきている。しかしながら、その先の微細化技術はいまだ混沌としており、光に代わるX線あるいは極端紫外光によるリソグラフィ技術の開発が急ピッチで進められている。

極端紫外線露光(Extreme Ultraviolet Lithography)は原理的には紫外線縮小リソグラフィと同じであり、屈折レンズのかわりに軟X線領域で高い反射率をもつ多層膜をミラー面に形成した反射縮小光学系を用いることを特徴と

する。マスクには4-5倍の拡大マスクを用いることができ、かつそのマスクには多層膜を形成したバルクの基板を用いるためSR照射による熱歪み等の影響を無視でき、高精度なパターン形成精度を確保できる。また、理論的には短波長化と高NA化とにより解像度を無限に小さくでき、0.1 μm から0.01 μm までのパターン形成が可能である。

EUVLの研究は1984年頃よりNTTにおいて実験的検討が開始され、1986年には多層膜を形成したシュバルツシルト光学系により12.5 nmの波長で、はじめて1/8に縮小された2 μm の2次元縮小パターン形成が確認された¹⁾。1989年には同光学系を用い、0.5 μm のパターン形成を確認し、軟X線領域での多層膜反射鏡を用いた縮小リソグラフィの可能性が明かにされた²⁾。

その後1990年には、AT & Tが波長14 nm、縮小率1/20のシュバルツシルト光学系で0.05 μm のパターンを実証した³⁾。

これらの成果を契機に日米での本格的な検討が進み、日本では日立製作所およびニコンにおいても実験的検討を進

* 姫路工業大学高度産業科学技術研究所 〒671-2201 姫路市書写2167
TEL 0792-67-4997 FAX 0792-67-4999 e-mail kinosita@lasti.himeji-tech.ac.jp

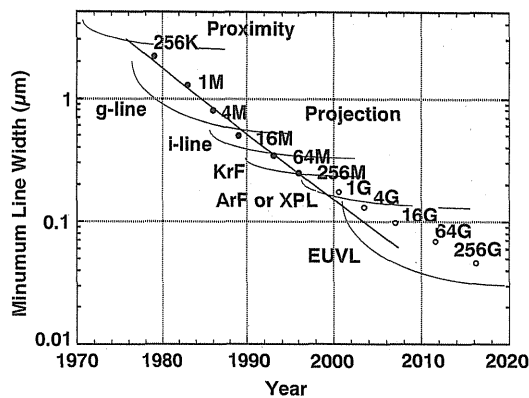


Figure 1. Lithography Trend.

め、1993年から1994年頃にかけてそれぞれ $0.05\ \mu\text{m}$ ほどのパターン形成を確認している。NTTでは1992年から実用露光領域(20 mm角)をもつ走査機構付きの実験機を立ち上げ、1995年には $10\ \text{mm} \times 12.5\ \text{mm}$ の大面积化を達成するとともに $0.15\ \mu\text{m}$ の微細パターン形成を確認している。

一方、米国では1993年よりLLNL, SNL, AT & Tを中心にプロジェクトがスタートし、位置合わせを除く要素技術すべてに目的研究が実施され、3.に述べる数多くの成果を達成し、“装置化に支障なし”との判断を得ている。とくに、アライメント機能をもつシステムを1995年に構築し⁴⁾、i線とのハイブリッド露光で $0.1\ \mu\text{m}$ のゲート長をもつNMOSトランジスタの試作に成功している⁵⁾。これらの成果を基に、1996年秋から開始されたUS-Projectの第2ステージでは、インテル、AMD、モトローラ3社を中心としてEUV-LLC社を設立し、国立研究所と共同で実用的な露光領域を持つ実験機を2000年までに立ちあげ、2004年にはPilot lineの導入を狙いとした実用機を完成させ $0.1\ \mu\text{m}$ デバイス技術の検討を進める計画を持っている。

以下では最近の本技術の現状と今後の課題について報告する。

2. 露光方式の概要と微細化の可能性

この露光方式は図2に示す構成となる。すなわち、5-13 nmの波長を発光する放射光源あるいはレーザープラズマX線源、照明光学系、反射型マスク、縮小光学系、ウェハとからなる。光学系には多層膜を形成した反射型光学系が用いられるが、この場合収差を最小とする領域は光軸を中心とする同心円状(リングフィールド)となるため、露光領域を拡大するためにはマスクとウェハを同期移動させねばならない。縮小光学系には図2に示す非球面2枚からなる光学系⁶⁾、および非球面3枚からなる光学系が主として検討されている。2枚光学系は最小ミラー枚数で回折限界性能(13 nm, NA0.1で解像度 $0.065\ \mu\text{m}$)を得ることが可能であるが、歪みが2-3%と大きいために走査時にパタンのぼけを生じる。リングフィールドの幅を数10

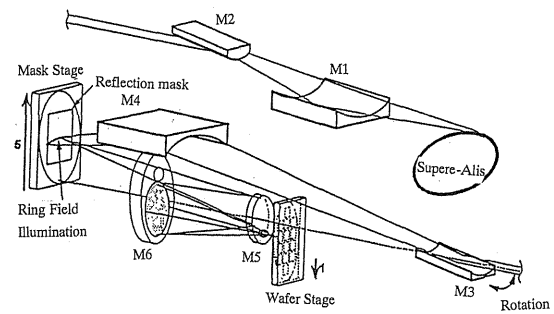


Figure 2. Schematic illustration of two-aspherical mirror system.

μm 程に狭めれば走査時のぼけ量を小さくすることができるが、実用的なスループットを確保することが難しい。最近では光の強度が増し、かつ多層膜の反射率も60%以上が容易に得られることから、非球面3~4枚の光学系が採用されつつある。

縮小光学系の理論的解像度 d はフランホッフ(Fraunhofer)の式(1),

$$d = \lambda / (2NA) \quad (1)$$

および、焦点深度 fd はレーレ(Rayleigh)の式(2)

$$fd = \lambda / (NA^2) \quad (2)$$

で規定される。ここで、 λ は波長、NAは光学系の開口数である。

図3に波長に対する解像度および焦点深度の特性を示す。

微細化は露光波長の短波長化とNAの拡大化によって実現できる。図から明らかなように同一波長でもNAを大きくすることにより解像度が向上する。また、短波長化によって同一NAをもつ光学系でも解像度の向上を図ることができる。

例えば、NA0.1の光学系では露光波長13 nmの解像度 $0.065\ \mu\text{m}$ 、波長5 nmで $0.025\ \mu\text{m}$ が可能である。この時の焦点深度はそれぞれ $1.2\ \mu\text{m}$ 、 $0.4\ \mu\text{m}$ となる。実際には5 nmの波長での直入射反射率は10%以下であり、高効率な光学系を作るのは難しい。

11.5 nmの波長領域ではMo/Be多層膜で反射率60%以上がすでに得られているが、13 nmとの波長差が少ないためその微細化の効果が小さい。直入射で40%以上の反射率が期待できる7 nmの波長とすればNA0.1の光学系でも $0.035\ \mu\text{m}$ までのパターン形成が可能であり、NA0.2の光学系を用いれば $0.02\ \mu\text{m}$ 以下が可能となる。

さらなる微細化は最近の光露光技術で用いられている位相シフトマスクや斜入射照明法を用いれば向上可能である。

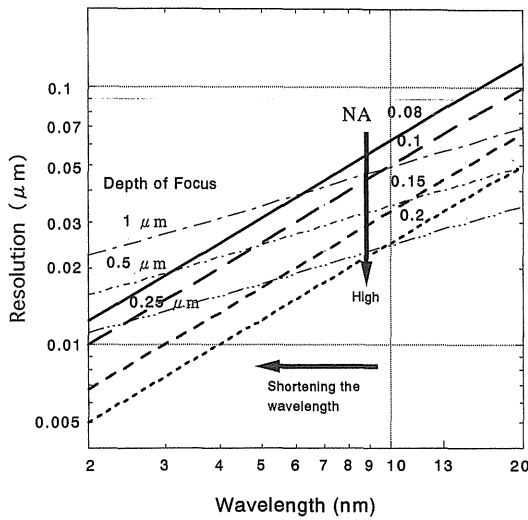


Figure 3. Diffraction limited resolution v.s. Exposure wavelength and Numerical Aperture.

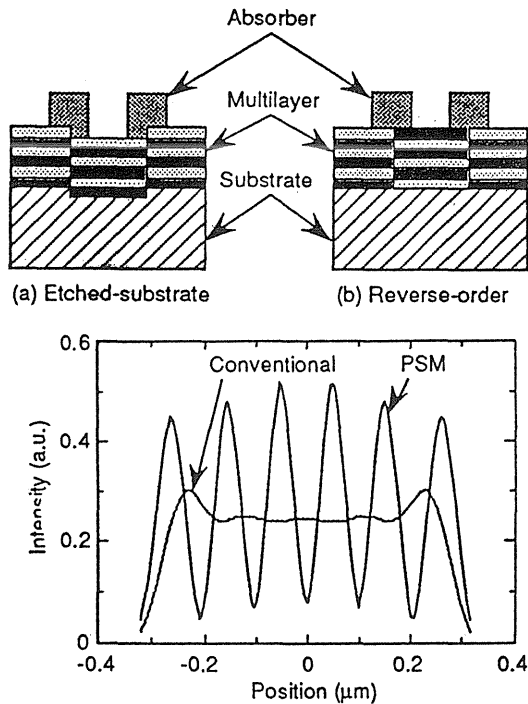


Figure 4. (a), (b) Schematic of alternating PSMs. (c) Aerial image of 0.05 μm line-and-space patterns obtained with an alternating PSM and a conventional mask.

図4は日立中研の伊東らが検討した位相シフトマスクの構造(a)とその効果(b)を示す。NA0.08、波長13 nmでの回折限界性能は0.08 μmであるが、位相シフトマスクを用いることにより、0.05 μmのパターン形成の可能性が明らかにされている⁷⁾。

このように本技術の適用露光波長を7 nmまでとすると、およそ0.01 μmまでの微細化が可能となり、0.1 μmから0.01 μmの数世代に亘って本方式が用いることができ

る。最近では0.01 μm程のゲート長をもつSiデバイスの製作可能性が示されており、将来の量産技術として唯一対応可能な露光方式と考えられる。

3. 露光技術の現状および課題

米国 SEMATEC のワーキンググループが作成⁸⁾しているリソグラフィのロードマップによれば、EUV リソグラフィの導入は2006年0.1 μmからと考えられている。このため、パイロットライン機試作の判断を必要とする2001年を目標に要素技術の開発を進めている。以下では各要素技術の詳細を述べる。

3.1 光源

光源としての要求値はいかなるサイズのデバイスをいかなるスループット(枚数/時)で製作するかで決められる。表1にSIAロードマップを基に設定した0.1 μm世代での要求値を示す。表2には表1を基に求めたウェハ面上の光強度、照明光学系および露光光学系での効率、最終的な光源に要求される光強度について示す。これから明らかなように表1の仕様を満足させるためには6.3 Watts必要となる。

図5にニュースパルの波長にたいする光束密度を示す。この図から13 nmでの光束密度は 1×10^{11} ほどであり、ミラーによる集光角を水平40 mrad、垂直3.9 mrad、電流値を500 mAとすると0.75 Wattsとなる。表1の仕様を満足させるためには1桁光束密度を大きくせねばならない。

Table 1. Specification of 0.1 μm generation machine

Resolution	0.1 μm
Depth of focus	1 μm
field size	26 mm × 44 mm
Wafer diameter	400 mm
Throughput	40 wafers/hour

Table 2. Requirements of Source Power

EUV power incident on wafer	115 mW
wafer settling time	10 s
Exposure time per field	0.5 s
Global alignment time	0.5 s
Resist sensitivity	5 mJ/cm ²
Transmission of mask and projection optics	0.135
Number of mirrors	4
Mirror reflectivity	0.67
mask reflectivity	0.67
Transmission of illumination optics	
Number of mirrors	4
Reflectivity of mirror	0.85
Filter transmission	0.5
Net condenser efficiency	0.5
EUV Power	6.3 Watts

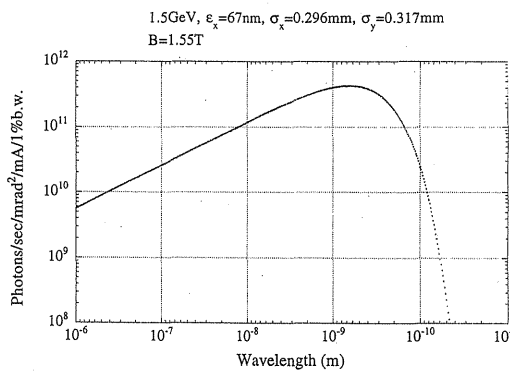


Figure 5. Synchrotron radiation spectra of New Subaru. Flux density vs. Wavelength

このため、集光角を大きくする、ウィブラー光の利用等の検討が必要となる。もちろん、SPring-8等の大型放射光の場合にはニュースバルに比べて1桁以上光束密度が大きいので、スループットを満足させることができるが、建設コストが大幅に増大する。

一方、レーザー光を励起源とするX線源の開発が進められている。レーザープラズマX線源(LPX)の場合にはSRに比較して設置面積が小さく、しかも光源と露光装置とが1対1に対応するので、現在の半導体製造ラインとの親和性が高い。X線の発生効率率は現状では1%程度であるため、励起レーザーの平均出力として1kW程度が必要となる。ミラーへの照射ダメージ、照度むらを低減させるためには1パルス当たりのエネルギーを0.5J程とし、繰り返し数を2~3KHzとする研究が進められている。

LPXの開発ではプラズマからの飛沫粒子による照明系の損傷を低減させることが課題である。デブリーの低減法として、ターゲットの質量をできるだけ小さくする、He等希ガス雰囲気、高速回転スリットによるチョップ等が検討されている。最近では固体金属に替えてXeガスをクライオ温度まで冷却した固化Xeをターゲットとした検討も進められており、14nmの波長の発生効率率0.8%が確認されているが、氷の破片が光学系に衝突した際の多層膜へのダメージが危惧されている⁹⁾。

この問題を解決する方法として図6に示すガスジェットターゲットを開発している。超音速ノズルから真空中にXeガスをパルス状に噴出し、断熱膨張によりXeのクラスターを発生させて、これをターゲットとしている。変換効率率は0.6%とまだ低いがデブリーを完全に除去することができる¹⁰⁾。

3.2 縮小投影露光光学系

露光光学系は照明系と縮小光学系からなる。大面積露光用の露光光学系の場合としては2枚から4枚の非球面ミラーから構成される案が提案されている。図7(a)の案は2枚からなる非球面光学系であり、NA0.1で解像度0.06 μm

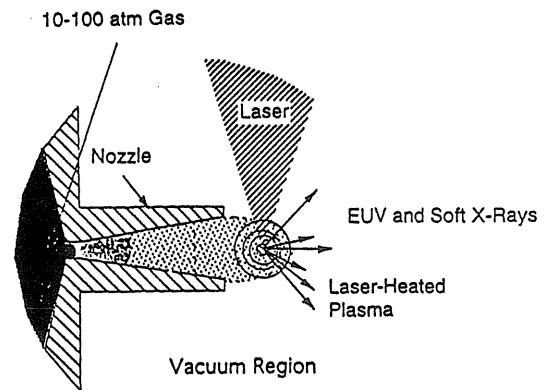
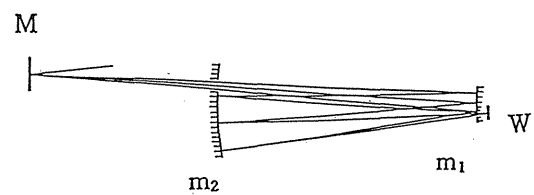
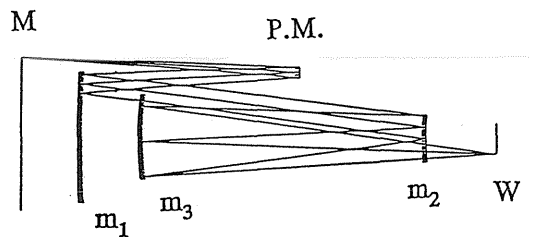


Figure 6. Schematic diagram of the supersonic cluster source.



(a) Two-aspherical mirror optics designed by NTT.



(b) Three-aspherical mirror optics designed by H.I.T.

Figure 7. Imaging optics for EUVL.

を得ている¹¹⁾。0.1 μmの解像性能に対する焦点深度は1.6 μm程である。この光学系は2枚の非球面の曲率半径をほぼ等しくすることで像面湾曲を無視することができ、かつミラーへの入射角を2~5度以下として最小ミラー枚数で収差の低減を可能とした案である。しかしながら、大面積露光時にはマスクとウェハを走査せねばならないが、リングフィールド内の歪みが無視しえないために走査時にパターンのぼけを生じる。このため、リングフィールドの幅を小さくし、ぼけ量を許容値以下とせねばならない問題をもつ。

走査時の歪みを小さくした案として図7(b)の3枚の非球面を用いた光学系が提案されている。この例では一枚の平面ミラーを入れ、偶数枚とし、走査時のマスクとウェハの干渉を避けている。解像度も0.065 μmの回折限界性能が得られており、ウェハ面の露光幅として1mm以上確保できている¹²⁾。

照明光学系は光源すなわちSRかLPXかによって異なるが、マスク面上でどれだけ一様かつ露光光学系のもつNAに見合った照明が得られるかが課題である。とくに

SR を光源とした場合の照明系は光源のエミッタンスが小さく、かつ水平と垂直方向の開き角が桁以上も異なるため、均一な NA をもつ大きな照明領域（例えばマスク面上で $125 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ）を得ることが困難である。LPX の場合には楕円ミラーを用いることによって効率よく集光できる。

図 2 に SR を光源としたときの照明系案を示す。図の凹のトロイダルミラー M1 によって光源点でのビームサイズ $2.4 \text{ mm}\phi$ の光を横 40 mrad 、縦 4 mrad 集め、凸のトロイダルミラー M2 によって平行光束とし、シリンジカルミラー M3 と凹のトロイダルミラー M4 とによって縦を 40 mrad に拡大する。これによって縦横とも均一な NA が得られるが、マスク面でのビームサイズはエミッタンスが一定であることから、縦のビームサイズが $1/10$ の横 2.4 mm 、縦 0.24 mm となる。このビームを M3 ミラーを回転させてマスク面上で $100 \text{ mm} \times 0.24 \text{ mm}$ のリングフィールド照明が実現できる。この案はマスク面上でクリテ

ィカル照明とした案であるが、光源むら等の影響を避けるため M3 ミラーの回転とステージの同期走査とによって照度むらを平均化させている¹³⁾。しかしながら、この方法で表 1 に示す露光効率（スループット）を満足させるためには M3 ミラーの回転数を 10000 RPM とせねばならない。このため、マスク面 ($130 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) を一様照度で一様な NA で照明する光学系の開発が必要となる。この場合には光露光で用いられているようなフライアイレンズのように擬似的に光源サイズを大きくする光学素子の開発が必要となる。

縮小露光光学系を構成する非球面ミラーには高い加工精度が要求される。一般には Rayleigh の式(3)および Marechal の式(4)によって規定される。すなはち、ミラー枚数を n とすると 1 枚当たりの形状精度は

$$\sigma = \lambda / 4n \quad (\text{PV 値}) \quad (3)$$

$$\sigma = \lambda / 28 \sqrt{n} \quad (\text{rms 値}) \quad (4)$$

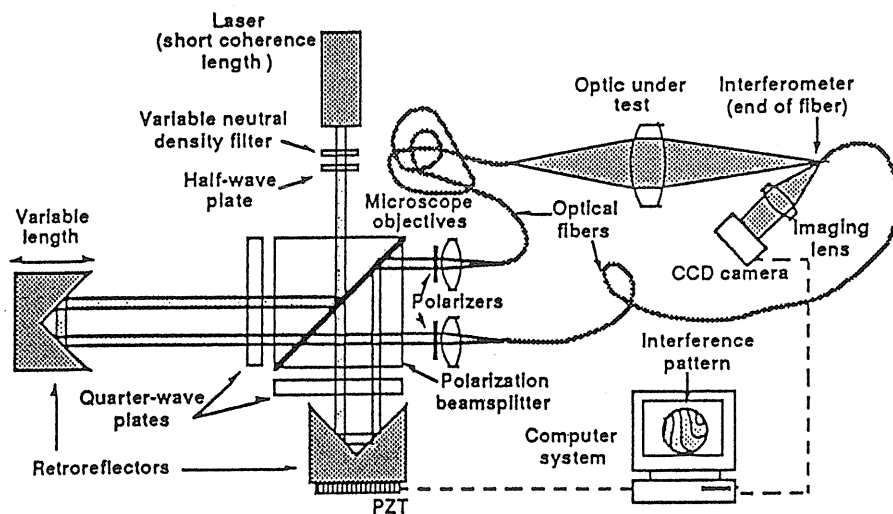
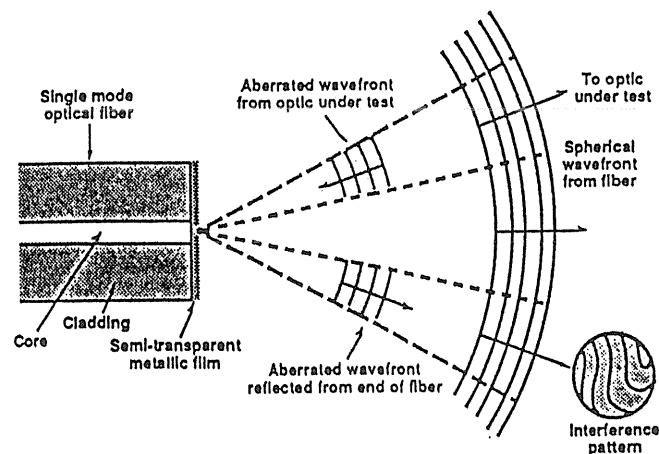


Figure 8. Point diffraction interferometer using glass fiber developed by LLNL group.

となる。例えば図7(b)に示す3枚系で波長14 nm での回折限界性能を得るためにはp-v値で1 nm以下, rms値で0.28 nmとせねばならない。

形状精度の評価方法としては従来干渉法 (ZYGO社), 走査法 (Bauwer社, Chapman社) が用いられているが, 分解能はせいぜい5 nm程であった。最近非球面の評価技術として大きな進歩がみられた。

図8はローレンスリバモア国立研究所がグラスファイバを用いた干渉系を開発した¹⁴⁾。これは原理的には Point diffraction interferometer であるが, グラスファイバを用いたことにより空間的自由度が高まり, ミラー単体の形状精度ばかりでなく露光光学系の波面収差を容易に求められる。原理は図(a)に示すようにレーザ干渉系の光をグラスファイバに導き, その端面を鏡面に仕上げ, ファイバ端面から発生する球面波を被測定物に照明し, その反射波面をグラスファイバの端面のミラー面で再度反射させ, この波面を所定の時間遅れで発生する参照波面と干渉させることにより被測定物の形状精度および光学系の波面収差を求める方法である。この方法で $\lambda/1700$ の形状精度を得ている。

また, 図9にローレンスバークレー国立研究所が開発を進めている露光波長光を用いたPDI干渉計を示す。光源にはアンジュレタ光を用い透過型回折格子を走査することにより高次光も加え, 測定精度を向上させている¹⁵⁾。この干渉系を用いてシュバルツシュルツ光学系の合わせ評価を進め, 0.1 nm以下の性能を得ている。

これらの非球面評価技術の進歩により加工精度も向上し, Tinsley社では従来法であるSmall Toolを用いた計算機制御研磨技術とCGH (Computer Generated Holo-

gram)により形成した参照面からなるレーザ干渉計により非球面形状精度0.3 nm(rms)を達成している。

3.3 反射型マスク

マスクには反射型マスクが用いられる。マスク構造としては, 多層膜をドライエッチングしたサブトラクティブ型と, 多層膜の上に吸収体を形成したアディティブ型が検討されているが, 欠陥修正の点からアディティブ型が有利と考えられる。

図10にアディティブ型マスクの製作プロセスを示す¹⁶⁾。転写パターンを最小寸法を0.1 μm , 光学系の倍率を1/5とすると, マスクの最小寸法は0.5 μm となる。吸収体の厚さを0.1 μm としてもアスペクト比は0.2であり, 吸収体のドライエッチングは比較的容易である。吸収体材料としてはW, Ta, Cr等が容易に高コントラストが得られる。

ここでの課題は欠陥のリペアと多層膜の無欠陥化である。吸収体の欠けパターンの修正はイオンビームを用いたリペア装置によって可能となる。膜の堆積は比較的容易であるが, ミーリングによる加工の場合には照射エネルギーによって多層膜を破壊する可能性もあり, エッチングストップ層の材料, 構成等の検討が必要である。例えば多層膜の最上層にSi層(35 nm)を設ける方法が提案されている。

無欠陥化としてはローレンスリバモア国立研究所がパーティクルフリーのイオンビームスパッタ装置を開発し, 膜形成を進めている。装置をクラス1の仕様とし, サンプルの出し入れにロボットを導入するなどしてディフェクトの低減を図り, 0.02個/ cm^2 以下を実現している¹⁷⁾。今後はAt wavelengthでの欠陥, 位相変化等の評価が必要となる。

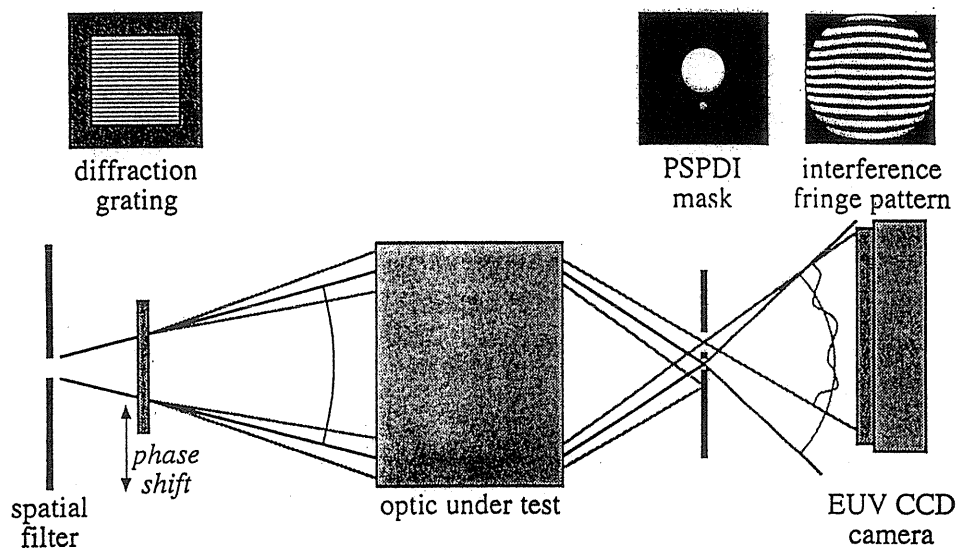


Figure 9. Phase-shifting point diffraction interferometer using exposure wavelength of soft X-ray being developed by LBL group.

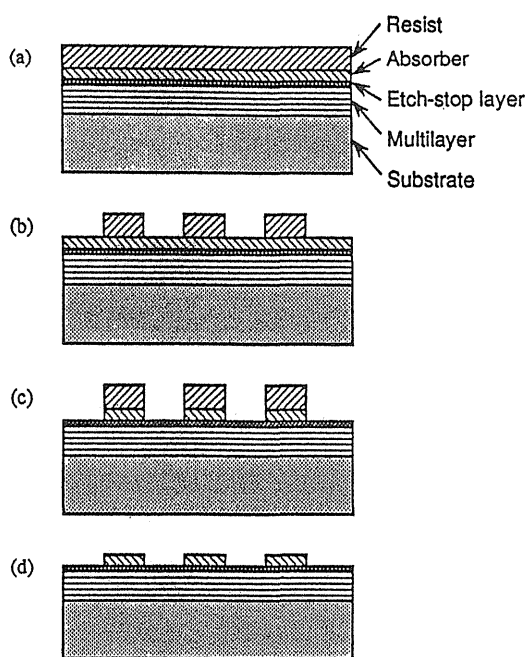


Figure 10. Process flow of an additive-type mask.

3.4 多層膜形成

多層膜は重元素と軽元素の組み合わせで構成され、利用する波長近傍で軽元素の吸収の小さな材料との組み合わせのものが製作されており、とくに波長13 nmではMo/Si, 11.4 nmではMo/Be, 7 nmではRh/B4Cが反射率が高く、それぞれ直入射反射率で65%, 68%, 20%を示している¹⁸⁾。膜形成精度としては100 mm直径のSiウェハ全面でのMo/Si多層膜の反射率も65%±0.37%, 周期長の変動も±0.3 Åと実測されている。技術的な課題は光学系の形状に変化を与えない程度に多層膜の膜応力を小さくすることである。通常の生成プロセスでの応力は400 MPaほどの圧縮応力を示しており、200 mmφ、厚さ50 mmのガラスミラーを10 nm程変位させる。応力の低減法として各種提案されているが¹⁹⁾、反射率と応力の両者を満足させるよう最適化を図らねばならない。

3.5 レジストプロセス

プロセスで要求されるレジスト膜厚は、レジストパターンの3倍程度必要とされている。例えば、0.1 μmパターンに対しては0.3 μm以上の膜厚が必要となる。ところが13 nmの波長光は物質への吸収係数が大きく、入射エネルギーがレジスト内で減衰し1/eに達したときの浸入深さは高分子系のレジストの場合でも0.2 μm程である。このため表面イメージングによるパターン形成が必須となる。表面イメージングには多層レジスト、シリルカ反応、グラフト重合反応、表面修飾、薄膜ハードマスクといった方法が検討されているが、寸法制御性、感度、ドライエッチング耐性、欠陥、コスト等を総合的に満足するプロセスを開発せねばならない。

シリルカプロセスはレジストとしては単層で良く、有望な技術と考えられている。寸法制御性を良くするためにシリル化層を極力薄くしてシリル化層の横方向の拡散を抑制するなどが検討されている²⁰⁾。

一方、パターン寸法が0.1 μm以下になるとエッジのラフネスが顕著に現れてくる。0.1 μmパターンでCD値を10%とするとエッジのラフネスは0.01 μm以下とせねばならないが、PMMAレジストのエッジのラフネスは0.01 μm程あり²⁰⁾、レジスト材料そのものの開発が必要となる。感度については現状の化学増幅系レジストの感度が調べられており、シップレー社のSAL601 (0.25 μm厚)の感度は13 nmで2.5 mJ/cm²と報告されている²¹⁾。

4. 姫路工業大学での EUVL 研究

姫路工業大学では産業応用をねらいとした中型リング“ニュースバル”の建設を兵庫県西播磨のSPRING-8サイトに進めている。EUVリソグラフィ技術は本リングの産業応用の最重要課題として開発している。

図11に構成概要を示すが、光学系には走査時のぼけを小さくするために3枚の非球面光学系を採用し、NA0.1、縮小率1/5で3.2に示したように回折限界性能0.06 μmとする設計案を得ている。この光学系に焦点検出系、位相型回折格子をもつ位置合わせ系、照明光学系、ウェハロードロック機構、除振機構を付加し、システムを構成している。露光システムはクラス100の温度±0.1°Cのサーマルクリーンチャンバ内に置かれる。この装置によって大面積での0.1 μm以下のパターン形成を進め、レジストプロセス、マスク製作プロセス等を明らかにするとともに、民間企業と共同でデバイス開発を進めていく。

また、来年度建設予定の干渉計測用ビームラインを用いてAt wavelengthでの光学系の評価、多層膜マスクの欠陥評価等を進め、EUVL光学系の評価技術を構築する。

5. あとがき

多層膜反射鏡によってX線が曲がり、縮小光学系が構成できるようになり、新しい露光法が展開されてきた。ミラー加工技術、多層膜形成にオンゲストロームオーダーの精度が要求されるが、評価と加工が相補的な役割をもって技術開発が進んでおり、ほぼ目標性能を満足する形状加工が可能になっている。このため、2006年頃の0.1 μmをもつ16 Gbitデバイスあるいはそれ以降のリソグラフィ技術として最も期待されるようになってきている。0.01 μm加工を実現するためにはさらにオンゲストローム以下の加工・評価技術の開発が必要となるが、人類の飽くなき探求心は想像以上の速度で技術を進歩させており、さらに今後の高度情報化時代を支える高速大容量デバイスという“ニーズ”にも支えられ、ますます進歩していくものと予測される。この技術が新たな科学、新たな技術創出のドライビングフォースとなることを願っている。

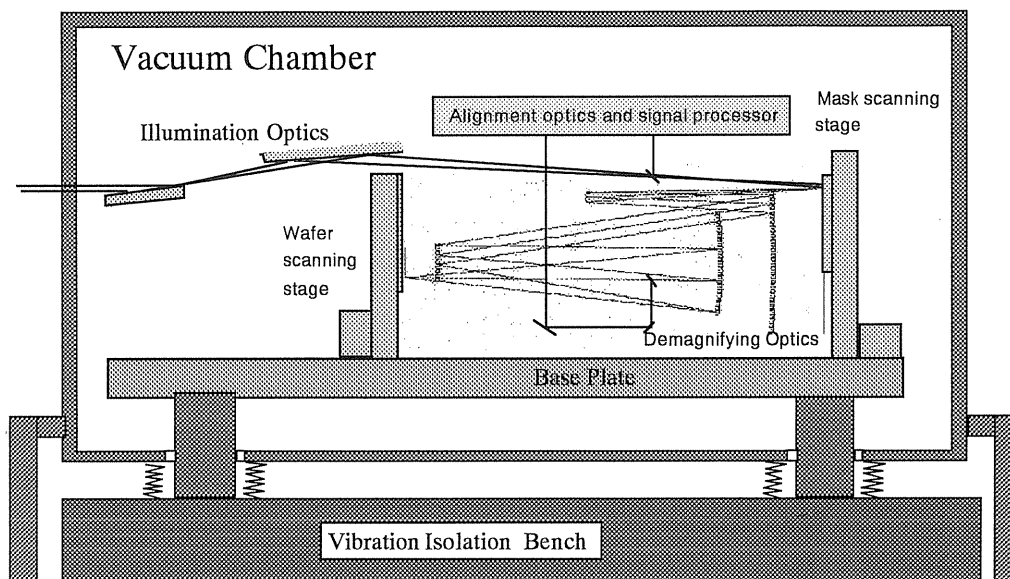


Figure 11. Schematic view of an EUV lithography laboratory tool developed by H.I.T.

参考文献

- 1) 木下博雄, 金子隆司, 武井弘次, 竹内信行, 石原直: X線縮小投影露光の検討, 第47回応用物理学学会学術講演会予稿集 p322, (1986).
- 2) H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii: "Soft X-ray reduction lithography," J. Vac. Sci. Technol. **B7**, 1648-1651 (1989).
- 3) T. E. Jewell, M. M. Becker, J. E. Bjorkholm, J. Boker, L. Eichner, R. R. Freeman, W. M. Mansfield, A. A. Macdowell, M. L. O'Malley, E. L. 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: "20:1 projection lithography using tri-level resist, Proc. of the SPIE Symp. on Microlithography, 1263-34, March, (1990), San Jose.
- 4) D. A. Tichenor, G. D. Kubiak, R. H. Stulen et al.: SPIE **2437**, 292 (1995).
- 5) K. B. Nguyen, G. F. Cardinale, D. A. Tichner, K. Berger, A. K. Ray-Chaudhuri, Y. Perras, S. J. Haney, R. Nissen, K. Krenz, R. H. Stulen, D. M. Tennant, L. A. Fetter, G. Timp, W. Mansfield, K. F. Lee, H. Fujioka and C. Hu: "Fabrication of MOS devices with extreme ultraviolet lithography, OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 4 (1996).
- 6) K. Kurihara, H. Kinoshita, N. Yakeuchi, T. Mizota, T. Haga and Y. Trii: "Two-mirror telecentric optics for soft X-ray reduction lithography, J. Vac. Sci. Technol **B9**(6), 3189 (1991).
- 7) M. Ito, S. Katagiri, H. Yamanashi, E. Seya, T. Ogawa, H. Oizumi and T. Terasawa: "Optical Technology for EUV Lithography", OSA Trends in Optics and Photonics **4**, 9 (1996).
- 8) The National Technology Roadmap for Semiconductors, SIA Semiconductor Industry Association, 1994.
- 9) G. N. Kubiak, K. D. Krenz and K. W. Berger: "Cryogenic Pallet laser Plasma Source Targets, OSA Proceedings on EUVL **23**, 248-254 (1994).
- 10) G. D. Kubiak, D. O'Connell and K. D. Krenz: "Debris-free laser plasma source for EUVL based on gas jets, OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 4 (1996).
- 11) H. Kinoshita: "Present and future requirements of soft X-ray projection lithography," SPIE **1742**, 576 (1992).
- 12) T. Watanabe, H. Kinoshita and M. Niibe: "A New Design of Imaging System for EUVL", JSPE Proceedings of the 2nd US-Japan Workshop on Soft X-ray optics (1997).
- 13) T. Haga and H. Kinoshita: "An illumination system for extreme ultraviolet lithography", J. Vac. Sci. Technol. **B13**(6), 2914 (1995).
- 14) G. E. Sommargren: "Phase Shifting Diffraction Interferometry for Measuring Extreme Ultraviolet Optics", OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 4 (1996).
- 15) E. Tejnil, K. A. Goldberg, H. Medeckci and J. Boker: "Phase-Shifting Point Diffraction Interferometry, OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 4 (1996).
- 16) M. Ito, T. Soga, H. Yamanashi and T. Ogawa: "Reflection masks for soft-x-ray projection lithography", SPIE **2512**, 125 (1995).
- 17) S. P. Vernon, D. R. Kania and P. A. Kearney: "Reticle Blanks for EUVL: Ion Beam Sputter Deposition of Low Defect Density Mo/Si Multilayers", OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 4 (1996).
- 18) 山本正樹: "軟X線多層膜", NEW GLASS **10**(2), 43 (1995).
- 19) M. C. K. Tinone, T. Haga and H. Kinoshita: J. of Electron Spectroscopy and related Phenomena **80**, 461 (1996).
- 20) H. Oizumi, Y. Yamashita and M. Ohtani: Microelectric Engineering **30**, 291 (1996).
- 21) E. G. Scheckler, T. Ogawa, T. Tanaka, H. Oizumi and E. Takeda: Jpn. J. Appl. Phys. **32**, 5951 (1993).
- 22) G. D. Kubiak, R. Q. Hwang, M. T. Schulberg, D. A. Tichner and K. Early: Applied Optics **32** No. 32, 7036 (1993).