

解説

X線縮小リソグラフィ

木下博雄

NTT LSI 研究所 〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1

(1994年6月2日受理)

Soft X-Ray Projection Lithography

Hiroo KINOSHITA

NTT LSI Laboratories, 3-1, Wakamiya, Morinosato, Atsugi 243-01

1. ま え が き

X線縮小投影露光技術(Soft X-ray Projection Lithography: SXPL)は、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て構成した縮小光学系により、レチクルパターンをウェハ上に縮小転写する方法である。

この技術は光学系による縮小露光であること、露光波長を13~40 nmに据えていること等から、従来の紫外線露光の延長とみなすことができ、米国では昨年よりこの技術を“extreme ultraviolet lithography (EUVL)”と呼んでいる。エキシマ露光も露光波長の短波長化とともに反射型光学系を用いざるを得ないなど、X線縮小露光との境目がなくなりつつある。むしろ、より短波長化することにより、NAの低減、焦点深度の向上等のメリットが現れる。

解像性、焦点深度²⁾はFraunhofer, Rayleighの式でそれぞれ与えられ、13 nmの波長光、NA 0.1の光学系を用いれば、0.065 μm の解像度と1.3 μm の焦点深度が得られる。露光波長を多層膜製作の技術的限界である4.5 nmとすると0.02 μm のパターン形成が可能となる。

この技術の実験的検討は1985年頃よりNTT¹⁾で進められてきたが、1989年のEIPB²⁾での発表を契機に、日米の研究者の活発な研究が進められている。とくに、米国ではSDI研究の終焉とともに、その技術の転用としての意味ももち、ここ2、3年で急速に進展している。1990年にはBell研究所³⁾がシュバルツシュルト光学系により0.05 μm のパターン形成に成功した。また、

1992年にはNTTが20 mm×0.4 mmの領域に露光可能な非球面2枚ミラー系により0.15 μm のパターン形成を実現している⁴⁻⁶⁾。

X線縮小に関する会議としては米国光学会(OSA)とAir Force 共催のTopical Meetings on “Soft-X-ray Projection Lithography”が91年より開催されており、毎年40件ほどの研究発表がなされている。昨年10月には山中湖でX線縮小に関する日米ワークショップが開催され、25名の米国研究者を交えて活発な議論がなされた。

ここでは、将来のリソグラフィ技術としてのX線縮小投影露光技術の現状と今後の課題について報告する。

2. 最近の研究状況

3年に4倍の集積化のトレンドもパターンサイズが0.2 μm 以下では製造コストとプロセスの複雑さからスローダウンせざるを得ない状況にある。現在のリソトレンドからSXPLのターゲットは0.15 μm 以下と見積られている^{4,7)}。1 GbitクラスのLSI出現時期を2002年とすると、1998年までにプロトタイプ機を、2002年までに製造機を開発せねばならない。そしてSXPLの加工性能はデバイスの限界である0.03 μm と考えられており、0.15 μm からの5世代を視野に入れておく必要がある。

X線縮小露光技術は紫外線の縮小露光と同様に五つの個別技術からなる。すなわち、光源、照明系、マスク、縮小光学系および位置合わせ光学系、ウェハである。以下に個別技術の最近の研究状況を示す。

光源としてはレーザープラズマがサイズと価格の点で

放射光より有利として検討が進められている。1 J/pulse, 1 kHz の繰返しを狙いとしている。また、装置サイズを 1 m×2 m ほどのテーブルトップを目指している。レーザープラズマの課題は飛沫粒子 (debris) の低減である。0.3 μm 以下の粒子は He 雰囲気でも除去できるが、0.5 μm 以下の粒子は He ガス圧を高くせねばならず、真空度の低下を招き、発生効率を低下させる⁸⁾。レーザー光にはナノ秒の CO₂, ND: YAG, エキシマレーザーが主に用いられ、14 nm の波長のターゲットとしては Au, Sn, Ta, W が用いられている。最近の報告⁹⁾では Sn, Au は debris の発生が多く, Ta, W が良いとされている。レーザー強度は 10¹¹~10¹² W/cm² で、発生効率は 0.5% ほどである。レーザー光 1 ショットでの金属膜への照射ダメージは深さ 0.2 μm ほどにも及ぶが、高繰返しを実現するため金属 (0.5 μm 厚) をコーティングしたマイラーの薄いテープ (25 μm 厚) を高速で回転巻き取る方法が検討されている。バルクと同じ発生効率を得られ、debris の発生も少ない。Debris についての本格的な検討は開始されたばかりであるが、極低温の固体 Xe をターゲットとした検討では 14 nm の波長の発生効率も 0.8% と高く、debris-free であることを確認している⁹⁾。

反射型マスクの製法は 2 種検討されている。多層膜の上に金などの吸収体パターンを形成する方法は、エッジのシャープさ、およびリペアが可能等のメリットをもつが、寸法変換差を生じる。多層膜をエッチングするタイプは寸法精度は高いが、リペアが困難である。

リペア法としては吸収体上の欠陥を Ga および Ar イオンビームを用いて除去、および付着する方法が検討されている。リペア時のダメージを避けるため最上層に Si 層 (35 nm) を設ける方法が提案¹⁰⁾されている。また、多層膜マスクの欠陥の発生についての検討もなされている。

照明系についてはステップアンドスキャン方式の照明法が課題であり、各種提案されているが、まだ十分な NA をもつ構成案は得られていない。とくに放射光の場合にはエミッタンスが小さく、かつ水平と垂直方向の開き角が 2 桁以上異なるため、光源の NA 拡大および均一化にやっかいな問題である。

大面積露光用の縮小光学系案としては図 1 に示す非球面ミラー 2 枚から 4 枚の案が提案されている¹¹⁾。図の (a), (b) はリング領域をマスクとウェハを同期走査することにより拡大する方法で、(c), (d) は大面積一括露光する系である。

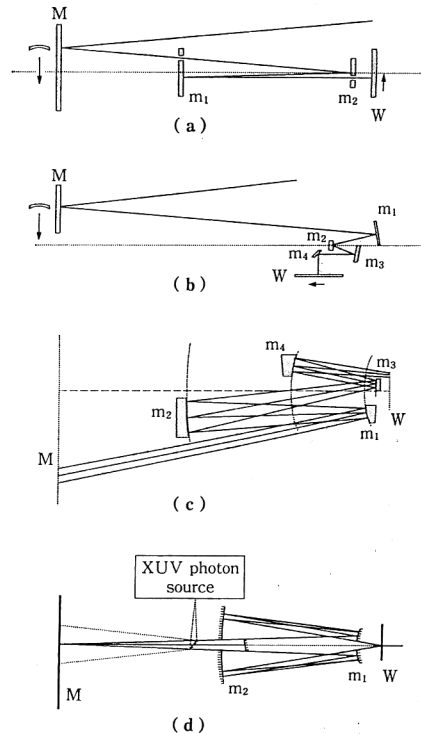


図 1 X線縮小用に開発された大面積露光光学系案。
m 1-4: ミラー, M: マスク, W: ウェハ。

(a) は最小ミラー枚数で構成した案で、詳細については 3 章で述べるが、ディストーションが残るため、走査時のリング幅を狭くせねばならない問題をもつ。(b) はニコン¹²⁾、日立¹³⁾が提案したもので、基本的にはキャノンが提案¹⁴⁾した非球面 3 枚系と同じ構成で、ウェハ位置の空間的な制約から光路を変換する平面ミラーを追加した案である。(c) は AT & T が提案した案¹⁵⁾で、10 mm×15 mm で 0.1 μm の解像性をもつが、周辺での歪が 1 μm と大きい。(d) は Los Alamos 研究所が提案した案¹⁶⁾で、25 mm 角領域で 0.1 μm 解像し、歪も 0.002 μm と小さい。ミラー枚数も 2 枚で軸対称であり、テレセントリック性をもつが、マスク-ウェハ間が 4100 mm と大きく、また、ミラー間隔を 0.05 μm 以下に合わせねばならない等の問題をもつ。このように大面積で 0.1 μm 以下の解像性等の性能を満足する案は得られているが、実際の試作例は後述する NTT 案のみであり、要求される加工形状精度、合わせ精度についての見通しを議論できる状況にない。非球面加工への本格的な取り組みが必要である。

レジストについては化学増幅系レジストの感度、露光膜厚について検討^{4, 17)}されている。シップレー社の

表1 X線縮小の開発課題

要素技術	開発課題
光源系	レーザープラズマ：クリーン化，小型化 放射光：照明系
照明系	ステップアンドスキャン方式での照明光源 NA の均一化
マスク	照射損傷
縮小光学系	ミラー基板の形状精度 多層膜の低応力化
ウェハ	レジスト：解像度，形状精度

SAL 601 (0.25 μm 厚) の感度は 2.5 mJ/cm^2 と報告されている。ただし，表面の荒れが大きく，0.1 μm 以下の線幅制御性に乏しい。

多層膜の製膜技術については，ここ 5, 6 年の間に急速に進展し，現在では 13 nm の露光波長に対しては 60% 以上の反射率が容易に得られるようになってきている。100 mm 直径の Si 全面での反射率も 65% \pm 0.37%，周期長の変動も \pm 0.3 \AA と実測¹⁹⁾されている。しかし，より短波長領域では，波長 69.6 \AA での反射率 16%¹⁹⁾，44.8 \AA で 3.5%²⁰⁾と低い。反射率には界面の粗さの影響が大きく効き，44.8 \AA 用の多層膜の 1 層の厚さは 10 \AA ほどであり，原子の大きさを考慮すると高反射率化は難しい。球面ミラーへの形成上の問題としては多層膜の応力の低減が課題である。例えば Mo/Si 多層膜では 350 MPa の圧縮応力が観察¹⁸⁾されている。これは直径 10 cm ，厚さ 2.5 cm ガラス平面基板上に形成した場合に，曲率を 10^5 m すなわち，最大 10 nm 変位させる力に相当する。

露光実験としては国内では 3 章で述べるように NTT が非球面ミラーによる大面積露光の試み⁴⁻⁶⁾，ニコン²¹⁾，日立²⁴⁾がシュバルツシュルト光学系による高解像度

パターン形成実験を進めている。米国では AT & T のグループがシュバルツシュルト光学系³⁾とオフナ型光学系²²⁾により検討を進めている。AT & T は Sandia 国立研究所と共同でレーザープラズマを用いた実験²³⁾を進め，0.05 μm を実現している。

表 1 に上記した開発課題について再掲する。

3. 非球面 2 枚光学系による大面積露光⁵⁾

X線縮小露光法のリソグラフィへの応用としては大面積性能の実証が重要な課題である。以下では NTT で検討を進めた，2 枚非球面光学系の試作評価について述べる。

図 2 に提案した 2 枚の非球面光学系を用いたシステムの概要を示す。この系は照明光学系，マスク，縮小光学系，ウェハからなる。照明光学系は 2 枚のトロイダルミラーからなり，凸面鏡近傍の前側瞳面に集光するよう構成される。マスクは多層膜を反射面とする反射型マスクを用い，マスク面での光の幅は 100 $\text{mm} \times 2 \text{ mm}$ である。光学系の縮小倍率は 1/5 であり，NA は 0.1 として設計した。マスクとミラーへの入射角は 2 度であるため，それぞれの多層膜反射面の周期長 d は一定となり，同一条件での膜付けが可能である。マスクとウェハ間の距離は 700 mm であり，2 枚のミラー間は 400 mm と比較的にコンパクトに設計されている。収差を少なくするため両ミラーとも非球面とし，かつ，像面湾曲をなくすため二つのミラー径をほぼ等しい 500 mm とした。

図 3 に波長 13 nm ，インコヒーレント光での解像性 (MTF) を示す。0.1 μm での MTF 値は 75% と十分な値を得た。MTF 値 45% を解像限界値とすると，0.06 μm のパターン形成が可能となる。これは波長 13 nm での回折限界値に一致する。

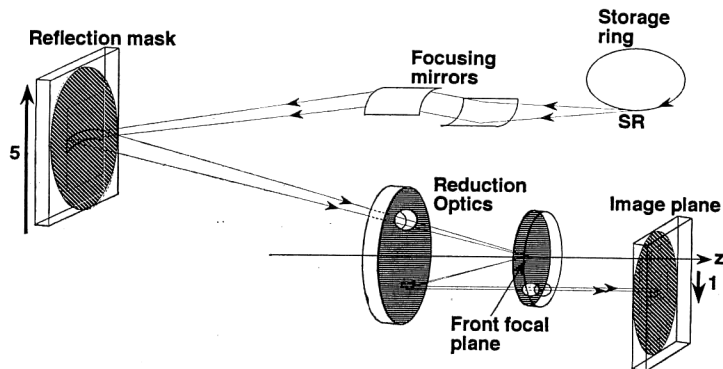


図 2 2 枚非球面光学系を用いた露光システム

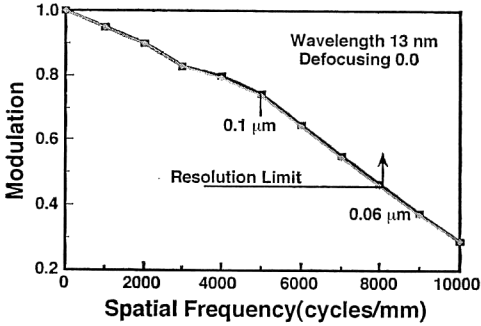


図 3 2枚非球面縮小光学系の MTF 特性

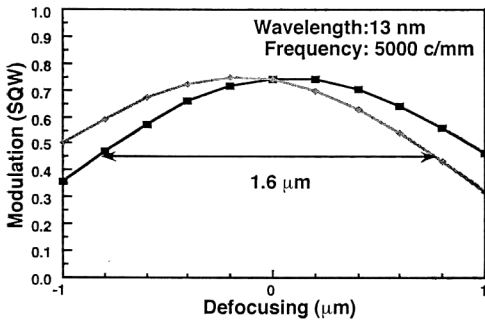


図 4 2枚非球面縮小光学系の焦点深度

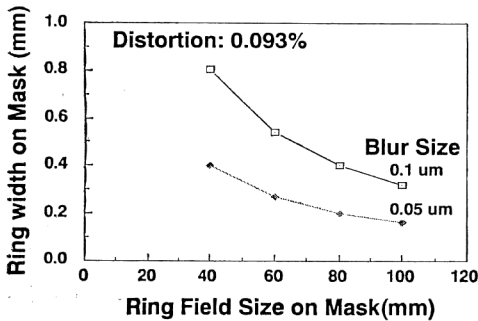


図 5 走査系でのぼけを考慮したリングサイズ

図 4 に $0.1 \mu\text{m}$ のときの焦点深度の計算値を示す。波長 13 nm では $1.6 \mu\text{m}$ ほどの大きい焦点深度が得られる。

この光学系はステップアンドスキャン方式によってウェハ全面での露光が可能であるが、この際、光学系のディストーションが大きいと、走査時にパターンのぼけを生ずる。このため、リング幅を走査時のぼけを無視できるサイズまで狭めねばならない。図 5 は光学系の歪を 0.093% としたときのぼけサイズとマスクのリング幅との関係を示している。マスク幅を 100 mm とし、ぼけを $0.05 \mu\text{m}$ とするとリング幅を 0.2 mm 以下とせねばならない。

3枚系ではディストーションをゼロとすることも容易であるが、反射ミラー枚数が増大する。1枚のミラーの反射率を 60% とすると、2枚系での全効率はマスクの反射を含めて 20% ほどであるが、3枚系では半値幅の減少も考慮すると 10% ほどに低下する。また、合わせ精度、1枚のミラーの加工精度もミラー枚数の増加に伴って難しくなる。このため、軸対称の2枚系での構成解が縮小光学系の設計の鍵となる。

図 6 に試作した2枚の非球面ミラーの概要を示す。斜線の部分が有効な反射面である。凸面鏡の最外周での球面との差は $0.6 \mu\text{m}$ であり、凹面鏡は $2 \mu\text{m}$ である。

図 7 に試作した非球面の形状精度を示す。測定にはレーザー干渉系 (MARK 4) を用いた。(b) に示す凸面鏡は 32ϕ の照射領域内で形状精度 (RMS) 1.8 nm 、(a) に示す凹面鏡は 100ϕ で 3.4 nm であるが、中心部が高く、半径 15 mm のところで対称的に低くなる特徴的な形状となっている。

現状の形状精度評価方法としては干渉法 (ZYGO)、走査法 (Bauwer, Chapman) が開発されているが、まだ、 1 nm 以下の精度保証はなく、せいぜい 5 nm ほどである。上記ミラーの加工精度は現状技術ではかなり良い値

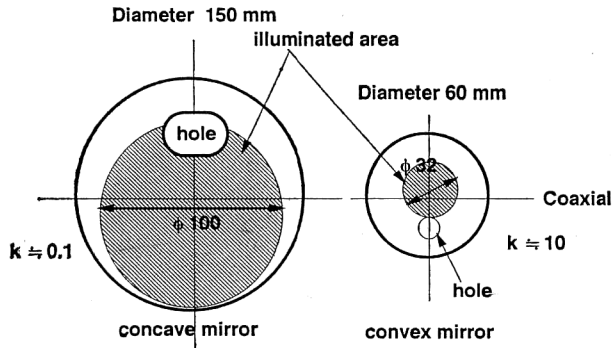
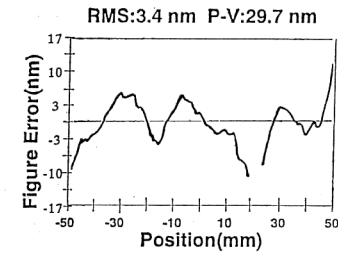
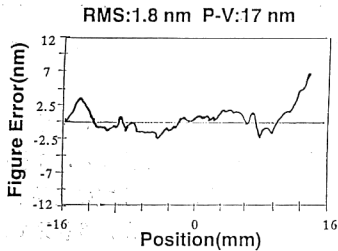


図 6 試作した2枚非球面光学系の概要



(a) Concave Mirror



(b) Convex Mirror

図7 試作した非球面の形状精度
(a)凹面ミラー, (b)凸面ミラー。

と考えられる。しかしながら、X線縮小用ミラーの加工要求精度は1 nm以下であり、今後、加工評価ともに大きな進歩が期待される。

図8にミラーホルダー機構の概観を示す。左側の α , β , Z の3軸ステージ上に凹面鏡が保持され、右側の X , Y 軸ステージに凸面鏡が保持されている。2枚のミラーの合わせはレーザー干渉系(ZYGOMARK 4)によって行った。合わせ精度はおおよそ $\lambda/100$ ほどで、要求値($\lambda/630$)をかなり下回っている。

図9に反射型マスクを用いた縮小転写パターン例を示す。マスクにはエッチングタイプを用いた。マスク上の最小パターンは $0.5 \mu\text{m}$ であるが、紫外線露光でマスクパターンを製作したため、十分な解像性となっていない。このため、 $0.15 \mu\text{m}$ までのパターン形成を得た。(a), (b)とも3層レジストパターンをエッチングしたパターンである。露光に用いた光学系はウェハ面上で $20 \text{mm} \times 0.4 \text{mm}$ の露光領域をもつが、実験ではこの領域の中央の $2 \text{mm} \times 0.4 \text{mm}$ の領域で行った。これは高エネ研のビームサイズが $10 \text{mm} \times 10 \text{mm}$ に限定されているためである。今後さらに、ミラーの合わせ精度、マスクパターン精度を向上させ、 $0.1 \mu\text{m}$ 以下のパターン形成を実証していく。

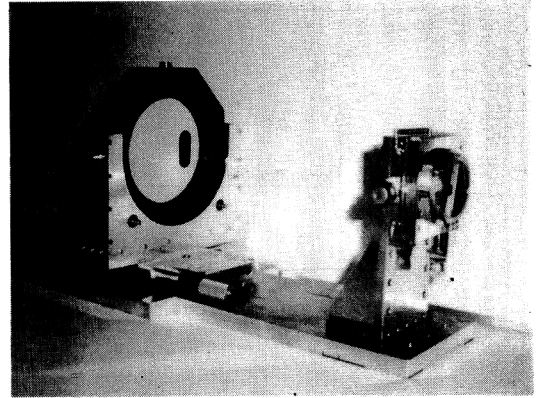


図8 ミラーホルダーの概要

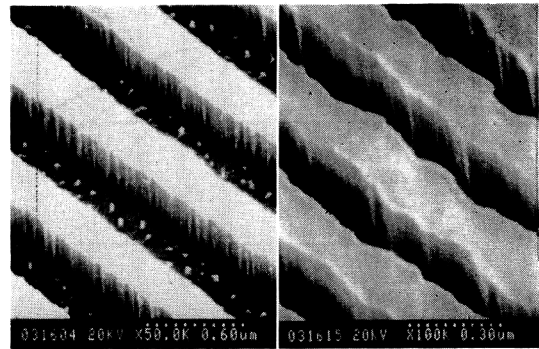


図9 縮小露光パターンの例 (Resist: SAL 601/
a-Si/OFPR)
(a) $0.3 \mu\text{m}$ ラインアンドスペース,
(b) $0.15 \mu\text{m}$ ラインアンドスペース。

4. あとがき

以上述べてきたように、X線縮小露光はここ2, 3年の間の進歩が著しく、リソグラフィとしての要求条件のいくつかに解を与えることができています。大面積化も3章で述べたように $20 \text{mm} \times 0.4 \text{mm}$ の実用露光領域をもつ2枚の非球面光学系によって $0.15 \mu\text{m}$ までの縮小パターン形成を実証し、大面積かつ微細パターン形成の実現可能性を示すことができたと考えられる。

今後は非球面光学系の加工精度の向上ならびに、位置合わせ技術等のシステム化の検討が重要な課題となる。

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回応用物理学会学術講演会予稿集 (1986) p. 322.
- 2) H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii: "Soft X-ray reduction lithography," J. Vac. Sci. Technol., **B7** (1989) 1648-1651.
- 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. Silftvast, 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 trilevel resist," *Proc. of the SPIE Symp. on Microlithography*, 1263-34, San Jose (March, 1990).
- 4) H. Kinoshita: "Present and future requirements of soft X-ray projection lithography," *Proc. SPIE*, **1742** (1992) 576-584.
 - 5) H. Kinoshita: "SXPL in Japan," *OSA Proceedings on Soft X-ray Projection Lithography*, Vol. 18 (1993) p. 74.
 - 6) H. Kinoshita, K. Kurihara, T. Mizota, T. Haga, H. Takenaka and Y. Torii: "Large-area, high-resolution pattern replication using a two-aspherical-mirror system," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 7079-7083.
 - 7) J. A. Caruthers: "ULSI technology," *OSA Proceedings on Soft X-ray Projection Lithography*, Vol. 18 (1993) p. 2.
 - 8) W. T. Silftvast, H. Bender, A. M. Eligon, A. Hanzo and M. C. Richardson: "Laser plasma source characterization for SXPL," *ibid.*, Vol. 18 (1993) p. 117.
 - 9) G. D. Kubiak, K. W. Berger and S. J. Harney: "Laser plasma source for SXPL: Production and mitigation of debris," *ibid.*, Vol. 18 (1993) p. 127.
 - 10) A. M. Hawryluk and D. Stewart: "Reflection mask defect repair," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 7012-7015.
 - 11) 木下博雄: "縮小投影露光X線リソグラフィ", 応用物理, **62** (1993) 691-694.
 - 12) 児玉賢一: "X線縮小投影露光装置", 光学, **20** (1991) 482-487.
 - 13) M. Itou, T. Terasawa and S. Moriyama: "Throughput Estimate of an X-Ray Projection Lithography System," *OSA Proceedings Soft X-Ray Projection Lithography*, Vol. 12 (1991) 18-21.
 - 14) Canon: European Patent No. 87306037.0 (1987).
 - 15) T. E. Jewell, J. M. Rodgers and K. P. Thompson: "Reflective systems design study for soft X-Ray Projection Lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 8** (1990) 1519-1523.
 - 16) V. K. Viswanathan and B. E. Newnam: "Development of Reflective Optical Systems for XUV Projection Lithography," *OSA Proceedings Soft X-Ray Projection Lithography*, Vol. 12 (1991) 30-33.
 - 17) G. D. Kubiak, R. Q. Hwang, M. T. Schilberg, D. A. Tichenor and K. Early: "Chemical amplified soft-X-ray resist," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 7036-7043.
 - 18) D. G. Stearns, R. S. Rosen and S. P. Vernon: "Multilayer mirror technology for SXPL," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 6952-6960.
 - 19) J. B. Kortright, F. M. Gullikson and P. E. Denham: "Masked deposition techniques for achieving multilayer period variation required for short-wavelength (68Å) soft X-ray imaging optics," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 6961-6968.
 - 20) K. Murakami, T. Oshino, H. Nakayama, M. Ohtani and H. Nagata: "Schwartzchild microscope for carbon K radiation," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 7057-7061.
 - 21) H. Nagata, M. Ohtani, K. Murakami and T. Oshino: "Soft X-ray projection imaging using 32:1 Schwartzchild optics," *OSA Proceedings on Soft X-ray Projection Lithography*, Vol. 18 (1993) p. 127.
 - 22) A. A. Macdowell, J. E. Bjorkholm, K. Early, R. R. Freeman, M. D. Himmel, P. P. Mulgrew, L. H. Szeto, D. W. Taylor, D. M. Tennant, O. R. Wood, J. Boker, L. Eichner, T. E. Jewell, W. K. Waskiewicz, D. L. White, D. L. Windt, R. M. Souza, W. T. Silftvast and F. Zernike: "Soft X-ray projection imaging with a 1:1 ring field optics," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 7072-7078.
 - 23) D. A. Tichenor, G. D. Kubiak, M. E. Malinowski, R. H. Stulen, S. J. Haney, K. B. Berger, L. A. Brown, W. C. Sweatt, J. E. Bjorkholm, R. R. Freeman, M. D. Himel, A. A. Macdowell, D. M. Tennant, T. E. Jewell, J. Boker, W. M. Mansfield, W. K. Waskiewicz, D. L. White, D. L. Windt and O. R. Wood: "Soft X-ray projection lithography experiment using Schwartzchild imaging optics," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 7068-7071.
 - 24) 伊藤昌昭: 1994年超 LSI 試験装置ガイド, 電子材料別冊 (1994).