

# 解説

## リソグラフィの進展と新しい光源

鳳 紘一郎

横浜国立大学工学部電子情報工学科 〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156

(1991年4月5日受理)

### Advancements in Lithography and Novel Radiation Sources

Koichiro HOH

Division of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240

#### 1. はじめに

超LSIに代表される集積エレクトロニクスの微細化・高密度化の進展は、図1に年次推移を示すように目ざましいテンポで進んできた。この躍進を支えた製造技術の支柱の一つが、半導体ウェーハ表面に塗ったレジスト(感光・感放射性薄膜)層に微細な回路パターンを焼き付けるリソグラフィ技術である。しかしながら今後さらに高密度化を続けようとする時、現行方式による微細加工の限界が次第に深刻な問題となりつつある。

この状況に突破口を開いて新しい道を見いだすための研究が活発に行われており、これについては本特集でそれぞれの専門の方が詳説される。本稿はその序説として、リソグラフィ技術の幾つかの要素を整理して考察し、また短波長の極限としてのX線リソグラフィ技術とその線源の開発動向を紹介する。

#### 2. リソグラフィの諸方式

リソグラフィ技術は、細く絞った粒子線によってパターンを線描する「描画」技術と、輻射によって原版(マスク)のパターンを試料(ウェーハなど)に焼き付ける「転写」技術とに大別される。図2に示すように、各種の手法が開発され、あるいは研究されているが、現在主力となっているのは図中に太線で示した、集束電子ビームによってマスク(あるいはレティクル)パターンを描画し、これを紫外線によってウェーハに転写する方式である。より微細なパターンが要求されるにつれて、転写に用いる波長はより短い deep UV の方へシフトしてお

り、また一足飛びに短い波長として、波長0.1~1nmの軟X線による転写(以下X線転写と略称する)が並行して研究されている。

一方、集束電子ビームによってパターンを直接ウェーハ上に描画する「直接描画」方式も、これと並行して開発が進められている<sup>2)</sup>。電子ビーム直接描画は、パターンの微細さ、ウェーハがゆがんでいるときに逐次補正できること、などに利点を持つが、量産効率(スループット)に関してはマスク転写方式と肩を並べることは難しく、カスタム仕様の回路製造や、研究・開発用ツールとしての使用が主になっている。集束イオンビームによっても描画が可能であり<sup>3)</sup>、微細さ、物質との相互作用が大きいことなど興味深い性質を持つが、描画の速度、露光領域(フィールド)の大きさなどに制約があり、まだ研究段階というべきである。

転写技術については電子やイオンの線束(フラッド・ビーム)による転写も考えられているが、マスクなどの点で問題が多く、研究は限られている<sup>4,5)</sup>。

以上のように整理すると、リソグラフィ技術の中で特に光学と関係の深いのは、紫外線およびX線、すなわち電磁波による転写技術である。したがって本稿も電磁波による転写技術に対象を絞るが、その中でも紫外線転写に関しては、エキシマー・レーザーによる短波長化や位相シフト法による解像度の向上が本特集に述べられている。そこで本稿では波長を極限にまで短くした場合であるX線転写を中心にして、紫外線転写に共通な問題も含めながら、転写技術の性能を決定する要因と解決すべき課題とを見ていきたい。なお、一般には上述のような描

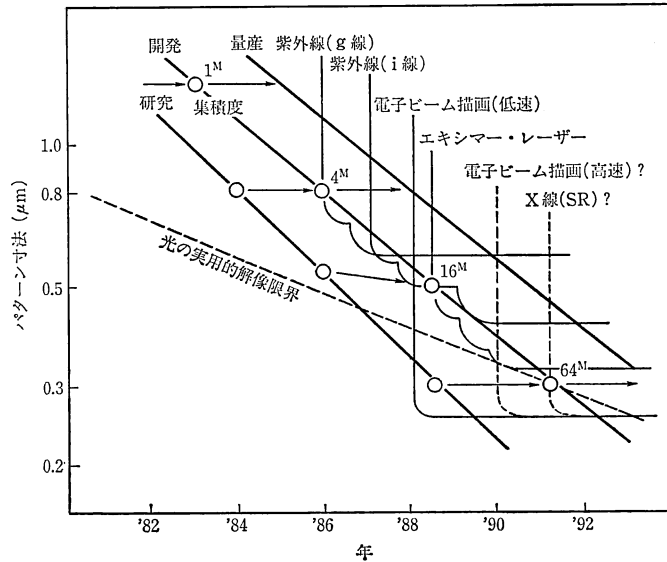


図 1 超 LSI の微細化 (ダイナミック RAM の集積度) の進展とリソグラフィ技術 (岡崎信次氏<sup>1)</sup>による). M はメガビット/チップを表す.

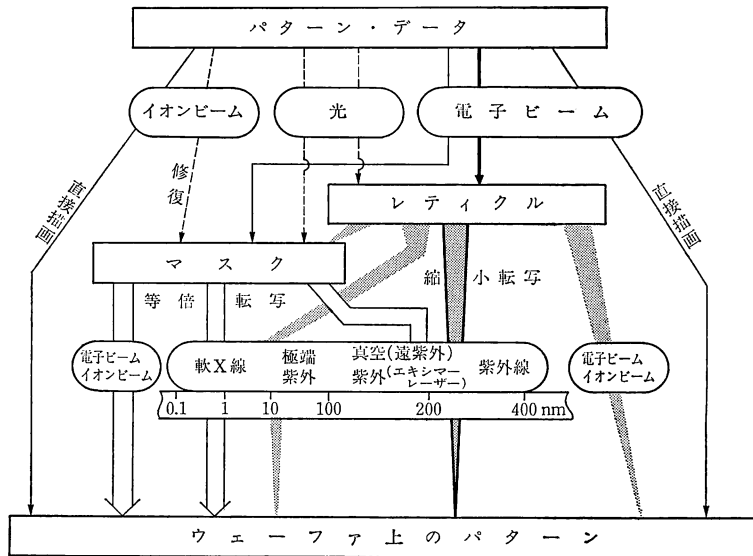


図 2 リソグラフィの諸方式とその相互関連

画と転写の厳密な区別をせずに漠然と「露光」と呼ぶことがある。以下本稿でも「露光」が慣用されている場合、および露光過程そのものを強調したい時にはこの語を使うことにする。<sup>7)</sup>

### 3. リソグラフィの高性能化

#### —X線転写を中心に—

#### 3.1 近接露光法の解像度

X線に対してはレンズやミラーで光学系を構成するこ

とが難しいため (最近のミラー光学系の試みについては 3.3 で触れる), 従来X線転写の実験はマスクとウェーハを密着あるいは近接させて行われてきた。これは紫外線転写の初期の形式である密着 (contact) あるいは近接 (proximity) 露光法にあたる。

通常のX線源は電子ビームを金属に当ててX線を生じさせる。この場合X線の発散角は大きく、近接露光を行った場合に半影ぼけやパターン寸法のずれなどの幾何学的誤差が問題になる<sup>6,7)</sup>。しかしシンクロトロン放射

光を用いれば、きわめて狭い角度内に集中した強度の大きいX線ビームが得られるので、線源からの距離を大きくとってほとんど平行なビームとして利用でき、これらの誤差は問題にならなくなる<sup>6,7)</sup>。また紫外線転写でもマスクに入射する紫外線をコリメータで平行光束にしておけば同じく問題はない。

幾何光学的誤差がなくなれば、近接露光で光学的に問題になるのはマスク・パターンのエッジでのフレネル回折である。定式化して表せばフレネル回折による $d_1$ は、

$$d_1 = k_1 \sqrt{\lambda \cdot g / 2} \quad (1)$$

となる<sup>8)</sup>。 $\lambda$ はX線波長、 $g$ はマスクとウェーハのギャップ長で、係数 $k_1$ はX線露光実験から求めた実測値では $k_1=1.5$ である<sup>9,10)</sup>。したがって図3に右上がりの直線で示すように、 $d_1$ は $\lambda^{1/2}$ の波長依存性をもつ。

実際のX線近接露光で解像度を制約するもう一つの要因は、X線がレジスト中に誘起した二次電子の広がり $R_g$ である。これは、入射X線光子(エネルギー1 keV程度)による励起に続いてカスケード的に発生した二次電子のうち、エネルギーが数十 eV まで下がったものがレジストの反応を引き起こすからである。二次電子の広がり $R_g$ はX線波長が短いほど大きく、図3の右下がりの線になる<sup>10)</sup>。これらを合わせて、解像度は図3のように極小値をもつ。なお、X線露光における二次電子の広がり $R_g$ は、10 keV以上のエネルギーの電子が入射する電子ビーム露光に比べれば小さく、そのためX線露光では図4に示すように、単層のレジストでも線幅に比べて高さ(レジスト厚さ)の高いレジスト・パターンが得られる。これはその後の微細加工をやりやすくするもの

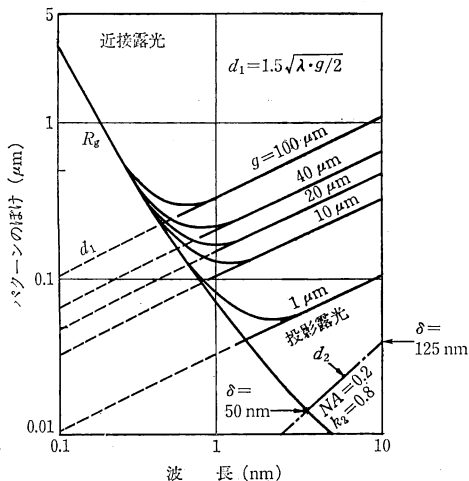


図3 X線領域での近接および投影露光の解像度

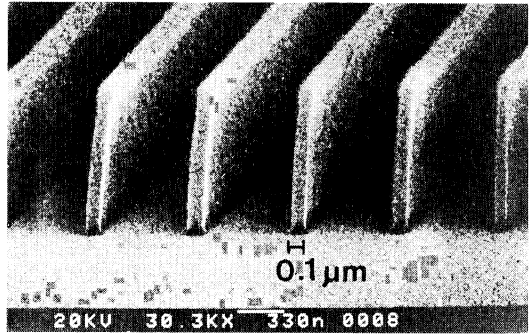


図4 X線(シンクロトロン放射光)転写によるレジストパターン(電子技術総合研究所・阿刀田伸史氏による)

で、X線露光の長所の一つである<sup>11)</sup>。

近接露光の総合的解像度については、最近にも設計理論やシミュレーションが発表されている<sup>12,13)</sup>。

### 3.2 投影露光法の解像度

紫外線転写は、投影露光法の採用により超 LSI の量産装置として長足の進歩をとげた。投影露光法は等倍投影と縮小投影とに分類される。

等倍投影は図5のようなミラー光学系でマスクの像をウェーハ面に結像させるもので、色収差を生じない利点があるが、1:1投影なのでマスク・パターンを原寸で高精度に作っておく必要がある。ミラー光学系で1 $\mu$ mよりよい解像度で結像できる領域は、図5のように細い弧状のスリットに限られるため、マスクとウェーハを同時に並進させて、この弧状スリットがウェーハ上を走査するようにする。

これに対して縮小投影では、超 LSI の1~2チップ程度の部分の拡大寸法のマスク(レティクル)を作り、その像を図6のようにレンズ系で例えば1/10に縮小し

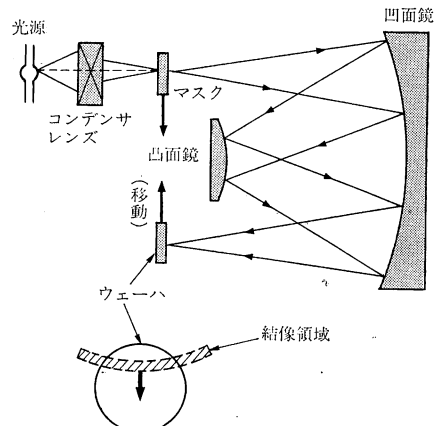


図5 紫外線等倍投影による走査露光

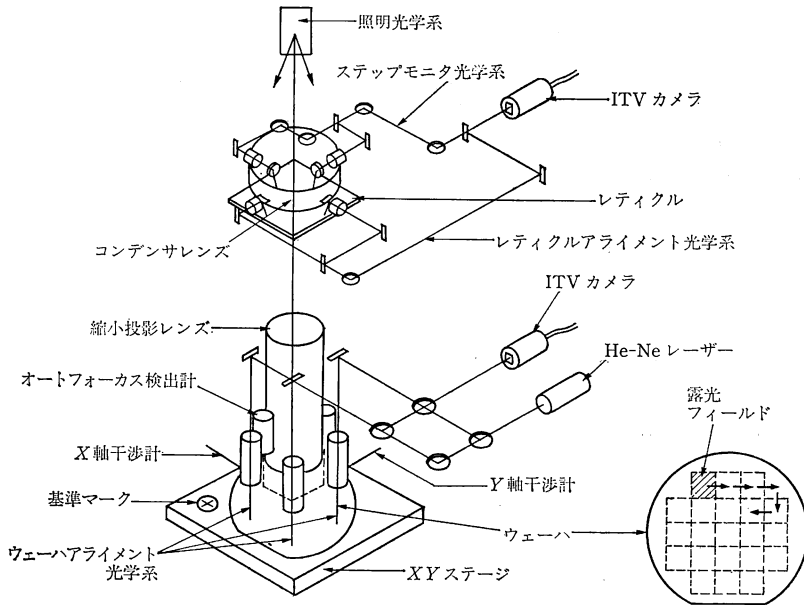


図 6 紫外線縮小投影によるステップ・アンド・リピート露光

てウェーハ面に投影する。マスクのパターン寸法への要請は緩くなるが露光面積が小さいので、一つの領域(フィールド)を露光したらウェーハをステップ移動させ、隣のフィールドの露光に移る。この方式をステップ・アンド・リピートと呼び、これを採用した露光装置はステッパーと通称される。

X線転写に投影露光法を採用する研究は最近緒についたばかりである。本特集で別に詳しい紹介があるので、ここでは回折による解像度限界に着目して、紫外からX線までの波長の投影露光法に関する総合的検討を述べる。

投影露光における光学的なパターンのぼけ  $d_2$  はフラウンホーファー回折によって支配され、光学系の開口数を  $NA$  とすると、

$$d_2 = k_2 \lambda / NA \quad (2)$$

で表される<sup>14)</sup>。係数  $k_2$  は理論上は 0.6 であるが、紫外線転写におけるレジストの露光-現像特性も含めた実験値 0.8 を使う場合もある。(2)式によれば  $d_2 \propto \lambda$  であるから、投影露光は近接露光 ( $d_1 \propto \lambda^{1/2}$ ) より波長短縮化の効果が大きい。図3に併せて示す通り、現在のX線近接露光より長波長の  $\lambda \sim 10 \text{ nm}$  でも  $0.05 \mu\text{m}$  よりよい解像度が得られる。ただし(3)式で表される<sup>14)</sup>焦点深度  $\delta$

$$\delta = \lambda / 2(NA)^2 \quad (3)$$

も小さくなることを考慮しなければならない。 $\delta$  はウェーハ面の凹凸より大きくとる必要がある。(2)式と(3)式から波長  $\lambda$  と開口数  $NA$  をパラメーターとして ( $d_2$ ,

$\delta$ ) のダイアグラムを描くと図7のようになる<sup>15)</sup>。図によれば、 $\lambda \sim 10 \text{ nm}$  の波長を使って  $d_2 \sim 0.06 \mu\text{m}$ ,  $\delta \sim 0.5 \mu\text{m}$  とすることが可能である。ただし  $NA$  が 0.1 と小さいので、光学系や装置の設計に従来と違う工夫が必要であろう。

$\lambda \sim 1 \text{ nm}$  のX線は斜め入射でないと反射されないが<sup>16,28)</sup>,  $\lambda \sim 10 \text{ nm}$  なら多層膜ミラー<sup>17)</sup>を使って直入射の反射光学系が可能である<sup>18,19)</sup>。ただ  $\lambda \sim 10 \text{ nm}$  では物

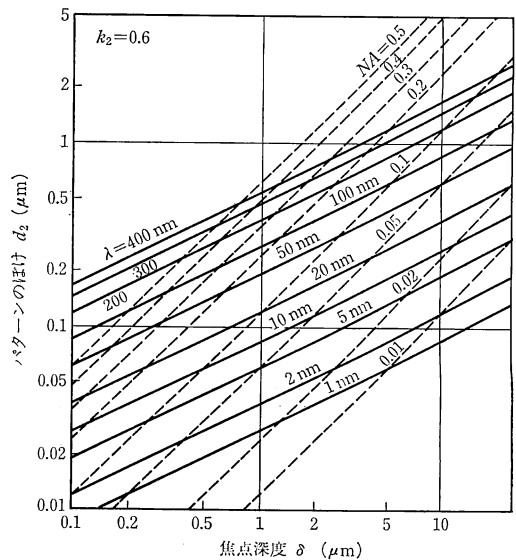


図 7 投影露光法の解像度の焦点深度 ( $k_2=0.6$  の場合)

質中の吸収が大きいので、マスクも反射型を用い、多層レジスト法を採用する必要がある。

軟X線縮小投影に使われる光学系については本特集で別に述べられているが、紫外線縮小投影の方でも短波長化にしたがってミラー光学系を採用し、1フィールドは弧状スリットの走査で露光してフィールド間をステップ移動する、ステップ・アンド・スキャン方式が開発されている<sup>20)</sup>。

3.3 マスク

X線近接露光に使われるマスクは紫外線露光におけるガラス・マスクと異なり、X線が透過できる厚さ2~3 $\mu\text{m}$ の窒化シリコンや窒化ホウ素の薄膜(支持膜)の上に、X線に不透明な金属薄膜でパターンを形成したものである。このように脆弱な構造なので、製作中やその後の使用時に寸法の狂いを生じないように、薄膜構造の内部歪を緩和させるなどの対策が研究されている<sup>21)</sup>。この問題の解決はX線近接露光の実用化のキーポイントの一つである<sup>22)</sup>。

3.4 位置合わせ

超 LSI の製造では 10 回以上の重ね露光が必要であり、その際パターンの位置ずれを線幅の 1/5 から 1/10 以内に抑えなければならない。X線露光のもつ 0.1 $\mu\text{m}$  オーダーのパターン転写能力を重ね露光でも生かすためには、現行の紫外線転写の位置合わせ方式(例えば図6)では対応できないので、新しい位置合わせ技術の研究が行われている<sup>23)</sup>。図8に示すのはマスクとウェーハに2種類3個の回折格子を設け、レーザー光の回折干渉

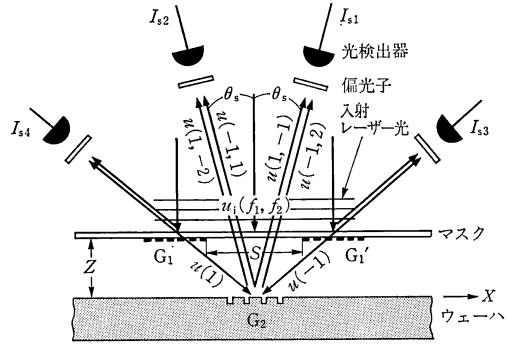


図8 3回折格子・光ヘテロダイン法による位置合わせの原理図(光検出器  $I_{s3}$  と  $I_{s4}$  は、レーザー光とマスク面の直交性の監視用)

を光ヘテロダイン方式で検出するもので、0.01 $\mu\text{m}$ の精度が得られている<sup>24)</sup>。図9はこれを組み込んだ露光実験装置で、シンクロトロン放射光をX線源としている<sup>25)</sup>。この例に限らず一般にX線露光では線源側は真空であるが、マスクとウェーハは、位置合わせ時の動かしやすさとX線照射に伴う温度上昇の抑制のために、大気圧に近い雰囲気(Heなど)の中に置きたい。そこで線源側と露光室の間は厚さ25 $\mu\text{m}$ 程度のBe窓で仕切られている。

4. 新しい光源—放射光源とその高度化—

4.1 シンクロトロン放射光

シンクロトロン放射光(synchrotron radiation)は、光速に近い速さの電子が加速度運動を行う(たとえば磁

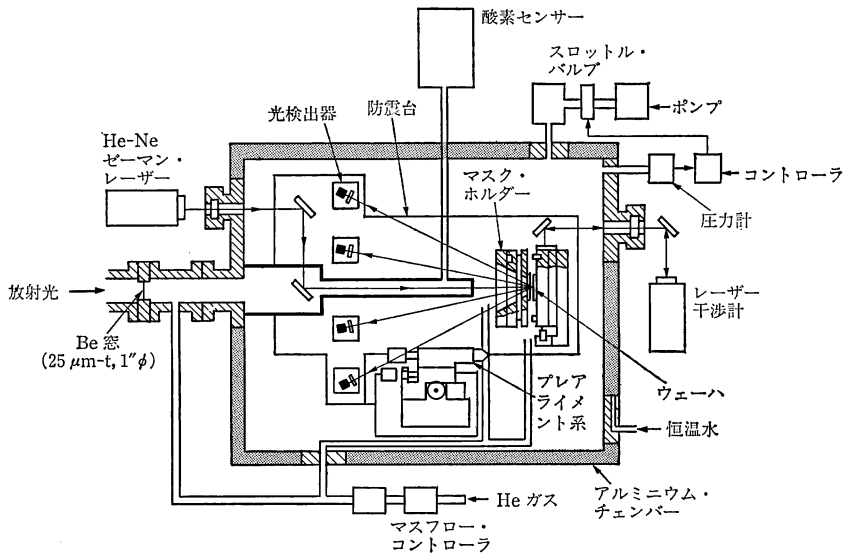


図9 X線位置合わせ露光実験装置(電子技術総合研究所)

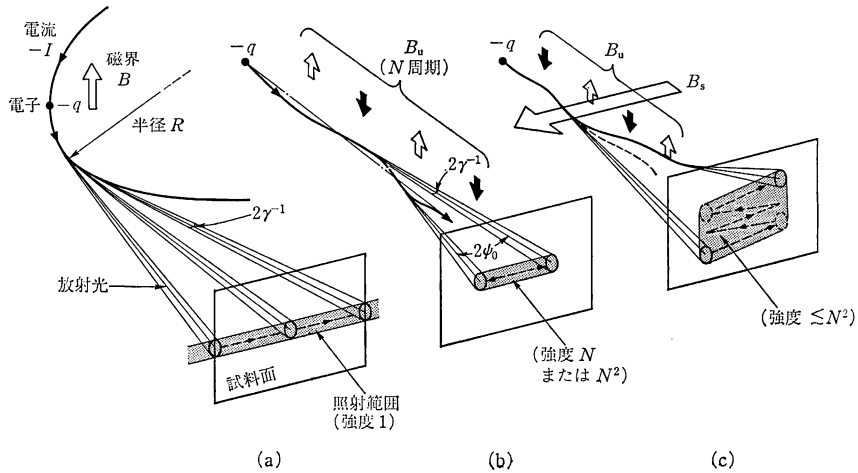


図 10 シンクロトロン放射光の原理図。(a)電子蓄積リングからの放射光。(b)多極ウィグラーまたはアンジュレータ。(c)露光面積拡大の提案(スライディング・ウィグラー)

界中で円運動する)とき、図 10 のようにその軌道の接線方向に放射される電磁波である。わが国では SOR (synchrotron orbital radiation の略) と呼ばれることもあるが、以下では「放射光」と略称する。図 11 に放射光のスペクトル<sup>27)</sup>を示す。電子の運動エネルギー  $E$  が大きいほどピークは短波長にシフトする。レーザーが実現していない真空紫外より短波長の領域では最強の光源である。図 11 でピークになる波長  $\lambda_p$  は、

$$\lambda_p(\text{nm}) = 0.192R(\text{m})/E^2(\text{GeV}) \quad (4)$$

で与えられる。ここに  $R$  は電子軌道の曲率半径で、偏向磁界の磁束密度  $B$  とは

$$R(\text{m}) = E/qB = 3.34E(\text{GeV})/B(\text{T}) \quad (5)$$

の関係にある ( $q$  は電子電荷)。放射光ビームは短波長成分ほど図 10 のように細い円錐内に集中しており、X 線領域でのビーム半頂角はおおよそ  $\gamma^{-1}(\text{rad})$  になる。

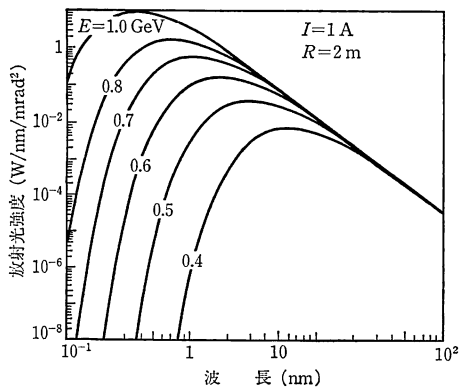


図 11 シンクロトロン放射光のスペクトル

ここに

$$\gamma = E/mc^2 = E(\text{MeV})/0.511 \quad (6)$$

である ( $m$  は電子の静止質量,  $c$  は光速)。

放射光を発生させる装置の代表は、電子を周回させて放射光を持続的に取り出す電子蓄積リングである。放射光の強度は蓄積電子の運ぶ電流  $I$  に比例する。電子蓄積リングは初め物性研究用の強力な X 線・真空紫外光源として作られたが、リソグラフィを中心とする工学的研究も現在では重要なテーマになっている。表 1 に内外の主な大型および中型電子蓄積リングを掲げる。これらの装置では数基に分割した偏向電磁石の間の直線部に、電子軌道を制御するための四重極電磁石や、電子の通路を  $10^{-9} \sim 10^{-7}$  Pa の超高真空に保つ真空排気系が置かれるので、 $E \leq 1$  GeV の中型装置でも全体の直径は 10 m 程度になる<sup>26)</sup>。工業的利用のためにこれを小型化する研究については 4.2 に紹介する。

放射光ビームの平行性のよさと強度が大きいことは、X 線転写の高精度・高効率化に大きな力となるが、反面、図 10 (a) のようにビームの上下方向の広がりも狭く、10 m 離れても 5 mm 程度である。これを 1 cm 以上に広げてリソグラフィの露光フィールドに適合させるために、マスクとウェーハを一体として並進させる、ミラーで斜め反射させてそのミラーを振る<sup>28)</sup>、固定したミラーでビームを重ね合わせたり、ビーム断面を整形する<sup>29)</sup>、蓄積リングの電子軌道を揺動させる<sup>30)</sup>などの提案と実験が行われている。また光源装置に関する提案もあり<sup>29)</sup>、これについては 4.3 でふれる。

表1 代表的な大型および中型電子蓄積リング

名称	機関	場所	$E$ (GeV)	$R$ (m)	$I$ (A)	$\lambda_p$ (nm)
SOR-RING	東大物性研	田無(日)	0.38	1.1	0.3	3.85
TERAS	電子技術総合研	つくば(日)	0.80	2.0	0.25	0.75
Photon Factory	高エネルギー物理学研	つくば(日)	2.5	8.7	0.3	0.11
UV SOR	分子科学研	岡崎(日)	0.75	2.2	0.5	1.00
NAR	NTT	厚木(日)	0.80	1.8	0.5	0.67
SORTEC	ソルテック	つくば(日)	1.0	2.8	0.5	0.54
SPEAR	スタンフォード大	スタンフォード(米)	<3.5	12.8	0.1	>0.06
NLSL X-ray	ブルックヘブン国立研	アプトン(米)	2.5	6.9	0.25	0.08
NLSL VUV			0.75	1.9	0.4	0.86
DORIS II	DESY	ハンブルク(独)	3.7	12.2	0.1	0.05
BESSY I	BESSY	ベルリン(独)	0.8	1.8	0.6	0.68

(詳細およびここに掲げなかったリングについては、文献27)を参照.)

4.2 放射光源の小型化

現在の装置と同程度の波長域と強度を維持してリングを小さくするには、偏向磁界を強くしなければならない。それには超伝導磁石の採用が考えられる。180°の電子偏向部を両端の2箇所に設けたレーストラック型の小型蓄積リング(図12(b))の計画が1983年以降ドイツや英国で発表された<sup>31,32)</sup>。現在この形式の小型リングはNTT厚木研究所で稼動に成功している<sup>33)</sup>。小型化のためにはリングだけでなく、リングへの電子入射装置や、放射光を取り出すビームラインなどの全体を総合した小型化の設計と、安定で効率的な電子入射・蓄積技術の確立が必要とされる<sup>34)</sup>。わが国では従来形式のリングから出発して漸次小型化していく開発が行われている<sup>34)</sup>(図12(a))ほか、一体の円形磁石中で電子を周回させる

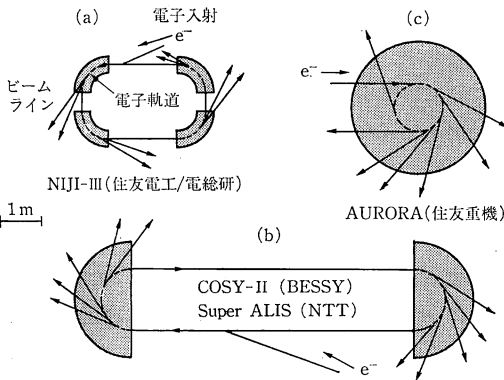


図12 小型電子蓄積リングの諸方式。(a)四角型、(b)レーストラック型、(c)単体磁石型。(ビームラインは必ずしも全数が描かれてはいない)

リング<sup>35)</sup>(図12(c))も試作されている。

4.3 ウィグラー、アンジュレータと新しい構想

直進する電子の軌道の一部を強力な磁石(永久磁石が使われる場合もある)で曲げて放射光を得る装置を、一般にウィグラーと呼ぶ。特に図10(b)および図13のように、磁界  $B_u$  の向きを交互に反転させた磁石を並べて電子に  $N$  周期の蛇行軌道を描かせる多極ウィグラーでは、放射光の強度が重ね合わされて  $N$  倍になる。さらにここで  $\phi_0 \ll r^{-1}$  ( $\phi_0$  は放射光ビームの最大振れ角) とすると干渉効果が起こって特定の波長

$$\lambda_1 = (1 + K^2)\lambda_0/2\gamma^2 \quad (7)$$

が強め合い、強度が  $N^2$  倍の準単色光が得られる。これがアンジュレータ<sup>36)</sup>である。ここに  $\lambda_0$  は磁界反転の周期長で、パラメータ  $K$  は磁石の長さを  $l_1$ 、間隙を  $l_2$  として、

$$K = (\phi_0/\lambda^{-1})\sqrt{(4l_1 + 6l_2)/3\lambda_0} \quad (8)$$

で与えられる(図13参照)。

ウィグラーやアンジュレータは物性研究用の光源として使われ始めたところで、 $N=30$  くらいのアンジュレ

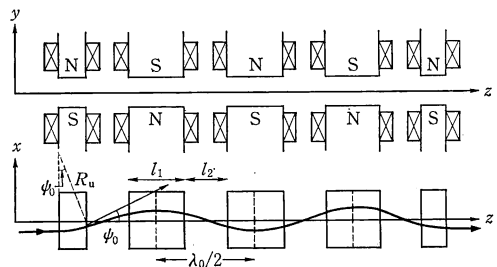


図13 多極ウィグラーもしくはアンジュレータの構造

ータも建設されているが、リソグラフィへの適用例はまだほとんどない。特にアンジュレータを波長 1 nm 領域で動作させるには現在より強い永久磁石が必要である。しかし実現すれば強力な X 線源となるものであり、またこれらの構造は自由電子レーザーにもつながるので、今後の発展が注目される。

これらの装置はリソグラフィ用にはビームが細すぎる短所を持っているが、同様の構造で露光フィールドを大きくする提案がなされている<sup>16,29,37,38)</sup>。図 10(c)のように多極ウィグラーやアンジュレータと同じくらいの  $N$  数の磁石列の磁界にそれと直交する弱い一様磁界  $B_z$  を重ねると、電子は蛇行しながら垂直な方向にも軌道がゆるく曲がるので、照射域が垂直方向に広がる。水平方向の  $\phi_0$  を適切に選べば、縦横方向ともリソグラフィに十分な寸法の領域を、しかも電子蓄積リングの  $N$  倍または  $N^2$  倍に近い強度で照射できる放射光源が得られると期待される。

## 5. おわりに

現段階のリソグラフィ技術は、紫外線転写の能力をぎりぎりまで引き出す努力が続けられている一方、X 線転写については実用化に障害となる弱点の克服が課題となっている。現在主流の座を占めている電子ビームマスク描画-紫外線転写の方式が、64 M ビット・メモリ以降の微細化の進展にどこまで対応できるのか、片や X 線転写が、既存プロセスを大幅に置き換えて採用される必須性と経済性をいつ獲得するのか、今後の数年の推移は工学の上からも重要な意義を持つと考えられる。

## 文 献

- 1) S. Okazaki: "Advanced lithography for ULSI," VLSI Workshop (Honolulu, June, 1990).
- 2) 右高正俊: "電子ビーム描画技術", 半導体リソグラフィ技術, 鳳絏一郎編著 (産業図書, 1984) pp. 129-155.
- 3) 蒲生健次: "集束イオンビーム技術", ULSI プロセスの基礎技術, 古川静二郎編 (丸善, 1991) pp. 171-202.
- 4) W. Zapka, W. Haug and H. Bohlen: "Precise mask-to-wafer gap sensing established in the EBP-lithography tool," *Microelectron. Eng.*, **3** (1985) 125-130.
- 5) G. Stangl, F. Rudenauer, W. Maurer and W. Fal-lmann: "Submicron lithography and DUV-master masks made by ion projection lithography," *Microelectron. Eng.*, **3** (1985) 167-171.
- 6) 鳳絏一郎: "X 線転写技術", 文献 2) と同書, pp. 179-197.
- 7) 鳳絏一郎: "X 線リソグラフィ", 文献 3) と同書, pp. 65-87.
- 8) 鳳絏一郎: "露光装置", 文献 2) と同書, pp. 81-102.
- 9) N. Atoda, H. Kawakatsu, H. Tanino, S. Ichimura, M. Hirata and K. Hoh: "Diffraction effects on pattern replication with synchrotron radiation," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B1** (1983) 1267-1270.
- 10) 阿刀田伸史: "放射光リソグラフィの現状と将来", 放射光 (日本放射光学会誌), **2**, 2 (1989) 3-17.
- 11) N. Atoda and K. Hoh: "X-ray lithography," 1987 Int. Symp. on VLSI Technology, Systems and Applications, Taipei, Tech. Digest (1987) pp. 48-53.
- 12) B. J. Lin: "A new perspective on proximity printing: From ultraviolet to X ray," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8** (1990) 1539-1546.
- 13) J. Z. Y. Guo, G. Chen, V. White, P. Anderson and F. Cerrina: "Aerial image formation in synchrotron-radiation-based X-ray lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8** (1990) 1551-1556.
- 14) J. D. Cuthbert: "Optical projection printing," *Solid State Technol.*, Aug. (1977) 59-69.
- 15) K. Hoh and H. Tanino: "Feasibility study on the extreme UV/soft X-ray projection-type lithography," *Bull. Electrotech. Lab.* (電総研集報), **49** (1985) 983-990.
- 16) 鳳絏一郎, 谷野浩史, 阿刀田伸史: "シンクロトロン放射光", サブミクロン・リソグラフィ総合技術資料集, 難波進監修 (サイエンス・フォーラム社, 1985) pp. 74-95.
- 17) 波岡 武, 山本正樹, 荒井 彰: "軟 X 線用多層膜ミラーの設計・製作・評価", 精密工学会誌, **52** (1986) 1843-1846.
- 18) N. M. Ceglie, A. M. Hawryluk, D. G. Stearns, D. P. Gaines and R. S. Rosen: "Soft X-ray projection lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8** (1990) 1325-1328.
- 19) J. E. Bjorkholm, *et al.*: "Reduction imaging at 14 nm using multilayer-coated optics," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8** (1990) 1509-1513.
- 20) J. D. Buckley, D. N. Galbur and C. Karatzas: "Step-and-scan lithography using reduction optics," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B7** (1989) 1607-1612.
- 21) T. Kanayama, M. Sugawara and J. Itoh: "Reduction in X-ray mask distortion using amorphous-WN<sub>x</sub> absorber stress-compensated with ion bombardment," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B6** (1988) 174-177.
- 22) X 線マスクの安定性に関する最近の研究については, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8**, No. 6 (Nov./Dec., 1990) 参照.
- 23) K. Koga, *et al.*: "High-performance synchrotron orbital radiation X-ray stepper," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8** (1990) 1633-1637.
- 24) 伊藤順司, 金山敏彦: "三つの回折格子を用いた光ヘテロダイン測定による高精度位置合わせ技術", 応用物理, **56** (1987) 1490-1494.
- 25) J. Itoh, T. Kanayama, N. Atoda and K. Hoh: "Fine-alignment exposure system for synchrotron X-ray lithography," *Rev. Sci. Instrum.*, **60** (1989) 1638-1642.
- 26) T. Tomimasu, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado and M. Chiwaki: "A 600-MeV ETL electron storage ring," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-30** (1983) 3133-3135.
- 27) H. Kobayakawa and K. Huke: "Worldwide census of synchrotron radiation facilities," *Rev. Sci. Instrum.*, **60** (1989) 2548-2561.
- 28) R. P. Haelbich, J. P. Silverman, W. D. Grobman, J. R. Maldonado and J. M. Warlaumont: "Design and performance of an X-ray lithography beam line at a storage ring," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B1** (1983)



1262-1266.

- 29) H. Tanino, K. Hoh, M. Hirata, N. Atoda and S. Ichimura: "Proposals and experiments on large area exposure in synchrotron radiation lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B3** (1985) 232-236.
- 30) H. Tanino, K. Hoh, M. Hirata, S. Ichimura, N. Atoda, T. Tomimasu, T. Noguchi, S. Sugiyama and T. Yamazaki: "Large area exposure in synchrotron radiation lithography utilizing the steering of the electron orbit in the storage ring," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22** (1983) L677-L679.
- 31) A. Heuberger: "X-ray lithography," *Solid State Technol.*, **29**, 2 (1986) 93-101.
- 32) D. E. Andrews and M. N. Wilson: "High-energy lithography illumination by Oxford's synchrotron: A compact superconducting synchrotron X-ray source," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B7** (1989) 1696-1701.
- 33) 北山豊樹, 早坂東亜: "NTT 電子蓄積リング", 放射光 (日本放射光学会誌), **2**, 4 (1989) 33-41.
- 34) T. Tomimasu: "Review of Japanese compact electron storage rings and their applications," *Rev. Sci. Instrum.*, **60** (1989) 1622-1627.
- 35) H. Yamada: "Commissioning of aurora: The smallest synchrotron light source," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8** (1990) 1628-1632.
- 36) 北村英男: "放射光とアンジュレータ", 光学, **13** (1984) 2-9.
- 37) H. Tanino and K. Hoh: "Stationary large area exposure in synchrotron radiation lithography utilizing a new arrangement of magnets applied to the storage ring," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22** (1983) L718-L720.
- 38) H. Tanino and K. Hoh: "Coherent operation of sliding wiggler for stationary large area exposure in synchrotron radiation lithography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23** (1984) 131.