



X線縮小投影露光装置

児玉 賢一

(株)ニコン精機事業部 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

(1991年4月9日受理)

X-Ray Reduction Lithography System

Kennichi KODAMA

Industrial Supplies & Equipment Division, Nikon Co.,
1-6-3, Nishi-ohi, Sinagawa-ku, Tokyo 140

1. はじめに

半導体集積回路 (LSI) の高集積化において、リソグラフィ技術の果たす役割は大きい。現在、その主流である光ステッパー技術では、i線 (365 nm) 光学系と位相シフトレティクルの組み合わせにより、64 MDRAM (L & S 0.35 μm 程度) の生産を目指した研究が盛んに行われている。さらに、将来 KrF エキシマレーザー (248 nm) 光学系と位相シフトレティクルの組み合わせが実用化されれば、256 MDRAM (L & S 0.2 μm 程度) の生産も可能となることが予想される。

一方、X線リソグラフィ技術は、光リソグラフィ以降の露光手段として期待されているものであるが、等倍マスク上のパターンを近接露光により、ウェハ上に転写する方式では、マスクそのものの作製の困難さと回折広がりによるボケの問題が大きい。このために、反射光学系を用いた縮小投影型のX線リソグラフィシステムの開発を望む声が高まっている。そこで、同システムが1 GDRAM の生産に使用されることを前提として、X線源をも含めたシステム全体としての実現可能性の検討を行った。以下、システムに必要とされる仕様、課題等を述べる。なお、軟X線領域では、その波長により物理的特性が大きく異なるので、1, 5, 10 nm, もしくはその付近の波長について種々の見積りを行った。

2. 露光システムへの要求性能

1 GDRAM の生産を行うために、露光システムに対して要求される性能を次のように仮定する。

- X線光学系の解像力 0.1 μm
 - 総合重ね合わせ精度 < 0.03 μm
 - 露光面積 30 \times 30 mm²
 - 露光時間 < 7.5 秒/ショット
- (スループット 20 枚/時
ただし、24 ショット/8 $\frac{1}{2}$ インチ)

3. X線縮小投影露光システム全体構成

システムの全体構成を図1に示す。ここでは、主に光量の点から、X線源としてシンクロトロン放射光を想定した。X線領域での光学系は反射系に限られるが、4.1項で述べるように、一括露光系で大きな露光面積を得ることが設計上困難であるので、走査型の露光システムとなっている。

本システムでは、ストレージリングからのX線は、コンデンサーミラーで反射型X線マスク上の円弧状領域に集光される。円弧状に照明されたマスク上のパターンはX線光学系によりウェハ上に縮小投影される。さらに、マスクとウェハはそれぞれのステージにより、異なる速度で同期走査されるので、広い露光面積を得ることが可能となっている。

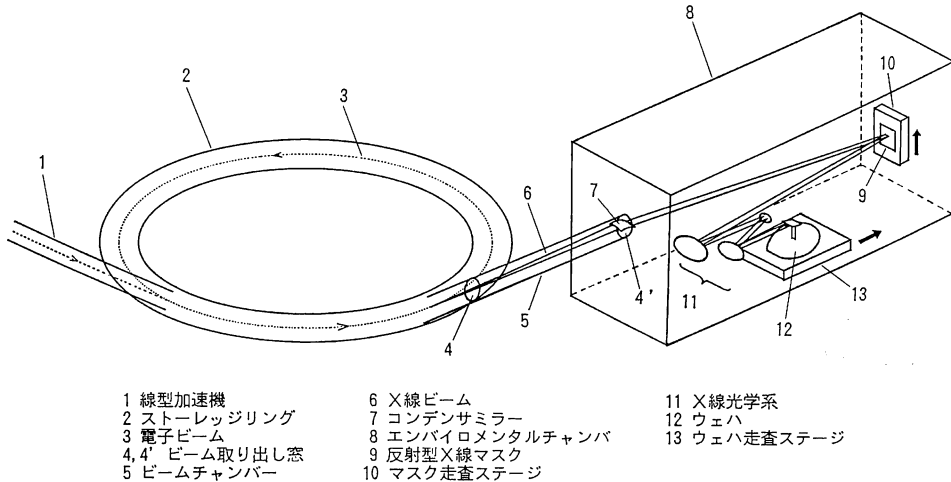
以下、本システム構成を基に検討を行う。

4. 各要素ごとの検討

各要素ごとに、必要とされる仕様、課題等を述べる。

4.1 X線縮小投影光学系

まず、2.節で述べた要求性能を満たすための、光学系に対する仕様について述べる。縮小投影光学系に必要な



- 1 線型加速器
- 2 ストーレージリング
- 3 電子ビーム
- 4, 4' ビーム取り出し窓
- 5 ビームチャンバー
- 6 X線ビーム
- 7 コンデンサミラー
- 8 エンバイロメンタルチャンバ
- 9 反射型X線マスク
- 10 X線光学系
- 11 ウェハ
- 12 ウェハ走査ステージ
- 13 ウェハ走査ステージ

図 1 X線縮小投影露光システム全体構成図

像面側 NA (開口数) は次の式で与えられる。

$$NA = k\lambda / W$$

k : レジストの特性や照明側のコヒーレンシーにより決まる定数で、通常経験的に得られる、 λ : X線の波長、 W : 解像線幅。

ここで、 $W=0.1\mu\text{m}$ として、仮に $k=0.8$ を採用した場合、各波長で必要とされる NA は表 1 のようになる。また、その他必要とされる主な項目の仕様を示す。

次に、現在実験的に採用されている代表的な X線縮小投影光学系であるシュワルツシルト光学系の特徴と二つの実験例について説明する。

シュワルツシルト光学系は、凸面ミラーと凹面ミラーから構成され、両面の曲率中心がほぼ一致している同心光学系である。3次収差論によれば、球面収差、コマ収差、非点収差の各収差がほぼ除去できるが、ペッツバル和に伴う像面湾曲および歪曲収差が残存するので、広い視野を得ることができない。

このため、NTT の木下らは、シュワルツシルト光学

表 1 X線縮小投影光学系の要求仕様

項目	波長 λ (nm)		
	1	5	10
NA (開口数)	>0.008	>0.04	>0.08
露光視野 (長手方向, ウェハ上で)	>30 mm	"	"
多層膜ミラーの表面粗さ	<0.13 nm	<0.63	<1.25
多層膜ミラーの形状精度 (NA に応じた領域内で)	<0.13 nm	<0.63	<1.25
多層膜ミラー系の総反射率	>30%	"	"

系の軸外を使い、円弧状の細い視野にて、X線マスクとウェハを光学系の倍率と同一の比で同期走査することにより、露光面積の拡大化を行っている¹⁾。

図 2 に木下らの実験光学系を示す。鏡面は Mo/Si の多層膜で形成されており、X線マスクは多層膜上に Si_3N_4 の吸収体パターンを形成した反射型マスクである。また、NA は 0.04、縮小倍率は 1/8 倍である。照明光に波長 12.4 nm の SR 光を用いて $0.5\mu\text{m}$ のパターンを解像している。露光視野は 10 mm の円弧状領域である。

一方、AT & T の Freeman らは、露光面積は $20 \times 50\mu\text{m}^2$ と非常に狭いものの、一括露光により、ほぼ回折限界の $0.1\mu\text{m}$ 以下のパターンを解像している²⁾。図 3 に Freeman らの実験光学系を示す。ミラーは Mo/Si の多層膜で形成されており、X線マスクは Si の薄膜基

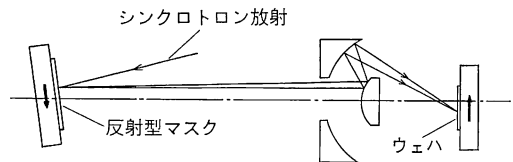


図 2 シュワルツシルト光学系の軸外を利用した走査型縮小投影システム

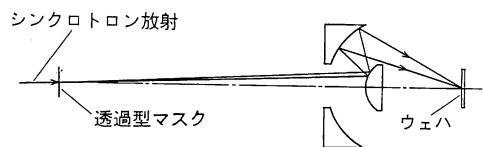


図 3 シュワルツシルト光学系の近軸付近を利用した一括型縮小投影システム

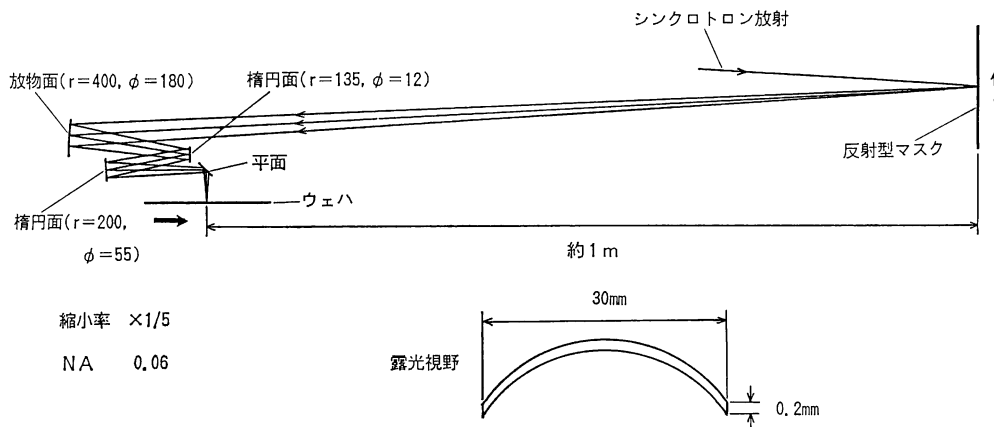


図4 非球面鏡を使用した走査型縮小投影光学系の設計例

板上に Ge の吸収体パターンを形成した透過型マスクである。また、NA は 0.08、縮小率は 1/20 倍で、照明光に波長 14 nm の SR 光を用いている。

これらは、露光面積の拡大化と高解像度を別々に達成した例であるが、シュワルツシルト光学系は球面で構成されているので、たとえ走査型としても、広い露光面積で、かつ $0.1 \mu\text{m}$ 以下の高い解像力を得ることは不可能である。そこで非球面を用いた光学系の設計例を図4に示す。

本光学系は、Offner の等倍走査型光学系を縮小光学系に改良したものと言える。Offner 光学系は凹面ミラー、凸面ミラー、凹面ミラーから構成され、各面を同心系かつ等倍系の配置にすることにより、各収差を補正している。いわば、収差補正上の特異解を形成しているといえる。しかし、縮小光学系を構成するためには、各面の条件(同心系かつ等倍系)をはずすことが必要となり、諸収差が問題となる。このため、球面系のみでは収差補正の自由度が不足し、非球面の導入が必須となる。

本光学系は、3面の非球面ミラー(実際には3面ともほぼ球面であるから、それらの曲率半径を図中に示す)を導入することにより各収差がほぼ除去され、光学系の縮小率が1/5倍で、NAを0.06と比較的大きくとることが可能となっている。また、マスク側は反射型マスクが使用できるように非テレセントリックな系とした。ウェハ直前の一面は、ウェハがX線をけらないために挿入した平面ミラーである。さらに、円弧状の視野にて、マスクとウェハを光学系の倍率だけ異なる速度で同期走査することにより、広い露光面積を得ることが可能となっている。

以上のように、非球面ミラーを導入した走査型の光学

系を採用すれば、表1の仕様を満たすような光学系を設計することは可能である。しかし、実用化のためには、高反射率多層膜ミラーの作製や、非球面形状の高精度での加工および検査など、多くの課題を解決しなければならない。

4.2 精度配分

同一ウェハ上に複数回露光を行う場合、マスクパターンと前層のパターンの重ね合わせ精度が重要である。これに対する主な誤差要因として、表2に示すような4項目が考えられる。また、表2に示す各誤差の許容値は、簡単のために、それらの誤差は互いに相関がないものとして、2.節の総合重ね合わせ精度とした値 $0.03 \mu\text{m}$ を均等に配分したものである。

4.3 X線マスク

現在、近接露光によるX線リソグラフィでは、透過型マスクが使用されているが、X線縮小投影露光法では、次の理由により、反射型マスクが使用されることになる。軟X線領域では、透過率が高い基板材料が見当たらず、基板を大変薄く(μm オーダー)作る必要がある。

表2 重ね合わせ精度に対する主な誤差要因とその許容値(ウェハの1ショット内で)

誤差要因	許容値(μm)
光学系の歪みのバラツキ注)	0.015
マスクパターンのディストーション	0.015
アライメント誤差	0.015
マスクとウェハの走査時の誤差	0.015
全ての合わせ誤差	0.030

注) 複数の号機を使用する場合、あるいは同一号機でも熱歪み等により生じる誤差

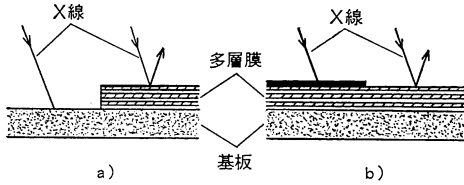


図 5 反射型X線マスクの構造

表 3 反射型X線マスクの仕様

項 目	要求仕様
パターン最小線幅	<0.5 μm
パターン領域	150×150 mm ²
パターンのディストーション (150×150 mm ² で)	<0.075 μm
反 射 率	>70%

このために、大面積のマスクで、基板とX線吸収体の応力により発生するパターン歪みを低減することは大変困難だからである³⁾。一方、反射型X線マスクは多層膜ミラーを利用して作ることができるので、基板を薄くする必要がなく、パターン歪みの発生を小さく抑えることができる。反射型X線マスクの構造として図5に示すようなものが提案されている。

図5のa)は多層膜面そのものにパターンニングしたもので、多層膜部分のみがX線を反射する。一方、b)は多層膜面上にX線吸収体でパターンを形成したもので、吸収体のない部分のみがX線を反射する。

表3に反射型X線マスクに対する仕様を示す。

4.4 アライメント

ウェハ上の前層パターンに対して重ね合わせ露光を行う場合、それとマスクパターンの正確な位置ずれ検出が必要である。このために、まず第一に考えられるのは、可視光を用いたX線と同軸の光学系によるオン軸シス・アライメント方式であるが、表2に示したような高精度を得ることは困難である。なぜならば、X線光学系のNAが可視光に対して小さ過ぎて、ウェハ上の微小領域に可視光を絞り込めない、あるいはウェハ上の微小なアライメントマークからの回折光を取り込めないからである。仮に、可視光に対してのみ、NAを大きくできれば可能であるが、実際にそのような光学系を設計することは難しい。第二に考えられるのは、X線光学系とは異なる光学系を用いたオフ軸シス・アライメント方式であるが、機械的誤差を含めて表2のような精度を達成することは至難の業である。また、X線そのものを利用するような方式も考えられるが、軟X線の大部分はウェ

ハ表面で吸収されるために、ほとんど反射も透過もせず、直接X線を検出することはできない。以上の理由により現状では有効なアライメント方式が見つかっておらず、今後の大きな課題である。

4.5 オートフォーカス

焦点深度 DOF を、波動光学的な式 ($DOF = \lambda / NA^2$)⁴⁾より求めると、解像力の仕様を0.1 μm と大変厳しくしているの、表4に示すように意外に浅く、X線光学系でもオートフォーカス機構が必須である。

この程度の精度は、従来の可視光による光学的手法でも達成可能であるが、この場合、オートフォーカス検出点とX線光学系の合焦点が一致していることが重要である。

4.6 マスクステージとウェハステージの同期走査

線状の視野にて露光を行う場合、露光域拡大化のために、マスクステージとウェハステージの同期走査が必須となる。この時、両者に同期ずれが起こると、前層のパターンに対して転写像が重ならないので、ウェハステージはマスクステージに対して正確に光学系の倍率と同一の比だけ遅く走査されなければならない。

転写像の位置ずれに寄与するステージの誤差は直進方向の駆動誤差(直進方向の指令位置からの同期ずれ)とヨーイングである。これらの許容値を表5に示す。ここでは簡単のために、両ステージの各誤差は互いに相関がないものとして、表2に示したマスクとウェハの走査時の許容誤差0.015 μm を、それらに均等に配分した。

このような精度を得るためには、ステージ自体の走り精度の向上と、レーザー干渉計により正確に同期をとりながらステージをサーボ駆動する技術の精度向上が不可欠である。

表 4 各X線波長における光学系の焦点深度

波 長 λ (nm)	焦点深度 (μm)
1	7.8
5	1.6
10	0.8

表 5 マスクステージとウェハステージの走り精度の許容値

項 目	必要精度
ウェハステージ駆動誤差 (直進方向)	0.01 μm
マスクステージ " (")	0.01 μm
ウェハステージのヨーイング	0.12 秒
マスクステージの "	0.12 秒

表 6 各X線波長における露光時間の見積り

要 因	波 長 λ (nm)		
	1	6	13
光源出力 (mW) ($\Delta\lambda/\lambda \sim 1\%$)	270	31	14
X線取出し角 (mrad ²)	1.5×5	1.5×5	1.5×5
X線取出し窓	無	無	無
装置内雰囲気 (Pa)	真空 (0.01)	真空 (0.01)	真空 (0.01)
ミラー系反射率 (6枚) (コンデンサーミラー 1枚) (反射型マスク 1枚) (ミラー光学系 4枚)	(0.71) ⁶ (Re/Mg 2, 800層) ($\Delta\lambda/\lambda \sim 0.04\%$)	(0.82) ⁶ (La/B 52層) ($\sim 2\%$)	(0.84) ⁶ (Rh/Si 10層) ($\sim 10\%$) ^注
露光時間 (秒/30×30 mm ²)	880	73	31

注) 多層膜の層数, 材質等により決まる反射率の半値全幅で, ここでは1/層数とする.

5. システム全体としての課題

システム全体として重要な項目である露光時間とその他の課題について述べる.

5.1 露光時間

露光時間を決定する要因として, 次のような項目があげられる.

- 放射光の分光強度
- X線ビーム取出し窓による吸収
- コンデンサーミラーの分光反射率および集光効率
- X線マスク, 各X線ミラーの分光反射率
- X線光路中での雰囲気による吸収
- X線レジスト感度

これらは, 露光時間に対して掛け算で効いてくるので, 諸条件により見積りが大きく異なるが, ここでは, 次のような仮定の下に見積りを行う. その結果を表6に示す.

1) 放射光源

高エネルギー物理学研究所のストレージングを想定して, その各諸元を以下に示す⁶⁾.

加速電圧 2.5 GeV 蓄積電流 300 mA^{*1}

曲率半径 8.7 m 臨界波長 0.3 nm

また, コンデンサーミラーにより制限されるビーム取出し角を, 垂直方向 1.5 mrad, 水平方向 5 mrad とする. ただし, 実際のビームの広がり角は $\lambda=1$ nm で 0.5 mrad, $\lambda=5, 10$ nm で 1 mrad 程度である.

2) X線ビーム取出し窓

取出し窓はないものとする. これは, 軟X線領域では, 窓材として, X線吸収の小さい適当な物質がないた

めである.

3) コンデンサーミラー, X線マスク, 各X線ミラーの反射率

いずれの反射率も全て等しいものとし, 理想的な材料の多層膜ミラーでかつ垂直入射の理論値とする⁶⁾.

4) コンデンサーミラーの集光効率

コンデンサーミラーの形状は理想的なものを仮定し, 反射したX線はマスク上の円弧状領域に100%集光されるものとする.

5) X線光路中の雰囲気

光路長は, ビームチャンバーと光学系を合わせて10 m, またそれらの雰囲気は 0.01 Pa の低真空とする. これは, いずれの気体も常圧ではX線吸収がかなり大きいためである.

6) X線レジスト感度

いずれの波長においても 100 mJ/cm² とする.

表6は大変理想的な仮定の下に見積りを行ったにもかかわらず, 目標とした露光時間には達していない. 特に, X線ミラーの反射率は現在 Mo/Si の多層膜平面ミラーで波長約 13 nm (Si の吸収端直後) のほぼ垂直入射に対して 50% 強であり, 他の吸収等も考慮すると, 実際の露光時間はさらに長くなる. したがって, 露光時間の短縮のためには, X線ミラーの反射率を理論値に近づけることはもちろんであるが, さらに強力なX線源, 高感度レジストの開発も合わせて必要である.

5.2 その他の課題

その他の主な課題として, 次のような項目があげられる.

1) 光学系の熱歪み

X線照射により, 光学系に熱歪みが生じると, 焦点位置がずれたり, 解像力が低下したりする. このため, 光

*1 設計値では 500 mA であるが, 現在, 300 mA で運転されている.

光学系の温度制御が必要である。しかし、光学系は真空もしくは減圧気体中に置かれることになるので、困難が予想される。

2) 最終的な解像線幅

初めに、X線光学系に必要な解像力を $0.1 \mu\text{m}$ としたが、実際には光学系のみでは最終的な解像線幅は決まらない。このほかに、走査系のガタや装置全体の振動、歪み等種々の要因が線幅に影響をあたえるので、それらを含めた見積りが必要である。

3) X線光学系の放射線損傷

放射線損傷によりX線ミラーの反射率が低下して、露光時間の増大や解像力の低下につながる事が予想される。

6. ま と め

以上、X線反射縮小投影露光装置について、各要素とシステム全体としての検討を行ったが、実用化までには、種々のブレイクスルーが必要であることが明らかになった。ことに、多層膜ミラーを含めた光学系の開発、アライメント法の開発、露光時間の短縮が大きな課題であり、X線源や高感度X線レジストを含めた要素技術の今後の進展に期待したい。

最後にX線光学系について有益な助言をしてくれたニコン光学技術開発部樋口朗氏、露光時間の見積りをしてくれた精機第二設計部河田眞太郎氏に深く感謝します。

文 献

- 1) H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii: "Soft X-ray reduction lithography using multilayer mirrors," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **7** (1989) 1648-1651.
- 2) T. E. Jewell, M. M. Becker, J. E. Bjorkholm, J. Bokor, 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 and O. R. Wood: "20 : 1 Projection soft X-ray lithography using Tri-level resist," *Symposium on Microlithography* (SPIE, 1990) pp. 90-98.
- 3) K.-H. Müller, P. Tischer and W. Windbracke: "Influence of absorber stress on the precision of X-ray masks," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **4** (1986) 230-234.
- 4) 久保田広: 波動光学 (岩波書店, 東京, 1971) p. 321.
- 5) 鳳紘一郎: "シンクロトロン放射光とX線リソグラフィ", *精密機械*, **50** (1984) 51-56.
- 6) A. E. Rosenbluth: "Refracting properties of X-ray multilayer devices," Ph. D. 請求論文, 1983, The University of Rochester.