

解説

X線露光技術

永田 浩

(株)ニコン中央研究所 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

(1994年5月7日受理)

Current Status and Requirements on X-Ray Lithography

Hiroshi NAGATA

Main Research Laboratory, Nikon Corporation, 1-6-3, Nishi-ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140

1. はじめに

半導体集積回路の高集積化は3年で4倍のペースで進んでいる。メモリー素子の生産は現在4MビットDRAMが中心であるが、研究開発段階では256MビットDRAMの試作が発表されている。パターンの最小線幅は256Mビットで $0.25\mu\text{m}$ 、1Gビットで $0.18\mu\text{m}$ 程度になる。光リソグラフィ技術は光源の短波長化や変形照明・位相シフト法などで解像度の向上をはかっているが、1Gビットあたりに限界が見える。X線リソグラフィは光より1ないし2桁波長の短い軟X線を光源とするので、解像度、焦点深度、転写精度などで光リソグラフィ技術より優れており、次の露光技術として期待されている。転写する方式にはマスクとウエハを数十 μm 以内に接近させて1:1で焼き付ける等倍近接露光方式と、多層膜反射鏡でマスクのパターンをウエハ上に縮小投影転写する方式がある。これらのX線リソグラフィ技術の現状と課題について報告する。

2. 等倍近接露光技術

2.1 解像限界

マスクとウエハを近接させ密着に近い状態で等倍露光する方式はMITのSmithらにより提案された¹⁾。解像限界は図1に示すように回折によるパターンのぼけと、X線よりレジスト中で発生する2次電子の飛程で決まる²⁾。露光に適したX線波長は1nm付近であり、ギャップを $10\mu\text{m}$ までとして解像限界は $0.1\mu\text{m}$ 程度となる。マスクの厚さを考慮して解像限界を求めることも行われており、実用的なギャップの下限を $5\mu\text{m}$ 、ギ

ャップ裕度 $1\mu\text{m}$ とした場合、露光波長1nmでは解像限界70nm、波長0.7nmでは解像限界60nmという値が得られる³⁾。

2.2 露光機

カール・ズースから市販されている露光機XRS 200の技術仕様を表1に示す。総合重ね合わせ精度は最新機種では70nmまで向上しており、これから量産が開始される最小線幅 $0.25\mu\text{m}$ 、256MDRAMに対応する性能が得られている。国内でもソルテック、NTTはじめ数社で試作機の開発やパターン形成実験が行われている。

図2にソルテックと松下電器が開発した放射光用露光機の概略図を示す⁴⁾。放射光光源からのX線はビームラインの振動ミラーで28mm角の光束となり、Be窓を通過してマスクステージ側からウエハを照射する。ステージは垂直面内にあり、マスクとウエハ間のギャップは $10\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ に設定できる。マスクとウエハの平行度は $\pm 1\mu\text{m}/25\text{mm}$ 以内、またギャップ精度は $\pm 1\mu\text{m}$ 以内で、微動ウエハステージの3軸のアクチュエータ(分解能5nm)で補正される。露光時には露光機側はHe雰囲気とし、温度は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 内に保たれる。

2.3 アライメント

光ヘテロダイン干渉法による方式の例を図3に示す⁴⁾。ゼーマンレーザーからのわずかに周波数の異なる二つのレーザー光で基準回折格子を照射し、偏光方向を 90° 回転させた1次の回折光と-1次の回折光でマスクおよびウエハのアライメントマーク上に基準回折格子の像を形成する。この回折格子の像は差周波数で走査されており、アライメントマークからの回折光は差周波数のビー

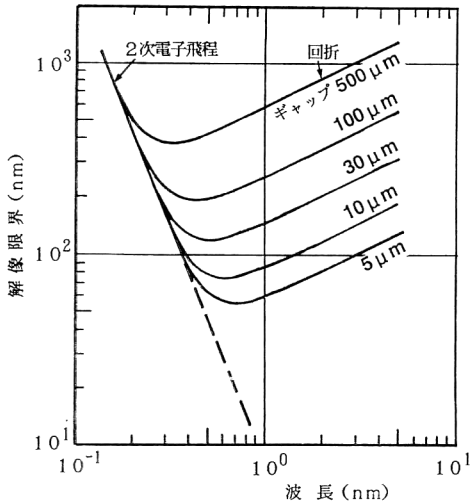


図 1 近接露光による解像限界

表 1 SUSS XRS 200 技術仕様

最大ウエハ直径	200 mm
視野範囲	26 mm 角~45 mm 角
マスク・ウエハ間 ギャップ	0~60 μm (通常 40 μm)
解像度	0.2 μm (ギャップ 40 μm の場合)
位置合わせ再現性	30 nm (3σ)

トを持ちその位相はマークのずれの情報を持つ。これをマスクおよびウエハそれぞれからの信号に分離して検出すれば、マスクとウエハの相対的な位置ずれが検出できる。出力を常時ステージコントローラーに送ることで、実時間のアライメントが実現できる。マスクとウエハのギャップを 20 μm とし露光機単体のレジスト二重露光による評価で 24 nm (3σ), プロセスウエハの SiO₂ マークで 40 nm (3σ) のアライメント精度が得られて

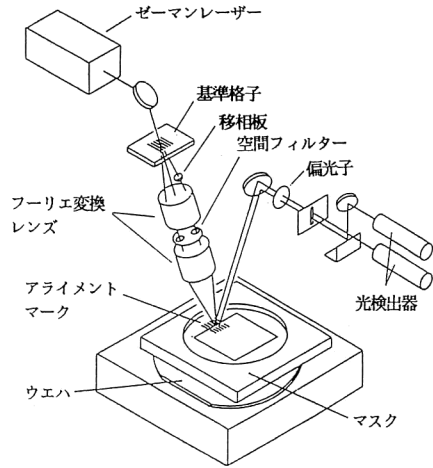


図 3 アライメントの原理図

いる⁵⁾。

2.4 マスク

X線マスクは厚さ 1~数 μm の透明な SiN あるいは SiC 膜 (メンブレン) の上に Ta や W の X線吸収体でパターン描画して、ガラスの外枠で支えられた Si 基板上に形成される。パターン描画、マスク製作工程、あるいは露光時の照射損傷などでマスクに歪が生じる。この歪を所定の精度内にとどめることが等倍露光法の最大の課題と見なされている。高精度なマスク描画装置と多重描画などの描画技術の開発、および照射耐性の大きいメンブレン (材料) の探索が続けられている。パターン位置精度は、13 mm 角のチップで EB 描画で 40 nm、マスク全体で 60 nm (いずれも 3σ 値) が得られている⁶⁾。

2.5 パターン転写

等倍露光ではデバイスの試作も行われており、CMOS⁷⁾ や 512 kB の SRAM⁸⁾ への適用が報告されて

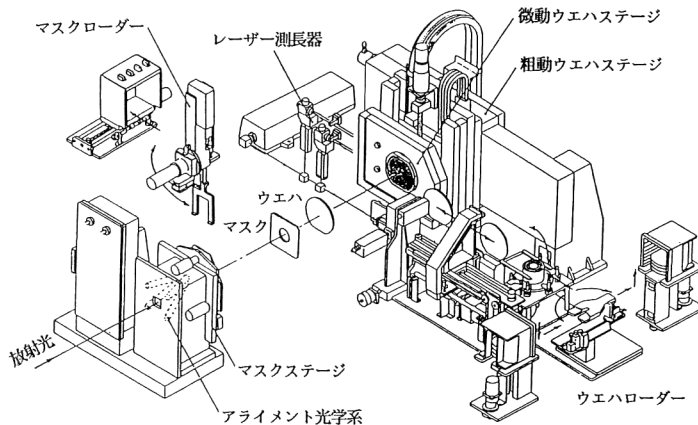


図 2 放射光用ステッパーの概観図

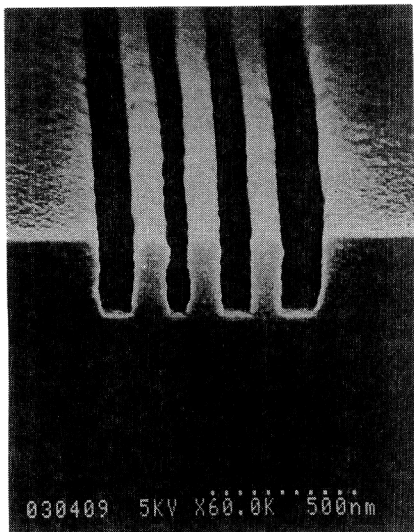


図4 0.1 μm L & S パターンの SEM 像

いる。より微細なパターンを形成する実験も行われており、膜厚 0.6 μm の SAL 601 レジストに 0.15 μm⁷⁾、膜厚 0.3 μm の AZ-PN100 レジストに 0.1 μm⁹⁾ の L & S パターンが形成されている。0.1 μm L & S の転写パターンの SEM 写真を図4に示す。マスクはX線吸収体の Ta と透過体の Si を Si 基板側面の壁に交互に蒸着して作成したもので、ギャップを 10 μm とした。この程度の線幅になるとレジストの粗さの影響もでてくるが、前述の解像限界のシミュレーションに見合った結果が得られている。

0.2 μm より微細なパターンになるとアスペクト比が大きくなり、レジストの倒れの問題が発生している。これはすべてのリソグラフィ技術に共通する課題であり、今後はレジストプロセスの開発が重要になる。

3. 縮小投影露光技術

3.1 現 状

縮小投影露光における解像力 R と焦点深度 D は

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

$$D = k_2 \lambda / (NA)^2 \quad (2)$$

で与えられる。ここで λ は光源波長、 NA は開口数、 k_1, k_2 はプロセスファクターである。 $k_1 = 0.6, k_2 = 0.5$ とした時の露光波長と解像力の関係および焦点深度を NA をパラメータに表したのが図5である。 $NA = 0.08$ 、露光波長 13 nm の時、解像力 0.1 μm、焦点深度 1 μm が得られる。

多層膜技術の進展で高反射率の反射鏡ができるようになり、X線縮小投影露光の実験研究が本格化した。微細パターンの形成が 1986 年に NTT から報告され¹⁰⁾、その後米国や日本で 0.1 μm から 0.05 μm の線幅のパターン形成が報告されている¹¹⁻¹⁵⁾。

露光実験の一例を次に示す^{13,14)}。光学系は図6のシュバルツシルド系が用いられている。高精度加工が可能な球面系であるので、光軸近傍では回折限界近いパターンの形成が可能である。縮小倍率が 1/32、マスクからウエハまでの距離は 1300 mm、実効的な NA は 0.1、MTF は 0.1 μm L & S パターンで 0.6 である。反射鏡は Mo/Si 多層膜が成膜されている。転写実験は波長 13 nm

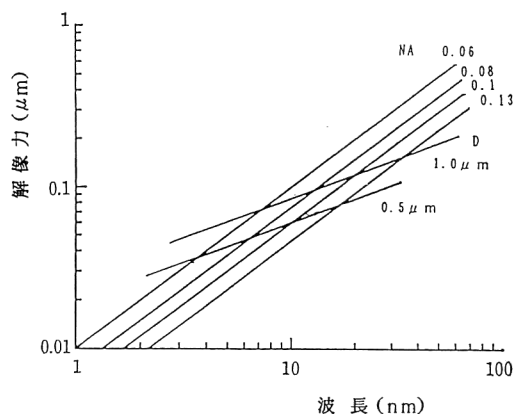


図5 縮小投影の解像力と焦点深度

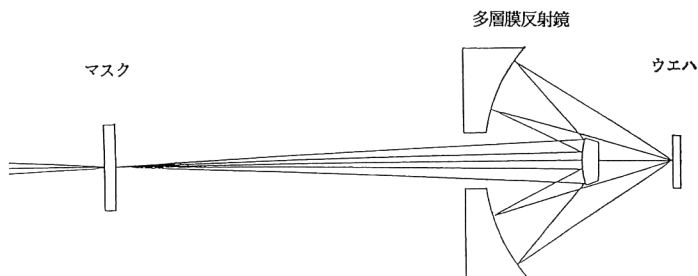


図6 シュバルツシルド光学系

の放射光を光源とし、透過マスクを用いて行われた。図7はこの光学系で得られた50 nmのL & SパターンのSEM写真である。レジストは120 nmの厚さのPMMAで、MIBK:IPA=1:3で現像した。

3.2 露光機概念図

縮小投影露光はまだ露光機が試作されておらず、基礎実験の段階である。図8は産業レベルで使えるシステムの検討を進めるために作成された装置の概念図¹⁶⁾である。光源はレーザープラズマX線源で、光学系はMo/Si多層膜からなる反射鏡で構成されている。マスクは反射鏡と同じ多層膜からなる反射型で、縮小倍率は1/4程度、視野は輪帯でステップ & スキャン露光に必要な露光領域を確保する。以下にこれらの構成要素について見ていく。

3.3 X線源

X線源には放射光と、レーザー光をターゲット上に集光して生成されるレーザープラズマが考えられる。後者は光リソグラフィの光源と同様に、露光機ごとに1対1に対応した光源となるので取扱いやすい。KrFエキシマレーザー(1.5 J/pulse, 100 Hz)を金の回転ターゲットに集光し、150ないし300 μm径のX線源とする露光

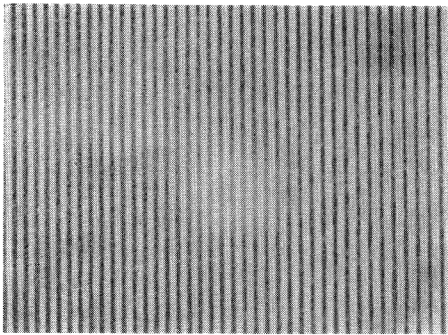


図7 50 nm L & S パターンの SEM 像

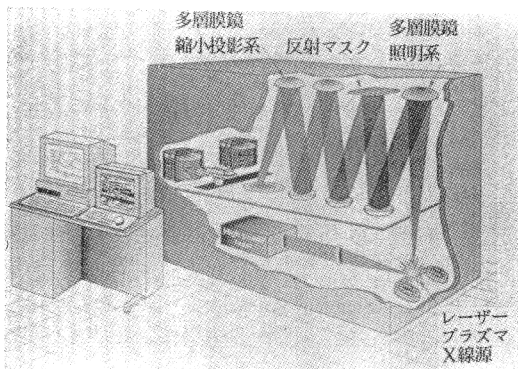


図8 縮小投影露光装置の概念図

実験例がある¹²⁾。スループットやパルスごとのX線強度の安定性を考慮すると、高繰り返し kW 級レーザー(1 J, 1 kHz)が必要で、LD 励起 YAG レーザーが候補となる。

3.4 縮小投影系

縮小投影光学系は大面積を一括露光できる系が望ましいが、解像度 0.1 μm 程度に見合う現実的な系は設計できていない。これに対し、すべてのミラーを同軸に置くと、この光軸から等距離の同心円状の部分で収差の小さい像が得られる。この同心円にあわせた輪帯状の視野で一方の幅を確保し、マスクとウエハを縮小比に応じて同期走査して大面積の露光領域を得る方式が妥当と考えられる。非球面を採用することで2ないし4枚の鏡面を用いた光学系で解像度 0.1 μm を得ることができ^{17,18)}。

X線は波長が短いので、鏡面の加工に要求される精度も厳しい。要求される波面収差精度を rms 値で $\lambda/14$ 以下とすると、波長 13 nm のX線縮小投影系ではその量は 1 nm 以下となり、個々の鏡面に要求される形状精度は4枚系で 0.23 nm 以下となる。現状に比べて1桁近い加工精度の向上が必要である。

3.5 多層膜とマスク

X線多層膜¹⁹⁾は通常2種類の物質を精度良く交互に積層し、単一の鏡面ではほとんどゼロに近いX線の反射率を大幅に増加するものである。反射の条件は交互層の周期長を d 、斜入射角を θ として近似的に

$$2d \sin \theta = \lambda \quad (3)$$

で与えられる。反射率はX線波長と積層物質によって異なり、波長 13 nm では Mo/Si 多層膜が高い反射率を示す。その断面 TEM 写真を図9に、X線反射率を図10に示す。垂直入射に近い配置で 65% 以上の反射

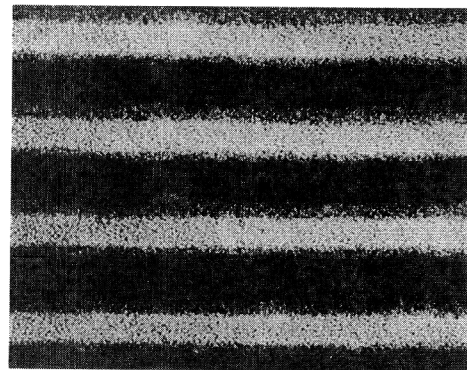


図9 Mo/Si 多層膜の断面 TEM 写真

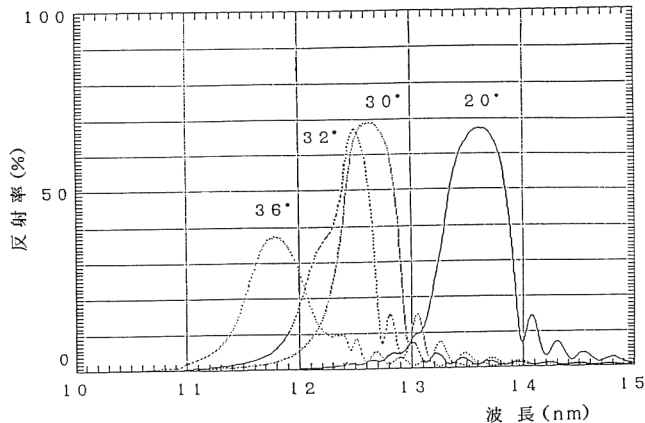


図 10 Mo/Si 多層膜の X 線反射率

率が得られる。波長 12.4 nm の Si の吸収端より短波長域では直入射では 50% を越える反射率は得られておらず、波長や入射角度に対する半値幅も狭い。成膜法にはスパッタリング法が最も多く用いられている。

反射マスクは多層膜をエッチングするものと、多層膜上に X 線吸収体のパターンを形成するものがある。実験では前者が多く使われているが、これではパターンの抜け欠陥の修正が困難であり、実用化されるのは後者になると考えられる。最小線幅を 0.1 μm 、縮小倍率 1/4 とすると、マスクの最小線幅は 0.4 μm 、吸収体のアスペクト比は 0.25 程度となる。

3.6 アライメント

等倍露光と同様なヘテロダイン検出方式が利用できるが、プロセスに依存しない方式として裏面からアライメントする方式が考えられている²⁰⁾。裏面アライメントではウェハの傾きで誤差が生じるが、格子パターンの少し離れた場所を 2 光束で照明して差をとることで解消でき、アライメント精度は 15 nm、総合精度は 31 nm まで改善できる見通しが得られている。

3.7 レジストプロセス

波長 13 nm の X 線はレジストの吸収が大きく、例えば PMMA 中で光量が $1/e$ に減衰する深さは約 0.2 μm にすぎない。このため、アスペクト比の大きな矩形の断面形状を得るには、化学増幅型レジストを上層とした多層レジスト法など多層プロセスが必須となる。現在の光リソグラフィは単層プロセスに限られているが、パターンの微細化にともないアスペクト比は大きくなるので、将来は露光方式によらず多層プロセスに移行するであろう。

4. おわりに

等倍露光方式と縮小投影露光方式の X 線露光技術について概観した。いずれも 0.1 μm 以下の微細なパターンが形成されており、将来の露光技術として有望視される。実用化には、スループットや装置の使いやすさなどの実用性も重要である。等倍露光方式はすでに市販機がありデバイスの試作も行われているが、縮小露光方式はまだ基礎実験の段階である。しかし実用化にはそれぞれ課題をかかえており、これからの開発の進展が鍵となる。さらに X 線露光技術の開発が進められることを期待する。

(株)ソルテックの阿刀田氏から等倍露光に関する資料を提供していただいたことを感謝いたします。

文 献

- 1) D.L. Spears and H.I. Smith: "X-ray lithography—A new high resolution replication process," *Solid State Technol.*, July (1972) 21–26.
- 2) N. Atoda: "Progress of SR lithography—a path to 0.1 Micron feature size—," *Proceedings of the International Conference on Advanced Microelectronic Devices and Processing* (1994年3月, 仙台, 東北大学電気通信研究所) pp. 103–108.
- 3) T. Ogawa, S. Murayama, K. Mochiji and E. Takeida: "Resolution limitation of proximity X-ray lithography determined by waveguide effect," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 4228–4231.
- 4) K. Koga, N. Nomura, J. Yasui, Y. Terui, H. Nagano, K. Fujita, S. Kusumoto, K. Nakano, S. Nakatani, S. Mizuguchi, S. Aoki, M. Yamamoto, K. Yamaguchi, T. Sato, K. Matsuo and K. Yanagida: "High-performance synchrotron orbital radiation X-ray stepper," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8** (1990) 1633–1637.
- 5) K. Koga, T. Itoh, S. Kusumoto, K. Araki, J. Yasui, H. Takeuchi and S. Aoki: "Improvement of het-

- erodyne alignment technique for X-ray steppers," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B11** (1993) 2179-2182.
- 6) S. Ohki, T. Matsuda and H. Yoshihara: "X-ray mask pattern accuracy improvement by superimposing multiple exposures using different field sizes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 5933-5940.
 - 7) K. Deguchi, K. Miyoshi, H. Ban, H. Kyuragi, S. Konaka and T. Matsuda: "Application of X-ray lithography with a single-layer resist process to subquartermicron large scale integrated circuit fabrication," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B10** (1992) 3145-3149.
 - 8) R. Viswanathan, D. Seeger, A. Bright, T. Bucelot, A. Pomerene, K. Petrillo, P. Blauner, P. Agnello, J. Warlaumont, J. Conway and D. Patel: "Fabrication of high performance 512K static-random access memories in 0.25 μm complementary metal-oxide semiconductor technology using X-ray lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B11** (1993) 2910-2919.
 - 9) E.W. Scheckler, T. Ogawa, T. Tanaka, H. Oizumi and E. Takeda: "Simulation of AZ-PN100 resist pattern fluctuation in X-ray lithography, including synchrotron beam polarization," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 5951-5959.
 - 10) 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(その1)", 第47回応用物理学学会学術講演会予稿集(1986) p. 322.
 - 11) J.E. Bjorkholm, J. Bokor, L. Eichner, R.R. Freeman, J. Gregus, T.E. Jewell, W.M. Mansfield, A.A. MacDowell, 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: "Reduction imaging at 14 nm using multilayer-coated optics: Printing of features smaller than 0.1 μm ," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8** (1990) 1509-1513.
 - 12) D.A. Tichenor, G.D. Kubiak, M.E. Malinowski, R.H. Stulen, S.J. Haney, K.W. Berger, L.A. Brown, R.R. Freeman, W.M. Mansfield, O.R. Wood II, D.M. Tennant, J.E. Bjorkholm, A.A. MacDowell, J. Bokor, T.E. Jewell, D.L. White, D.L. Windt and W.K. Waskiewicz: "Diffraction-limited soft-X-ray projection imaging using a laser plasma source," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1557-1559.
 - 13) H. Nagata, M. Ohtani, K. Murakami, T. Oshino, H. Oizumi, Y. Maejima, T. Watanabe, T. Taguchi, Y. Yamashita and N. Atoda: "Fabrication of 0.1 μm line-and-space patterns using soft X-ray reduction lithography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) 360-363.
 - 14) H. Oizumi, Y. Maejima, T. Watanabe, T. Taguchi, Y. Yamashita, N. Atoda, K. Murakami, M. Ohtani and H. Nagata: "Sub-0.1 μm resist patterning in soft X-ray (13 nm) projection lithography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 5914-5917.
 - 15) 山梨弘将, 伊東昌昭, 片桐創一, 小川太郎, 曾我隆, 老泉博昭, 瀬谷英一, 武田英次: "反射型マスクを用いたX線縮小露光の検討(II)", 第54回応用物理学学会学術講演会予稿集(1993) p. 596.
 - 16) N.M. Ceglio and A.M. Hawryluk: "Wafer cost analysis for a soft X-ray projection lithography system," *J. X-Ray Sci. Technol.*, **3** (1992) 194-203.
 - 17) K. Kurihara, H. Kinoshita, N. Takeuchi, T. Mizota, T. Haga and Y. Torii: "Two-mirror telecentric optics for soft X-ray reduction lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B9** (1991) 3189-3192.
 - 18) T.Y. Jewell and K.P. Thompson: 特開平 5-36588.
 - 19) 永田 浩: "X線用多層膜", SPUTTERING & PLASMA PROCESSES (日本工業技術振興協会), **8**, No. 3 (1993) 67-75.
 - 20) S. Katagiri, S. Moriyama and T. Terasawa: "Novel alignment technique for 0.1 μm lithography using the wafer rear surface and canceling tilt effect," *Opt. Eng.*, **32** (1993) 2344-2349.