放射光の応用例 (2)

放射光リソグラフィ

阿刀田 伸 史

電子技術総合研究所 〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

(1986年3月10日 受理)

Synchrotron Radiation Lithography

Nobufumi ATODA

Electrotechnical Laboratory

1-1-4 Umezono, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

(Received March 10, 1986)

Fundamental aspects and present status of synchrotron radiation lithography (SRL) are described. The resolution is limited mainly by Fresnel diffraction and the penetration range of photoelectrons within the resist layer. Wavelength dependences of these factors indicate that the optimum resolution of $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ can be obtained at the wavelength of $6\sim 10\ \text{\AA}$. Throughput attainable with SRL in a step and repeat regime is evaluated on the basis of exposure field size which affords overlay accuracy of $1/4$ of the minimum linewidth. The result shows that reasonable throughput in sub half micrometer pattern replication is possible by use of resists with moderate sensitivity in the order of $100\text{ mJ}/\text{cm}^2$ or less if X-ray flux is as high as that produced by a normal storage ring with energy of 800 MeV and current of 500 mA. Discussions on requirements for compact storage ring, enlargement of exposure field, temperature rise in masks due to high flux irradiation, and factors affecting the overlay accuracy, together with some experimental results are also presented.

1. はじめに

半導体集積回路は、この十数年にわたり、3年でほぼ4倍という目覚ましい割合で高集積化を続けている。これを支えてきたのは、微細加工技術の向上であるが、とりわけ、デバイス加工の出発点となるリソグラフィの役割は重要である。

これまで LSI (大規模集積回路) 生産の主役となってきたのは光リソグラフィであり、現在もその適用範囲をサブミクロン領域まで拡張するための技術開発が続けられている。しかし、パタン寸法が波長オーダーに近づくにつれて困難が増大し、実用的には $0.5\ \mu\text{m}$ 程度が限界と考えられている。このような段階に至るのは、6~7年後のことと予測されており¹⁾、光リソグラフィに代る、より高解像度で、かつ充分スループットが高いリソグラフィ技術の開発が急務となっている。

X線リソグラフィは、1972年に Spears と Smith にによって提案^{2,3)}されて以来、光リソグラフィに代り得る

転写技術として、多くの研究が積み重ねられてきた。しかし従来用いられている電子線励起型X線源では、低輝度のため充分なスループットが得られず、実用化を図る上での大きな障害となっている。このため各種の新しいX線源が検討されているが、なかでもシンクロトロン放射光に含まれる強力で指向性の良い軟X線は、スループットのみならず解像性の点からも理想的であり、超々LSI 製作への応用が期待されている。

放射光リソグラフィの有用性を示す実験結果が最初に報告されたのは、1976年のことである^{4,5)}。我国では、大阪大学の研究者による実験がこれに続いた⁶⁾。その後国内・外で、電子蓄積リングにリソグラフィ専用のビームラインが設置され、本格的な研究が行われるようになってきた。筆者らも、電子技術総合研究所に建設された蓄積リング ETL-TERAS⁷⁾ にリソグラフィ用ビームラインを設置し、1982年より基礎的な実験を行っている。ここでは、我々の検討結果を交えながら、放射光リソグラフィの特徴や研究の動向などについて概説する。

2. 基本性能

放射光リソグラフィは、放射光に含まれる軟X線を用いて、マスクパターンをレジスト膜に転写するものであり、原理的には従来のX線リソグラフィと同様である。マスクやレジストも既存のものを用いている例が多い。

リソグラフィ用線源として見た場合、放射光の最大の利点は、放射パワーが大きく（電子線励起型線源の100倍以上）、高スループットが得られること、および指向性が強く（拡がり角1 mrad以下）、高解像性であることである。これらの性能は、蓄積電子のエネルギーや電流、使用波長範囲などに依存するが、蓄積リングの規模や価格が放射光リソグラフィの実用化に当たっての問題となっていることを考えると、デバイス製作上から要求されるスループット、解像度、使用レジストの性能などに対して蓄積リングのパラメータを最適化することは重要である。以下、この点を念頭におきながら、放射光リソグラフィの基本性能について検討する。

なお、放射光はパルス状に放射されるが、繰り返しが速いためリソグラフィ上は連続とみなせる。

2.1 吸収エネルギーとレジストの反応

X線露光によるレジスト高分子の主鎖切断（ポジ型レジスト）、あるいは架橋（ネガ型レジスト）反応は、X線光子の吸収に伴って励起される光電子による2次の効果と考えられている⁸⁾。即ち、エネルギー吸収過程を別にすれば、電子ビーム露光の場合と本質的に同じ現象であり、吸収エネルギーとG値（吸収エネルギー100 eV当たりの反応の数）により記述できる。また、電子ビームとX線とで、共通のレジストを使うことができる。

放射光のパワースペクトル $P(\lambda, \theta)$ は、蓄積電子のエネルギー E 、電流 I 、電子軌道の曲率半径 R または偏向磁界強度 B から理論的に計算できる⁹⁾。ここで、 λ は波長、 θ はたて方向（軌道面に垂直な方向）への角度である。放射光は連続スペクトルであるが、レジスト露光に有効に寄与する波長範囲は、リソグラフィシステムの主要構成要素であるX線取り出し窓、マスク、レジストなどにおける分光透過・吸収特性により変化する。

窓（20 μm 厚の Be）およびマスク支持膜（2 μm 厚の窒化シリコン）透過後のスペクトル、およびレジスト（PMMA；ポリメチルメタクリレート）に吸収されるパワー密度を、放射点からの距離 $L=10\text{ m}$ の位置において計算した結果を、Fig. 1 に示す。図中、6.7 $\text{\AA}$ 近傍の不連続的变化は、マスク支持膜の構成原子である Si の吸収端によるものである。放射光のスペクトルのうち、長波長側は窓やマスク支持膜で吸収され、一方短波長になるほどレジスト中での吸収は小さくなる。この結果、

Fig. 1 Spectral changes of synchrotron radiation. A: source spectrum, B: spectrum after transmission through 20 μm thick Be window, C: spectrum after the Be window and 2 μm thick Si_3N_4 mask membrane, D: power absorbed into PMMA after transmission through the Be window and the mask membrane.

Fig. 2 Ring energy dependence of effective incident power on the resist (PMMA) surface P_0 , mean absorption coefficient $\bar{\mu}$, and mean wavelength $\bar{\lambda}$ averaged over the spectral absorbed power in the resist.

最終的にレジストに吸収されるのは、波長 10 $\text{\AA}$ 近傍をピークとする、半値幅 4 $\text{\AA}$ 程度の狭い波長範囲のものだけとなる。

露光によるレジストの反応は、G 値に波長依存性がなければ、波長について積分した吸収パワー ΔP に比例することになる。計算により求めた ΔP のレジスト膜中での減衰は、次式で近似できる¹⁰⁾。

$$\Delta P = \bar{\mu} P_0 \exp(-\bar{\mu} z) \quad (1)$$

ここで、 z はレジスト膜中への深さ、 P_0 はレジスト中での吸収の効果も含んだ実効的な入射強度で、蓄積電子のエネルギー E 、窓やマスク支持膜の材質や膜厚、レジストの分光吸収係数により変化する。 $\bar{\mu}$ は平均的な吸収係数であり、入射放射光の波長分布やレジストの構成原子に依存する。

P_0 、 $\bar{\mu}$ 、および吸収パワーに関する平均波長 $\bar{\lambda}$ と E との関係を示す。Fig. 2 に示す。ここで、窓は厚さ $20 \mu\text{m}$ の Be、マスク支持膜は厚さ $2 \mu\text{m}$ の Si_3N_4 、レジストは PMMA である。 E が高いほど P_0 は急激に増大しており、スループットの面から望ましいように見える。しかし、 E が高いと、リングの規模が大きくなることや、透過性の強い短波長成分が増加し、マスクコントラスト（透明部と吸収体部における透過率の比）が低下したり、高エネルギーの光電子が励起されて解像性を低下させる、などの問題がでてくる。従って、実用的なスループットが実現できる範囲内で、 E が低い方が望ましい。この点に関しては後で再び触れる。

最近、モノクロメータで分光した放射光の露光によるポリ-2-メチルペンテンスルフォン (PMPS) の分解効率が、構成原子の吸収端近傍で、吸収係数の増加割合以上に大きくなる、ということが報告されている¹¹⁾。G 値の波長依存性を示す興味ある結果であるが、測定波長範囲は約 $20 \text{ \AA}$ 以上であり、ここで問題にしている領域における詳細については不明である。遠紫外線から軟 X 線までの広い波長範囲にわたる分光吸収係数や分光感度の測定は、リソグラフィ用材料の評価として重要であるが、放射光の利用により初めて可能となるものであり、今後の発展が期待される。

蓄積電子エネルギーやマスク支持膜を変えることにより異なる波長域で PMMA を露光し、メチルイソブチルケトン (MIBK) により現像したときの溶解速度と吸収エネルギーとの関係を調べた結果では、明確な露光波長依

存は認められず、また、両者の関係は、 20 kV の電子ビーム露光による同様な結果とも良い一致を示した^{10,12)}。この実験結果に従えば、放射光露光による PMMA の反応は、1 次近似的には、波長によらない一定の G 値と吸収エネルギーとによって決まるものと考えて良い。

高露光量領域では、露光のみによる膜厚減少があり、これをパタン形成に利用する試みもある¹³⁾。露光時間が長くなること、膜厚減少が飽和する現象があることなどの問題があるが、レジストプロセスのドライ化につながる可能性があり、検討が必要であろう。

2.2 解像度

放射光は指向性が強いいため、電子線励起型 X 線源やプラズマ X 線源などのような分散 X 線源で問題となる半影ぼけ δ や、マスクウエハ間ギャップ g の変動に起因する重ね合わせ誤差 Δb を充分小さくできる。Table 1 に各線源の典型的な場合に対する δ 、 Δb の値を比較して示す。 δ や Δb が小さいと、 g の設定誤差や、マスク、ウエハのそりなどにより g が変動しても、パタンの寸法精度や重ね合わせ精度に対する影響は少なく、微細パタン転写に有利である。

解像度を制限する主要な因子は、フレネル回折および光電子の影響である。回折の影響は、パタン幅 w 、 λ 、および g に依存するが、 $u = w(2/\lambda g)^{1/2}$ なる単一のパラメータで代表させることができる。 u が小さいほど回折の影響は著しく、パタン端部がだれたり、回折波相互の干渉の結果マスクパタンと異なる強度分布を生じたりする。Fig. 3 は、 $u=2.2$ に対応する条件で転写したものであり、パタン上部の形状に回折の影響が現れている。このようなパタン転写実験や理論計算の結果によれば、 $u=1.5$ 程度に対応するパタン幅 w_D をもって回折による解像限界の目安とすることができる¹⁴⁻¹⁶⁾。

一方、光電子の影響は、レジスト中での飛程 R_G により評価できる。Fig. 4 に、 w_D と R_G の波長依存性を示す。マスクウエハ間のギャップ g は、相互の移動やマ

Table 1 Typical values of penumbral blurring and run-out error.

		X-ray tube	Gas plasma	Storage ring
Source diameter	d (mm)	4	1	0.5
Source-mask distance	L (m)	0.4	0.4	10
Proximity gap	g (μm)	40	40	40
Variation of g	Δg (μm)	4	4	4
Field size	$R_M \times R_M$ (cm^2)	4×4	4×4	4×4
Penumbral blurring ($\delta = dg/L$)	δ (μm)	0.4	0.1	0.002
Run-out error ($\Delta b = R_M \Delta g / 2L$)	Δb (μm)	0.2	0.2	0.008

Fig. 3 Replicated pattern on 2 μm thick PMMA. The period of the line and space is 0.63 μm .

Fig. 4 Wavelength dependence of the minimum linewidth limited by Fresnel diffraction W_b and the range of photoelectrons in the resist R_g .

スクの破損からの保護のため、10~40 μm 程度必要と考えられる。従って、実用的な解像限界は、0.1~0.2 μm 程度となる。このときの波長 6~10 $\text{\AA}$ は、マスクの透過やレジスト中での減衰などの点からも適当な範囲である。マスクとウエハとを密着させ、10 $\text{\AA}$ 以上の波長を用いれば、0.1 μm 以下のパタンの転写も可能であるがレジスト中での減衰が大きくなることや、密着方式に伴う問題などがある。

Fig. 4 に示した R_g は、光電子が動き得る最大の距離である。一方、実際のパタン形状は、光電子の空間的分布やレジストの特性などに依存し、従って、短波長側の解像限界は、図示の R_g より良くなる可能性がある。た

だし、短波長になるほどマスクコントラストの低下や基板からの光電子の影響などが問題となってくる。

3. 実用化のための検討

放射光リソグラフィは、少なくとも 0.5 μm 以下の領域をターゲットとしており、これに対応した高精度の重ね合わせ、線幅制御が求められる。このためには、前節に述べた基礎的知見に基づきパタン転写条件を最適化すると共に、アライメント法、マスク製作などの要素技術の向上が必要である。また、リソグラフィは、云うまでもなく超 LSI 生産を目的とした実用技術であり、スループットや装置の価格などの経済的側面は重要である。

3.1 放射光源の小型化

放射光リソグラフィの実用化のためには、解像度やスループットなどの要求性能を満足し、しかもできる限り小型、低価格の放射光源が求められている。蓄積リングの小型化のためには、①直線部分を極力短くする、②磁界強度 B を大きくして電子軌道の曲率半径 R を小さくする、などが必要である。また、③電子入射装置の小型化のためには、低エネルギー入射としなければならない。

西独では、超伝導電磁石を用いた小型リング COSY の開発が進められている¹⁷⁾。当初の計画では、上記①の極限である円形リングとし、1985年に最初の実験が可能とのことであったが、その後明らかとなった技術的困難に対処するため、直線部を導入した競技場型リングに設計変更されている。本年中に超伝導電磁石による試運転を行ない、1987年には商用機が供給可能と伝えられている。

一方、確立した技術である通常の蓄積リングにより、できる限りの小型化を図るのも有力なアプローチであろう。仏国の NEYRPIC 社の MARS 計画では、直径 5m 程度のリングが製作できるとしている。Table 2 に、COSY¹⁸⁾、MARS 計画¹⁹⁾、および既存リングの例 (ETL-TERAS, 目標値) について、主なパラメータを比較して示す。

3.2 露光領域の拡大・一様化

ビームダクト端部における放射光のビーム形状は、横方向は数 cm 以上にわたって一様に行き渡るが、縦方向は 1 mrad 以下の狭い角度内に集中し、その中で強度や波長分布も変化する。従って、何らかの方法によって縦方向に振ることにより、露光領域を拡大・一様化する必要がある。これまで実験されているのは、①ウエハの機械的走査、②反射鏡の振動、③電子軌道の揺動、などである。

①は、走査機構や、走査に伴う振動などが、高精度なアライメントと両立するかどうかの問題である。一

Table 2 Storage ring parameters of COSY, MARS, and ETL-TERAS.

			COSY ¹⁸⁾	MARS ¹⁹⁾	ETL-TERAS
Electron energy	E	(GeV)	0.63 (0.59)	0.8	0.8
Electron current	I	(mA)	(300)	>100	300
Magnetic field	B	(T)	4.5	1.67	1.34
Bending radius	R	(m)	0.44	1.6	2
Peak wavelength ^{a)}	λ_p	(Å)	5.0	7.3	9.2
Power on wafer	P	(mW/cm ²)	250	>70 ^{b)}	170 ^{b)}
Injection energy	E _I	(MeV)	50 (M) ^{c)}	10(M) ^{c)}	300 (L) ^{d)}
Number of bending magnets			2	4	8
Geometrical size		(m)	2×4	5φ	10φ

a) $\lambda_p = 2.35 \cdot R / E^3$, b) 20% of the total radiation power given by $P_{\text{total}} = 14.1 \cdot E^4 \cdot I / R$ (mW/mrad), where source-wafer distance of 10 m is assumed. c) M; Microtron, d) L; Linear accelerator

Fig. 5 Enlargement of the exposure field by wobbling the electron beam in the storage ring. The ordinarily exposed area is shown in the right part.

方、試料室側の操作だけですむので手軽で、しかも強度の損失がない点が魅力であり、実用システムへの適用可能性を検討してみる価値があるように思う。

②は、斜入射による反射鏡を、主反射角を中心に振動させることにより、放射光を上下に振する方法である。リングや他のビームラインに影響を及ぼさずに行なえることが利点であるが、一方、反射率が数十%で強度の損失があること、表面の汚染により反射率が変化する恐れがあること、などの問題がある。この方法は、IBM や西独の BESSY で実験されている^{20,21)}。

③蓄積電子の軌道を、時間的に振動する横方向磁場により上下に揺動させると、電子軌道の振り角に対応して放射光を振らせることができる。この方法は、振幅や速度の制御が容易で、かつ自由度が大きく、強度の損失もない。**Fig. 5** に、この方法の有効性を確かめた実験の結果を示す^{22,23)}。±50 ガウス程度の揺動磁界により、露光領域の幅が通常の場合（右端）に比べ、3 倍以上に

Fig. 6 Calculated temperature rise in 2 cmφ Si membrane mask exposed to synchrotron radiation. The ratio of the area covered by the absorber is 50% of the whole area.

拡大されている。この方法の実用化のためには、全てのビームラインで各々独立に²⁴⁾、あるいは同時に、拡大・一様化を可能にする必要がある。また、リングの小型化との両立性も問題となろう。

3.3 マスクの温度上昇

X線リソグラフィは等倍転写であるから、マスクに対する要求は、転写すべきパターンと同程度、ないしはそれ以上となる。マスク支持膜は、X線透過率や、アライメントのための可視光透過率が高く、かつ歪が少なく安定で、機械的強度が大きいものが必要である。Si, Si₃N₄, BN などの厚さ数 μm の薄膜が用いられる。一方、吸収体パターン形成には、電子ビーム描画が利用されている。これらにより、実験室的にはほぼ満足できるものが得られているが、実用化のためには、プロセスの単純化や、欠陥検査・修復技術の開発などが必要である。

強度の大きい放射光の露光により、マスクの温度が上

昇し、熱膨張によってパタンに歪が生じる恐れがある。**Fig. 6** に温度上昇の計算例を示す¹⁶⁾。面積の半分が厚さ $0.5\ \mu\text{m}$ の W で覆われた、半径 $1\ \text{cm}$ の円形マスクがウエハと近接しており、マスク外周とウエハは一定温度に保たれ、マスクに流入した熱は、マスク基板の伝導、放射、および雰囲気ガスの伝導により流出するものと仮定している。 $20\ \mu\text{m}$ 厚 Be 窓透過前、後の放射光強度は、各々 $300\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 、および $70\ \text{mW}/\text{cm}^2$ であり、 $1\ \mu\text{m}$ 厚 Si マスク基板には約 $17\ \text{mW}/\text{cm}^2$ が吸収される。

真空中での露光では 50°C 近くまで温度が上昇するが、 $10\ \text{Torr}$ 以上の He ガスを導入すると、極めて有効な熱の発散媒体として働き、温度上昇は 0.2°C 以下となる。前述のマスク支持膜の熱膨張係数は、 $1\sim 3\times 10^{-6}/\text{deg}$ であり、この程度の温度上昇なら問題とならない。大パワーが瞬間的に放出されるプラズマ X 線源に比べ、放射光はほぼ連続的であるため、マスクの温度上昇や冷却の問題に関して有利である。

3.4 重ね合わせ精度

発散 X 線源によるリソグラフィ系では、マスク-ウエハ間のギャップ g の変動による位置ずれ誤差が大きく、これを許容値以下とするためには、1 回の露光面積を制限し、順次露光していくステップアンドリピート (S & R) 方式としなければならない²⁵⁾。一方、放射光は平行性が良いため、位置ずれ誤差による制約は少ない。しかし、ウエハの変形やマスクの均一性を考慮すると、ウエハ全面一括転写方式は現実的ではなく、やはり S & R 方式とせざるを得ない。

以下では、S & R 方式において露光領域の大きさを決める重ね合わせ誤差について検討し、これに基づきスループットの評価を試みる。パタン寸法は、 $0.2\ \mu\text{m}\sim 0.5\ \mu\text{m}$ とし、各誤差要因は、現状値もしくは、可能と考えられる開発目標値を仮定する。

個々の誤差要因を e_i とすると、総合の重ね合わせ誤差は次式により与えられる、

$$e_T = (\sum e_i^2)^{1/2} \quad (2)$$

1) マスクのパタン位置精度 e_1

主に、パタン描画に用いる電子ビーム露光装置の性能に依存する。最小線幅の $1/10$ 、即ち、

$$e_1 = 0.02\ \mu\text{m} \quad (3)$$

と仮定する。この値は、現状の装置では困難であるが、必ずしも実現不可能なレベルではないと考えられる²⁶⁾。

2) アライメント精度 e_2

X 線リソグラフィ用の高精度アライメント法として、二重回折格子法が提案されている^{27,28)}。この方法により、マスクとウエハの相対位置変位は、原理的には 0.01

μm まで検出可能である。しかし、マスク-ウエハ間のギャップに敏感すぎるという問題がある。我々は、この点を改良した新しい方式を考案し^{29,30)}、試作システムを検討中である³¹⁾。このような方式の開発により、次式のアライメント精度は実現可能と考えられる。

$$e_2 = 0.02\ \mu\text{m} \quad (4)$$

3) ウエハの変形 e_3

エッチング、膜形成、熱処理などによるウエハの変形に起因する重ね合わせ誤差である。種々の実験的あるいは理論的検討の結果、ウエハの変形は最大 $14\ \text{ppm}$ に達することもあるが、相連続する露光レベル間についてみれば、 $2\ \text{ppm}$ 程度と結論されている³²⁾。従って、1 フィールドの大きさを $R_M \times R_M\ \text{cm}^2$ とすると、

$$e_3 = 2 \times 10^{-3} R_M\ \mu\text{m} \quad (5)$$

4) マスクの熱変形 e_4

露光時の温度上昇によるマスクの変形である。マスク基板を Si_3N_4 (線膨張係数 $\beta = 2.7 \times 10^{-6}/\text{deg}$)、温度上昇は前述の計算結果に基づき $\Delta T = 0.2^\circ\text{C}$ とすれば、

$$e_4 = \beta \cdot \Delta T \cdot R_M = 5.4 \times 10^{-3} R_M\ \mu\text{m} \quad (6)$$

5) 位置ずれ誤差 e_5

$\Delta g = 4\ \mu\text{m}$, $L = 10\ \text{m}$ とすれば、

$$e_5 = \Delta g \cdot R_M / 2L = 2 \times 10^{-3} R_M\ \mu\text{m} \quad (7)$$

この項は、実際には殆ど問題にならない。

重ね合わせ誤差の許容値を、最小パタン幅 w の $1/4$ と考え、 $e = e_T / 0.25w$ と R_M との関係を **Fig. 7** に示した。重ね合わせ誤差を許容値以下とするには、 e が 1 以下となる露光領域の大きさを選ぶ必要がある。

図示の w の値は、ほぼ 0.7 倍のステップとしてある。これは、従来の DRAM (ダイナミックランダムアクセスメモリ) の発展傾向がそのまま適用できるとすれ

Fig. 7 Dependence of overlay error/ $0.25w$ on exposure field size, where w is the line-width.

ば、集積度 4 倍のステップに対応する。例えば、 $w=0.5\ \mu\text{m}$ は 16 M ビット、 $w=0.35\ \mu\text{m}$ は 64 M ビットに対応する³³⁾。

3.5 スループット

ステップ & リピート方式におけるスループット T を、次式により評価する、

$$T = 3600 / [T_0 + (A_w/R_M) \{T_s + (R_M/v) + T_E\}] \quad (8)$$

ウェハ/時

ここで、 T_0 はウェハのロード・アンロードおよびグローバルアライメントの時間 (秒、以下同じ)、 T_s は試料ステージ整定時間および露光領域毎のアライメント時間、 T_E は露光時間、 A_w はウェハ面積、 v はステージの速度である。現在、実用的露光システムと呼べるものはないので、ここでは、Wilson が同様な評価に用いた高性能ステッパの仕様値³³⁾を流用する。即ち、 $T_0=15\ \text{sec}$ 、 $T_s=0.3\ \text{sec}$ 、 $v=10\ \text{cm/sec}$ とする。

露光時間は、レジスト感度を S 、レジストへの入射放射光のパワー密度を P とすれば、

$$T_E = R_M S / P \quad (9)$$

ここで、 $R_M \times R_M$ の露光領域全体を一樣に露光するため、縦方向は何らかの方法で放射光を振り、一方、横方向は充分広い範囲にわたって一樣に拡がっているため、そのままですものとしている。

P として、Fig. 2 に示した P_0 (ただし蓄積電流は 500 mA とする) を用い、 $w=0.35\ \mu\text{m}$ ($R_M=4\ \text{cm}$)、および $0.2\ \mu\text{m}$ ($R_M=2\ \text{cm}$) の場合について、直径 200 mm のウェハのスループットとレジスト感度との関係を、リングのエネルギー E をパラメータとして、Fig. 8 に示す。

一般に、高感度レジストほど解像度やドライエッチング耐性が低かったり、プロセスマージンがとれないこと

が多く、微細パターン形成に適さない傾向にある。要求されるスループットを仮に 30 枚/時以上とすれば、 $E=0.8\ \text{GeV}$ 、 $R_M=4\ \text{cm}$ のとき $100\ \text{mJ/cm}^2$ より高感度のレジストを用いれば良いことになる。このような中程度の感度のレジストで、微細パターン形成に適したものを見出すことは、そうむずかしいことではない³⁴⁾。

4. おわりに

放射光リソグラフィ技術の特徴や現状について概説した。実用化のための課題については、基本的には見通しが得られていると云えよう。今後は、デバイス製作からの要求に基づき、マスク、レジストなどの材料や露光システムの最適化を進めることが必要となろう。レジストやマスクの詳細には触れなかったが、リソグラフィの性能を左右する重要な構成要素であることは言うまでもない。特に等倍転写であることから、マスクに対する要求は厳しく、実用化に当たったのキーポイントのひとつと考えられている。

放射光は確かに強力であるが、窓やマスク支持膜などにおける減衰、露光領域の拡大などの結果、放射パワーの利用効率は 10~20% 程度になる。本稿における露光領域の寸法やスループットの評価結果によれば、800 MeV、500 mA 以上の条件が高スループットを得るための目安となるが、実用システムのためには、さらに厳密な検討が必要である。

放射光源の小型化への要求は強く、実用化のための重要な条件と考えられている。COSY を始めとする小型リング開発の成否は、実用化への動きに大きな刺激を与えることになるだろう。

謝 辞

本研究は、鳳、平田、谷野、一村、金山、伊藤の各氏と共同して進めている。放射光施設の利用に当たっては、富増量子技術部長、野口室長を始め、高エネルギー放射線研究室各位に御援助頂いている。富増部長、鶴島電子デバイス部長、清水新機能素子協会研究開発部長には、放射光リソグラフィ技術全般にわたり有益な御教示、御討論を頂いている。以上各氏に深く感謝する。

文 献

- 1) 吉川 昭：応用物理，**54**，1299 (1985)。
- 2) D. L. Spears and H. I. Smith：Electron. Lett. **8**，No. 4，102 (1972)。
- 3) D. L. Spears and H. I. Smith：Solid State Technol. **15**，No. 7，21 (1972)。
- 4) E. Spiller, D. E. Eastman, R. Feder, W. D. Grobman, W. Gudat and J. Topalian：J. Appl. Phys. **47**，5450 (1976)。

Fig. 8 Throughput of 200 mm ϕ wafer as a function of resist sensitivity. Exposure through 20 μm thick Be window and 2 μm thick Si_3N_4 mask membrane is assumed.

- 5) B. Fay, J. Trostel, Y. Petroff, R. Pinchaux and P. Thiry: *Appl. Phys. Lett.* **29**, 370 (1976).
- 6) H. Aritome, T. Nishimura, H. Kotani, S. Matsui, O. Nakagawa and S. Namba: *J. Vac. Sci. & Technol.* **15**, 992 (1978).
- 7) T. Tomimasu, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado and M. Chiwaki: *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-30**, 3133 (1983).
- 8) M. Tsuda, S. Oikawa and A. Suzuki: *Polym. Eng. Sci.* **17**, 390 (1977).
- 9) J. Schwinger: *Phys. Rev.* **75**, 1912 (1949).
- 10) 阿刀田伸史, 川勝久三, 谷野浩史, 一村信吾, 平田正紘, 鳳紘一郎: *信学技報*, SSD 82-180 (1983).
- 11) K. Mochiji, T. Kimura, H. Obayashi and H. Maezawa: *Proc. SPIE* **539**, 56 (1985).
- 12) 阿刀田伸史, 谷野浩史, 鳳紘一郎, 一村信吾, 平田正紘: 第24回半導体・集積回路技術シンポジウム講演論文集 (電気化学協会, 東京, 1983) p. 42.
- 13) S. Ichimura, M. Hirata, H. Tanino, N. Atoda, M. Ono and K. Hoh: *J. Vac. Sci. & Technol.* **B1**, 1076 (1983).
- 14) N. Atoda, H. Kawakatsu, H. Tanino, S. Ichimura, M. Hirata and K. Hoh: *J. Vac. Sci. & Technol.* **B1**, 1267 (1983).
- 15) 阿刀田伸史: *日本の科学と技術*, **25**, No. 228, 32 (1984).
- 16) 伊藤順司, 金山敏彦, 阿刀田伸史, 鶴島稔夫: *電総研集報*, **49**, 613 (1985).
- 17) A. Heuberger: *Proc. SPIE* **448**, 8 (1983).
- 18) COSY-MicroTec 社技術資料 (1985).
- 19) NEYRPIC 社技術資料 (1985).
- 20) R. P. Haelbich, J. P. Silverman, W. D. Grobman, J. R. Maldonado and J. M. Warlaumont: *J. Vac. Sci. & Technol.* **B1**, 1262 (1983).
- 21) M. Bieber, H. U. Scheunemann, H. Betz and A. Heuberger: *J. Vac. Sci. & Technol.* **B1**, 1271 (1983).
- 22) H. Tanino, K. Hoh, M. Hirata, S. Ichimura, N. Atoda, T. Tomimasu, T. Noguchi, S. Sugiyama and T. Yamazaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, L 667 (1983).
- 23) T. Tomimasu, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado and M. Chiwaki: *Proc. 5th Symp. Accelerator Sci. & Tech*, Tsukuba, 1984 (KEK, Tsukuba, 1984) p. 18.
- 24) H. Betz and G. Mülhault: *Proc. SPIE* **448**, 83 (1983).
- 25) 吉原秀雄, 石原 通, 早坂東亜, 松尾誠太郎, 木下博雄: *電々公社通研研究実用化報告*, **30**, 1843 (1983).
- 26) 田中喜男: 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, 東京, 1985) p. 133.
- 27) T. M. Lyszczarz, D. C. Flanders, N. P. Economou and P. D. DeGraff: *J. Vac. Sci. & Technol.* **19**, 1214 (1981).
- 28) H. Kinoshita, A. Une and M. Iki: *J. Vac. Sci. & Technol.* **B1**, 1276 (1983).
- 29) 伊藤順司, 金山敏彦: 特願 60-165231 (1985).
- 30) 阿刀田伸史, 伊藤順司: *信学技報* SSD 85-103 (1985).
- 31) 伊藤順司, 金山敏彦, 阿刀田伸史: 第33回応用物理学関係連合講演会, 2p-Z-9 (1986).
- 32) J. P. Lazzari and P. Parrens: *Proc. SPIE* **393**, 213 (1983).
- 33) A. D. Wilson: *Proc. SPIE* **537**, 85 (1985).
- 34) J. G. Lane: *Proc. SPIE* **448**, 119 (1983).