

解説

放射光リソグラフィの現状と将来

阿刀田 伸史

電子技術総合研究所

Present Status and Future of Synchrotron Radiation Lithography

Nobufumi Atoda

Electrotechnical Laboratory

Fundamental aspects and present status of synchrotron radiation (SR) lithography are described. Investigation of dependence of the lithographic performance on SR spectra shows that a wavelength range between 5-10 Å is most effective for resist exposure and best suited to achieve high resolution down to 0.1 μm as well. Level-to-level overlay required for 0.25 μm feature size device fabrication is discussed. A mask-to-wafer alignment method newly developed by the author's laboratory can afford ±0.01 μm accuracy which meets the overlay requirements. Mask and resist technologies compatible with 0.25 μm SR lithography are briefly reviewed. Energy and current of compact storage ring required for attaining a reasonable throughput are evaluated. Methods of the exposure field are also described.

1. はじめに

半導体集積回路の高密度集積化は着実に進展し続けているが、これを可能にしているのはデバイスの微細加工技術の進歩である。なかでもリソグラフィの役割は重要であり、より微細で高密度な

パターン形成を目指して技術開発が活発に行われている。

現在超LIS生産の主役となっている光の縮小投影露光方式は、レンズの高性能化や光源の短波長化などによる解像度の向上が図られ、パターン

幅 $0.5\mu\text{m}$ まで適用できる見通しが立っている。さらに、KrFエキシマレーザの使用により $0.35\mu\text{m}$ 幅のパターン形成も可能であることが示されている^{1,2)}。しかしながら、 $0.5\mu\text{m}$ 以下の領域で高精度、高歩留り、高スループットのプロセスを確立することは必ずしも容易ではない。 $1\mu\text{m}$ 前後までとは異なり解像度に余裕はなく、さらに、焦点深度の減少や露光光のレジスト中での減衰などが深刻な問題となってくる。このため、プロセスの複雑な多層レジストの使用は避けられそうにない。

X線リソグラフィは、原理的に光リソグラフィより優れた多くの特徴がある。即ち反射、回折の影響が少なく、高解像性である。また、X線は透過性が良いため、厚膜単層レジストによるシンプルなプロセスが使える、焦点深度の問題もない。さらに、基板表面形状によるパターン幅変動やごみ粒子による露光欠陥発生が少なく、加工精度や歩留り確保の上からも有利である。このため、光リソグラフィに代わるものと期待され、多くの研究が積み重ねられてきた。しかし、生産段階への本格的導入に不可欠な高輝度X線源が得られなかったことなどが大きな理由となって、実用化には至っていない^{3,4)}。

電子蓄積リングから得られる放射光は、X線リソグラフィ用高輝度線源として最も有望と考えられている⁵⁾。放射光を用いる利点は、その軟X線成分の強度が大きく、指向性も強いという点にある。この結果、X線リソグラフィ本来の利点を実用的なスループットのもとで実現することが可能になる。さらに、指向性が強いことから、パターン転写における幾何学的誤差（半影ぼけ、ランアウト）を実用上問題とならない程度に小さくすることができる。

放射光リソグラフィの基本的な特徴や特性は既に初期の実験⁶⁻⁸⁾により確かめられており、現在は実用システムに適合する、より洗練された技術の開発が必要な段階にきている。特に、放射光リ

ソグラフィが使われるのはパターン寸法 $0.25\mu\text{m}$ 前後からと見られており、このような微細パターンに対応できるアライメント技術、マスク作製技術、レジスト材料などが、小型放射光源と共に当面の主要な開発課題となっている。

以下では、放射光リソグラフィの基本的な構成と特徴、期待し得る性能、それらを実現するために蓄積リングをはじめとする構成要素に要求される条件、これらに関する技術開発の現状と今後の展望などについて、筆者らの理論的・実験的検討結果を交えながら概説する。

2. 構成

ここでは、放射光リソグラフィの方式や基本的な構成について概要を紹介する。

2.1 方式

放射光リソグラフィシステムの原理的な構成を図1に示す。リソグラフィに用いられる波長範囲 ($4\sim 15\text{\AA}$)では有効な屈折光学系が得られないこと、およびX線マスクが脆弱であることから、図示のように、マスクとウェハとを一定の間隔で保持し、ほぼ等倍で転写するいわゆる近接露光方式が一般的である。

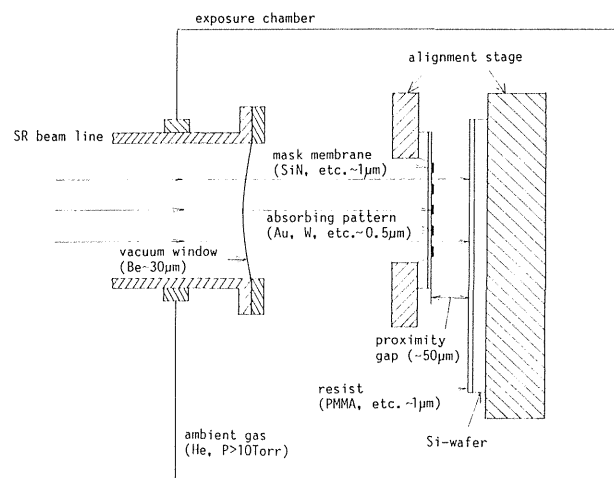


Fig. 1 Basic arrangement of synchrotron radiation lithography

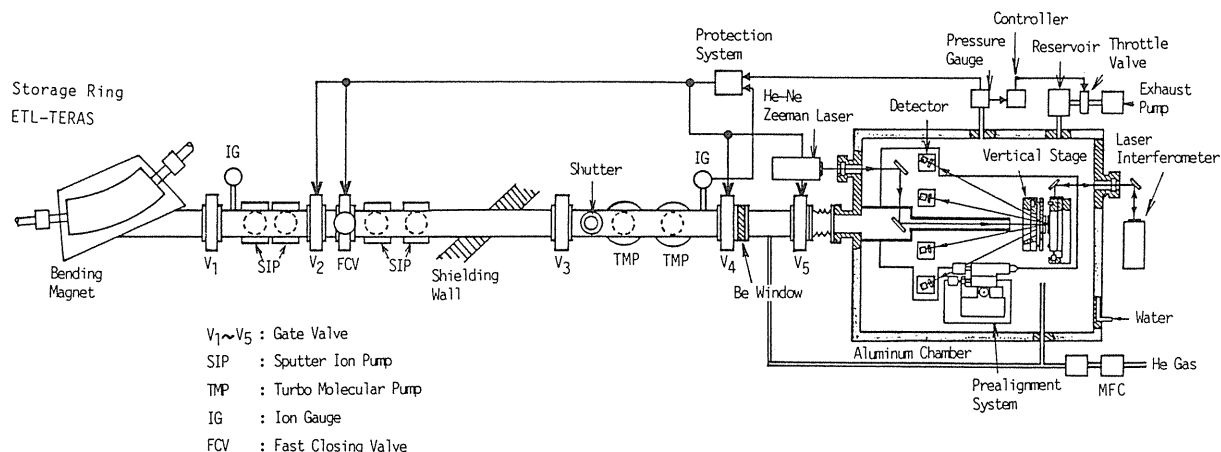


Fig. 2 Top view of the exposure system

等倍転写では、マスクの精度が直接ウェハ上の転写パターンに影響するため、マスクに対する要求が厳しくなる。この点が放射光リソグラフィの実用化を図る上での大きな問題のひとつとなっている。縮小露光であれば条件が緩和されることから、反射鏡やブラッグ反射を利用した各種の縮小投影方式も検討されている⁹⁻¹³⁾が、現状では実用化の見通しを得るには至っていない。

2.2 露光システムの構造

例として筆者らが実験に用いているシステムのビームラインを含む全体の模式図を図2に、露光チャンバーの部分を図3に示す¹⁴⁾。蓄積リングは本誌創刊号に紹介されているETL-TERAS^{15, 16)}であり、典型的な露光実験条件は、蓄積エネルギー700MeV、電流100mA程度である。マスク・ウェハステージは偏向磁石から約10mの位置にある。

露光雰囲気は、実用的観点から大気圧または低真空中が望ましい。我々の実験システムではX線吸収が少ないヘリウム雰囲気(1気圧)としている。真空中とは異なり、アライメント光学系、ステージ、移動機構等の材質や構造に制約がない。またマスク・ウェハの保持に真空チャックが使用可能であり、着脱も迅速・容易に行なえる。

ヘリウムガスは、マスクの放射光吸収による温

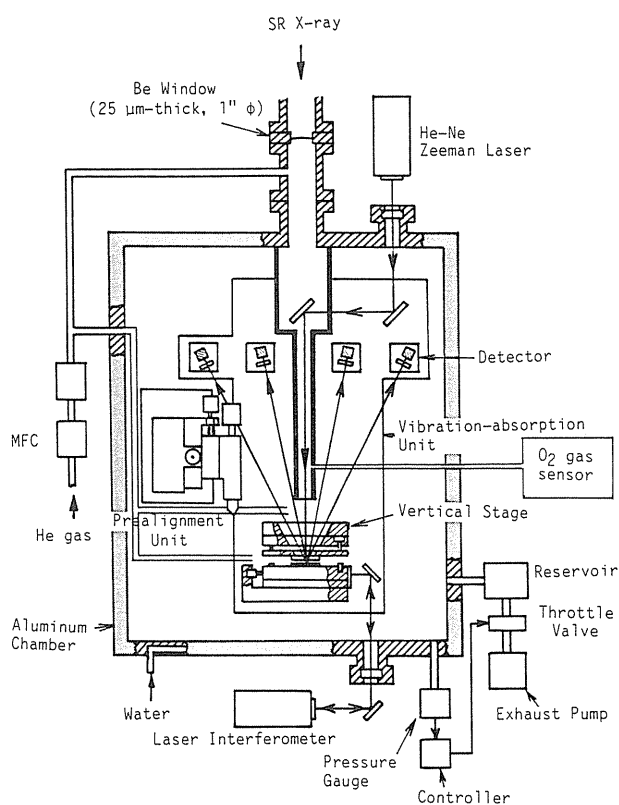


Fig. 3 Exposure Chamber

度上昇を防ぐ熱放散媒体としても効果的である。理論計算¹⁷⁾や実験結果¹⁸⁾によれば、蓄積電流200mA、マスク・ウェハ間隔25μmの場合、真空中では数10°Cの温度上昇となるが、ヘリウムガス圧力を50Torr以上にすると、0.1°C以下に抑えられる。現用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

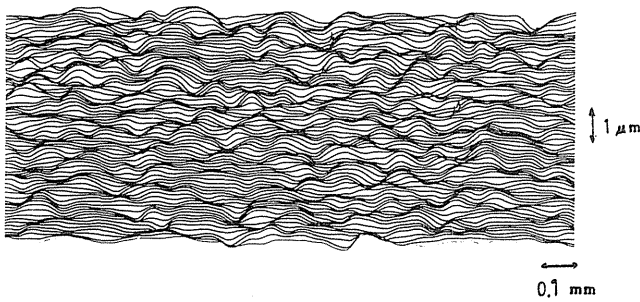


Fig. 4 Surface topography of PMMA resist exposed through the Be window

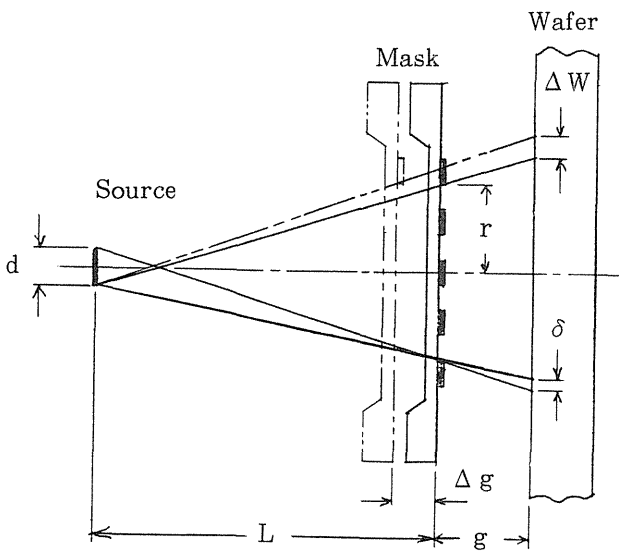


Fig. 5 Penumbral blurring δ and feature placement error ΔW in proximity printing

なら熱膨張によるマスクの歪はあまり問題とならない。

2.3 ベリリウム窓

露光チェンバとリング側を真真空的に分離するベリリウム窓は、X線の透過率を大きくするため、できるだけ薄くしたい。我々は25mmφ、25μm厚のもの（米国エレクトロフュージョン社製）を用いているが、急激な圧力上昇を与えない限り充分大気圧に耐える。ただしこの膜は圧延により作成されたもので、膜厚が均一ではなく、露光むらを生じる。図4は、このベリリウム窓を通して完全には抜けきらない程度に露光し、現象したポジ型レジストPMMA（ポリメチルメタクリレー

ト）の表面形状を3次元粗さ計で測定した結果である。PMMAの感度特性から、ベリリウム膜厚の不均一は±5μm程度と見積られる¹⁹⁾。より均一性の良い蒸着膜（ヤマハ製）の使用や、窓部分を機械的に上下に走査する機構の導入により、この問題に対処できる見通しを得ている^{20, 21)}。

窓の突発的破壊や真空漏れに対しリングの超高真空を防護するための機構は、筆者らのシステムでは、高速遮断バルブ（東芝製）のみである。これは1度限りの偶発的実験であったが、有効に機能することが示されている。しかし、多数のリソグラフィポートが同時に稼働することになると考えられる実用システムでは、より念入りの防護機構が必要となろう²²⁾。

3. 特徴と基本性能

ここでは、放射光の特徴と、それに由来する放射光リソグラフィの特徴や基本的な性能について述べる。

3.1 指向性

ビームライン末端における放射光のビーム形状は、電子軌道に平行な方向では充分幅が広く強度も一様であるが、縦方向は強い指向性を反映して幅が狭く強度の分布もある。従って露光領域（通常2～3cm四方）全域を一様に露光するため、後述するような方法により、放射光またはマスクとウェハを上下に走査する必要がある。

近接露光方式では、図5に示すように、マスク上の点から線源を見込む角に依存した半影ぼけ $\delta = gd/L$ (g はマスク-ウェハ間隔, d は線源径, L は線源-マスク間距離) がパターン端部に生じ、解像度が制限される。また、転写倍率が厳密には1でないことから、露光ごとの g の設定誤差 Δg に起因する転写パターンの位置ずれ $\Delta w = \Delta gr/L$ (r は露光フィールドの中心からの距離) が生じ、重ね合わせ精度が低下する。

これらの幾何学的誤差を小さくするには L を大きくすればよい。しかし、電子線励起型X線源や

プラズマX線源などの発散線源では、マスク面に到達するX線強度が $1/L^2$ に比例して低下する。しかも、これらの線源ではもともとX線強度が充分ではなく、解像度とスループットとを同時に実用的な水準にすることは困難となっている。

これに対し放射光では、指向性が強いのでLを10m以上としても縦方向の幅は露光フィールドよりかなり狭く、これを上下に走査して露光することによりは変わらないから、マスク面上のX線強度の低下は $1/L$ に比例する程度である。しかも放射光ではX線強度が電子線衝撃型より2桁以上大きく、充分なスループットが得られる。またビーム径が1mm ϕ 程度で、Lも充分長くできることにより、上記の幾何学的誤差は実用上殆ど問題とならない大きさとなる。

3.2 スペクトル

放射光のスペクトルは蓄積電子エネルギーE、電流I、曲率半径Rまたは磁界強度Bから理論的に計算できる^{23, 24)}。実用的には放射光を上下に振って使うことから、たて方向について積分したスペクトルが有用である。図6に、E=0.59GeV、B=4.5T（西独で開発中の小型リングCOSYの設計値、詳細は後述）の場合の放射光のスペクトル、ベリリウム窓・マスク支持膜（BNおよびSi₃N₄）透過後のスペクトル、および最終的にレジスト(PMMA)に吸収されるパワーのスペクトルを示す。放射光は広い波長範囲にわたる連続スペクトルを示すが、レジストに吸収されるのは波長5~10Åの範囲が主となることがわかる。

軟X線によるレジスト露光機構は、エネルギー吸収の1次過程を別にすれば、電子線露光の場合と同じで、吸収エネルギーに比例した一定の割合(G値)で反応が起こると考えて良い²⁵⁾。G値の波長依存性を示すと考えられる実験結果としてポリ-2-メチルペンタンスルホン(PMPS)の分解反応が、構成原子の吸収端(S:76Å, O:23Å)近傍で吸収係数に必ずしも比例しない、と

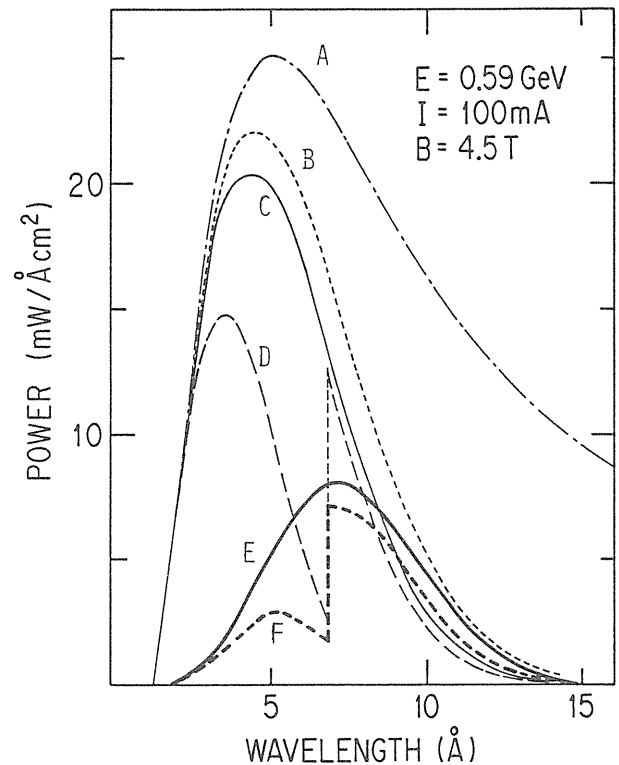


Fig. 6 SR Spectra of A:Source B:Through 20 μ m Be, C:Be and 2 μ m BN, D:Be and 2 μ m SiN, and power absorbed by PMMA (10^3 W/A CM^3) after transmitted from E:Be/BN, F:Be/Si-N

いう報告がある²⁶⁾。放射光露光によるPMMAの溶解速度と吸収エネルギーとの関係に関する筆者らの実験結果では、明確な波長依存性は認められず、また電子線露光による同様な結果とも良い一致を示した^{26, 28)}。結局、レジストの露光反応は、1次近似的には上記スペクトルを波長について積分した吸収エネルギーに比例するものとして良いと考えられる。

特性X線に対しては、線源波長近傍に吸収端を持つ原子（例えば、Pd-L α ; 4.37Åに対し、Cl; 吸収端4.38Å）を導入し、吸収を大きくすることによってレジスト感度向上を図る手法がある²⁹⁾。放射光露光の場合は波長について積分した吸収エネルギーが実効的なので、それほど顕著な効果は得られない。例えば、Clを含むCMS（クロロメチ

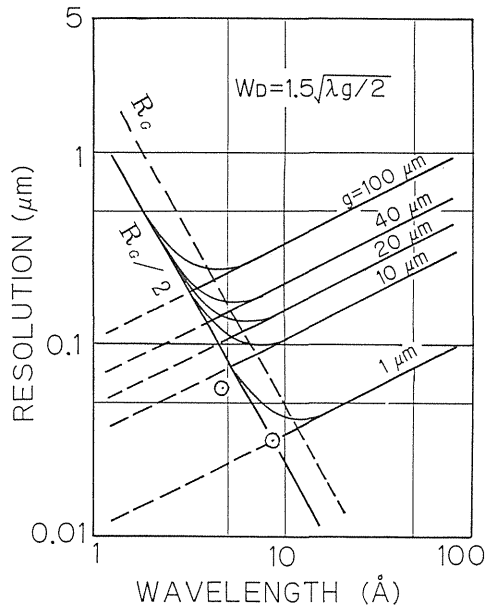


Fig. 7 Resolution limit caused by Fresnel diffraction W_D and diffusion of photoelectrons, R_c is the range of the photoelectron and the open circles are from the experiments by Feder et al.

ル化ポリスチレン)の場合, 吸収端より長波長側での吸収係数低下の影響の方が大きく, 吸収エネルギーはPMMAの場合より小さくなる。Si 導入とBN支持膜との組み合わせでは, 波長 6.74 \AA 以下における吸収増大の効果により, 吸収エネルギーが大きくなる。ただし二層レジスト用に開発されているSi含有レジストに比べかなり大きいSi含有率(約38%:ポリジメチルシロキサン)を仮定した場合でも, 吸収エネルギーはPMMAの場合の1.5倍程度である。

3.3 解像度

放射光リソグラフィでは, 前述のように半影ぼけによる解像度への影響は小さく, 解像度の限界を決める主な因子は, フレネル回折およびX線の吸収に伴って生成される光電子の飛程である。これらはいずれも波長依存性があり, 連続スペクトルである放射光の場合, 厳密な評価は必ずしも単純ではない。しかしレジスト露光に有効に寄与

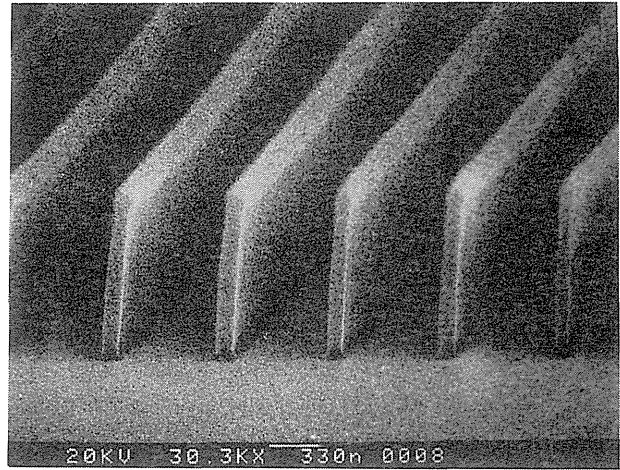


Fig. 8 Replicated pattern with SR. The resist is $1 \mu\text{m}$ PMMA. The linewidth is $0.1 \mu\text{m}$.

する波長範囲はかなり狭くなるので, スペクトルのピーク波長 $\lambda_p (=2.35R/E^3)$ で代表させて考えても定性的には充分であろう。

筆者らの理論的・実験的検討^{17, 30, 31)}によれば回折による解像限界の目安は,

$$W_D = 1.5 (\lambda g / 2)^{1/2},$$

ここで, λ は波長, g はマスク・ウェハ間のギャップである。一方, 光電子によるパターンのぼけは, 露光量が十分大きければ飛程 R_c まで及び得るが, 実際には露光量やレジストのコントラスト等に依存し, R_c より小さくなる。波長が短くなってくると, マスクコントラストの低下や基板からの光電子なども解像度に影響してくる。ここでは $R_c/2$ を光電子による解像限界の目安とする。

図7に, W_D と $R_c/2$ の波長依存性を示す。○印はFederらの実験結果³²⁾である。マスクとウェハ間のギャップ g は, 相互の移動やマスクの破損からの保護のため, 少なくとも $10 \mu\text{m}$ 以上, 実用的には $40 \mu\text{m}$ 程度必要と考えられる。従って実用的な解像限界は, $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 程度となる。これに対応する波長 $5 \sim 10 \text{ \AA}$ は, ベリリウム窓やマスクの透過, レジスト中での吸収などの点からも最適な範囲となっている。

図8は, 解像限界に近い約 $0.1 \mu\text{m}$ 幅の転写パ

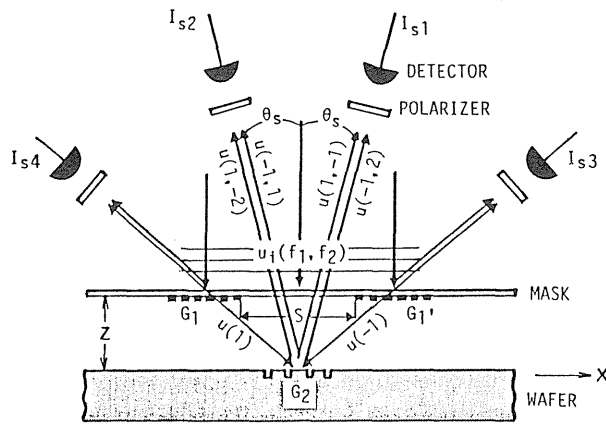


Fig. 9 Principle of detection of lateral displacement between mask and wafer

ターンである³³⁾。レジストは厚さ $1 \mu\text{m}$ の PMMA, マスク-ウェハ間隔は約 $10 \mu\text{m}$ である。側壁が基板に垂直で, アスペクト比(高さ対幅の比)の大きいパターンを得られることが放射光リソグラフィの特徴のひとつである。このようなレジストパターンは, ドライエッチングのマスクとして用いた場合, 線幅の変化は少なく, 高精度な加工ができるものと期待される。

4. 技術開発の現状

4.1 要求性能

一般に, リソグラフィに対して要求される主要な性能は, 解像度, スループット, および重ね合わせ精度である。放射光リソグラフィの解像度については, $0.25 \mu\text{m}$ パターンに適用するに十分な余裕があることを見てきた。スループットについては, 小型蓄積リングに対する要求性能と関連して後述する。解像度やスループットは, 用いるマスクやレジストにも依存する。これらの技術開発の現状については次節以降で概説し, ここでは重ね合わせ精度について述べる。

デバイスの製作は, 通常十数層にわたるリソグラフィ工程を経て行われ, 異なる層間の重ね合わせには最小パターン寸法の $1/3 \sim 1/4$ 程度の精度が要求される。重ね合わせ精度はこれに関係

する種々の誤差要因の総合の結果であり, 個々の誤差要因についてはさらに高精度の制御が必要となってくる。

重ね合わせ精度に影響する誤差因子の中には, 露光フィールド寸法に比例して大きくなるものがある。従って, 目的とするパターン幅に対応した重ね合わせ精度を確保するためには, 露光フィールド寸法を制限せざるを得ない。ウェハ全面にわたる露光には, 露光フィールド分ずつステップ状にウェハを移動させ露光することを繰返すステップアンドリピート (S & R) 方式によることになる。S & R 方式では, ステップ分割数の増加と共にスループットが低下する。この意味からも重ね合わせ精度の検討は重要である。

重ね合わせ精度 e_r は, これに関係する各因子を e_i とすれば, 次式で与えられる。

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

パターン幅 $W = 0.25 \mu\text{m}$, 露光フィールド寸法 $r \times r = 2.5 \times 2.5 \text{cm}$ の場合について, $1/4 \cdot W$ の重ね合わせ精度を満足させるために主要な要因に対して要求される条件の例を表 1 に示す。各因子に割当てた数値は, 必ずしも全て現状で達成可能なものではなく, $0.25 \mu\text{m}$ パターンに対応するための開発目標値を含む。従って, 各因子間の誤差配分も相対的である。

アライメント精度 e_1 については, 最近筆者らは新しいアライメント方式を考案した^{14, 34)}。図 9 に筆者らの方式の原理を示す。マスクとウェハとの X 方向の位置ずれ検出には, マスク上の透過回折格子 G_1, G_1' とウェハ上の反射回折格子 G_2 で構成される干渉計を用いる。光源には互いに直交するふたつの直線偏光成分 f_1, f_2 を含む He-Ne 横ゼーマンレーザを用いた。検出器 Is_1, Is_2 では各々 f_1, f_2 成分のビート信号 (344kHz) が検出され, それらの位相差より位置ずれを検出する。検出した位置ずれ信号によりウェハステージの制御を行った結果を図 10 に示す。 $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 以下の位置合わせが可能であることが示されてお

り^{34, 35)}, 表1記載のアライメント精度は実現可能な範囲と考えられる。

マスクのパターン位置精度 e_2 は, パターン描画用電子ビーム露光装置の精度およびマスクの歪によって決まる。前者については, 最近量子効果

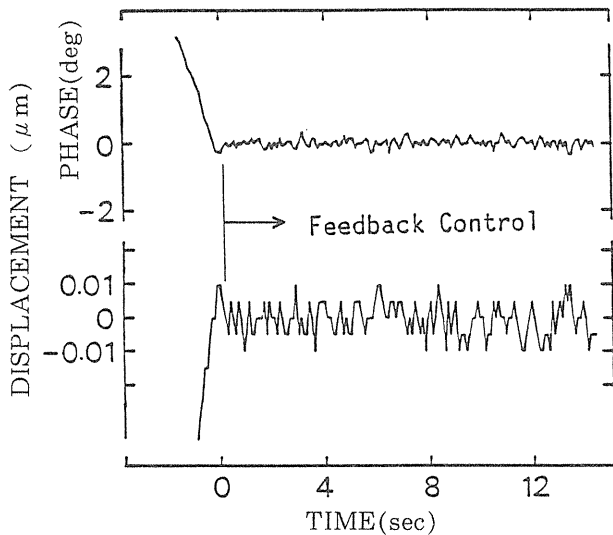


Fig.10 Result of alignment control. The wafer is coated with 0.5 μm thick resist. The mask-wafer gap is 46 μm.

などの研究に関連して0.1 μm以下のパターン形成装置が発表されており, 所要の電子ビーム設定分解能やアライメント精度は達成可能と考えられる。しかし電子ビーム露光装置のフィールド寸法はX線マスクに比べて小さくS&R方式になること, 描画に長時間要すること, 単一マスク上だけでなくマスク-マスク間での精度も要求されることを考えると, 電子ビーム描画装置には長時間にわたる安定性や再現性の向上が必要になってこよう³⁶⁾。マスクの歪については後述する。

位置ずれ誤差 e_3 とマスクの熱膨張 e_4 は, フィールド寸法 r に比例して大きくなるが, 表記載の条件では他の項に比べ小さい。しかし条件によっては問題になる場合もあり得る。

ウェハの内面歪 e_5 は加熱処理などによるウェハの変形に起因する誤差であり, r に比例する。プロセスの低温化などにより, 表1記載程度の水準を達成することが期待される³⁷⁾。

4.2 マスク

図1にも示したように, X線吸収体パターン, 支持膜, および支持枠とからなる。支持膜はX線

Table. 1 Typical overlay budget for 0.25 μm SR lithography

PATTERN WIDTH	W	(μm)	0.25
EXPOSURE FIELD SIZE	$r \times r$	(cm)	2.5 × 2.5
TOTAL OVERLAY ERROR	$e_T = 1 / 4 \cdot W$	(μm)	0.0625
MASK-WAFER ALIGNMENT ERROR	$e_1 = 1 / 10 \cdot W$	(μm)	0.025
MASK PATTERN DISPLACEMENT	$e_2 = 1 / 5 \cdot W$	(μm)	0.05
RUN-OUT ERROR	$e_3 = \Delta g \cdot r / 2 L$	(μm)	0.005
	($\Delta g = 4 \mu m, L = 10m$)		
THERMAL EXPANSION OF MASK	$e_4 = \beta \cdot \Delta T \cdot r$	(μm)	0.012
	(SiC: $\beta = 4.7 \times 10^{-6}, \Delta T = 0.1^\circ C$)		
WAFER IN-PLANE DISTORTION	$e_5 = D \cdot r$	(μm)	0.025
	($D = 1 \times 10^{-6}$)		

および可視光（アライメント光）透過性が高いこと、平面度や寸法安定性が良いこと、などが必要である。このような条件を満たすものとしてシリコン、窒化シリコン、炭化シリコン、窒化ボロンなどの1～数 μm 厚の薄膜が用いられる³⁸⁻⁴²⁾。吸収体としては、膜厚0.5～1 μm 程度の金、タンゲステン、タンタルなどが用いられる。基板は通常シリコンウェハを用い、支持膜形成後あるいは吸収体パターンまで形成後、裏面からの選択エッチングにより窓状に加工することによってマスク構造を得る。

マスクにとって重要なことはコントラスト（支持膜部分と吸収体部分とのX線透過率の比）が大きいこと、およびパターンの寸法精度と位置精度が高いことである。

マスクコントラストは、レジストの露光・現象条件の余裕度や転写レジストパターンの質に関係し、ひいては寸法精度に影響する。用いるレジストの性能にも依るが、通常10前後のコントラストが必要と考えられている。吸収体膜厚が充分厚い場合でも、X線の吸収に伴ってマスクあるいは基板から放出される光電子、オージェ電子によるレジスト露光への寄与や回折の影響が著しい場合には、実効的なコントラストが低下するのでこれらに対する考慮が必要である^{31, 43)}。

パターンの位置精度に影響するマスクの歪の主な原因は、支持膜や吸収体の内部応力、露光中のX線パワー吸収による熱膨張、およびX線照射による支持膜のダメージなどである⁴⁴⁾。歪はマスク面内方向（伸びや縮み）と面外方向（そりやたわみ）とに起こり得る。後者はマスクウェハ間隔の変動となり、位置ずれ誤差をもたらすが、放射光の場合は指向性が良いため、殆ど問題とならない大きさである⁴⁵⁾。

支持膜や吸収体膜の残留応力は成膜条件に強く依存するので、これを最適化することによって応力の制御が図られている。共に $2 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$ 程度以下とすることが望ましい。支持膜については、

引っ張り応力の膜と圧縮応力の膜との複合化による応力の補償や、厚い基板や補強リングを用いて支持枠の剛性を高め、支持膜の応力に起因する変形を低減するなどの対策も有効である。このような方法により、0.3 μm 程度の平面度を得ることも可能となっている⁴⁶⁾。

吸収体としては金が広く使われていたが、応力の経時変化があること、熱膨張係数が支持膜の5倍程度大きいこと、デバイスの微細加工に広く使われているRIE（反応性イオンエッチング）が適用できないため種々問題のある着着によらざるを得ないこと等の欠点があり、これに代るものとしてタンタル⁴⁷⁾やタンゲステン⁴⁸⁻⁵³⁾が検討されている。タンゲステンではイオン注入による応力の低減法が開発されている^{49, 50, 52)}。

支持膜の照射損傷は最近窒化ボロンについて報告された現象で⁵⁴⁾、強度の大きな放射光露光により顕著になったものと考えられる。LPCVD（Low Pressure Chemical Vapor Deposition）により形成された窒化ボロン(B_3NH)は、X線や可視光透過率が高く力学的特性も優れているため、マスク支持膜として米国で広く用いられていたが、X線照射量の増大とともに光透過率の低下や応力の変化に起因する変形を生じることが明らかになった。これらの変化は照射によるHの解離が原因と考えられる⁵⁴⁻⁵⁶⁾が、Hを含まない他の支持膜材料においても同様な現象が見い出されており⁵⁷⁾、照射により生成される種々の励起状態の緩和過程で生じる欠陥の蓄積に伴う現象として一般化して考えることができよう⁵⁸⁾。いずれにしろ、マスクの実用的寿命に係わる問題であり、この観点からの支持膜の評価と対策が必要である。

4.3 レジスト

パターンの転写媒体であるとともに、エッチング時のマスクの役割を果たす。従って、感度、解像度とともにドライエッチング耐性が重要な要求性能となる。

放射光によるレジストの露光過程は1次効果ではなく、X線吸収に伴って励起された光電子がレジスト中でさらに多数の2次電子や種々の励起状態を生成し、これらを通じてレジスト分子の分解、結合反応に至るものと考えられている。従って電子線露光の場合と機構は同じであり、電子線レジストとして知られる多くのポリマーレジストをそのまま放射光用に使うことができる。

マスクや露光システムなどの評価の目的には、代表的なポリマーレジストであるPMMAが使われている例が多い。これは全てのレジストの中で最も解像度が高く、特性の再現性も優れているためであり、性能評価の標準としての意味が強い。感度は低く(1000mJ/cm²以上)ドライエッチング耐性も不十分なため、実用的ではない。性能向上を目指して多くの材料が開発されているが、要求性能の全てを高いレベルで満たすポリマーレジストを得ることは、原理的にも実際上も困難である。

最近では、ノボラック系レジストの検討が進められている。このレジストは、光リソグラフィで広く用いられてプロセスが確立している上、解像度やドライエッチング耐性には定評がある。しかしX線露光に対してはPMMAと同程度ないし若干良い程度で、低感度である^{50, 60)}。

ノボラックレジストは、ノボラック樹脂と感光性の溶解抑制剤とから成り、光露光では、溶解抑制剤が分解してアルカリ現像液可溶の物質に変化することを利用してパターンが形成される。X線露光の場合はエネルギーが光よりはるかに大きいいため、反応は光の場合のように特異的ではなく、可溶化に寄与しない反応や、ノボラックの架橋などの可溶化を妨げる反応も起こる⁶⁰⁾。

化学増幅効果を利用したノボラックレジストの高感度化が注目に値する。これは露光により分解して酸を発生する反応開始剤を導入したものであり、露光後酸の触媒作用により溶解抑制剤の分解-可溶化反応が効率的に進む。この結果感度は飛躍的に向上(30-50mJ/cm²)する^{61, 62)}。同様

な酸の触媒作用を利用して、露光後のベーキングにより架橋反応を進行させるネガ型のももあり、ポジ型同様の高い感度が得られている^{63, 64)}。さらに高い感度の報告もある⁶⁵⁾。解像度については0.25μmまでの転写パターンが示されている⁶⁵⁾。ノボラックレジストの優れたプロセス適用性を保持しており、X線リソグラフィにとっては有用性が高い。

4.4 放射光源

我国では半導体メーカー数社が高エネルギー研究所のフォトン・ファクトリーにより実験を行っている。しかし実用システムのためには、もっと小型で低価格、低維持経費の放射光源の開発が求められている。

西独では早くから偏向磁界に超電導電磁石を用いた小型蓄積リングKLEIN ERNAやCOSYの計画を発表し^{66, 67)}、開発に取り組んでいる。その後我国でも、住友重機やNTTが同様な開発に着手している。いずれも開発の最終段階にさしかかっているものと見られ、成り行きが注目される⁶⁸⁻⁷⁰⁾。

小型リングの開発においては、低エネルギー入射に伴う電子の寿命や、狭いリング空間への大電流の蓄積に伴うビームの不安定などの問題が考えられ、どの程度の蓄積電流が達成できるかがひとつのポイントとなろう。従ってリソグラフィの要求に適合する蓄積リングのエネルギーや電流のレベルを評価しておくことは重要である。小型リング開発の現状や装置上の問題等に関しては、本誌に別に企画があるとのことなので、ここでは上述の点の検討にとどめる。

蓄積リングのエネルギーや電流に係わるリソグラフィの主要な性能はスループットであり、これはまた、放射光を利用する主たる目的でもある。スループットは、レジストの露光に要する時間だけではなく、ウェハやマスクの着脱、ウェハステージのステップ移動・整定、ウェハ全体および露光

フィールド毎のアライメント，等に要する時間にも依存する。これらに適当な値⁷¹⁾，を仮定すると，フィールド寸法 $r=2.5\text{cm}$ で6インチウェハ50枚/h程度のスループットを得るにはフィールド毎の露光時間は1 sec程度であればよい。

この条件を満足する蓄積電子のエネルギーと電流の積 $E \cdot I$ と放射光源のピーク波長 λ_p との関係を図11に示す。この図は，3.2に示した吸収パワーの計算に基づき求めたものである。図には E と λ_p の関係も同時に示した。ここでレジストの吸収特性はPMMAと同じとし，PMMAの感度⁷²⁾の1/10に相当するエネルギー ($120\text{J}/\text{cm}^2$) が，表面から深さ $1\mu\text{m}$ におけるレジストに吸収されるとした。

レジストの感度はレジスト表面への入射エネルギー(mJ/cm^2)で表わすことが多い。実用的にはこれで充分であるが，スペクトルが異なる場合の比較には不適切である。例えば， $B=1.67\text{T}$ ， $E=0.7\text{GeV}$ のとき，上記の吸収エネルギーを与えるに要する入射エネルギーはおおよそ $150\text{mJ}/\text{cm}^2$ であるが $E=1\text{GeV}$ では約2倍必要となる。

図11の関係から，レジスト感度，波長 (λ_p)，スループット (露光時間) などと蓄積リングのパラメータ (E ， I ， B ， R) との関係の評価することができる。例えば $\lambda_p=5\text{\AA}$ のとき， $20\mu\text{m}$ 厚Beおよび $2\mu\text{m}$ 厚 Si_3N_4 を通してPMMAより10倍高感度のレジストを1秒で露光するには， $E \cdot I=220\text{GeV} \cdot \text{mA}$ であり， $B=4.5\text{T}$ (COSYの場合) とすれば $E=0.6\text{GeV}$ であるから，必要な電流は約 370mA となる。

この図では露光フィールドの拡幅・一様化のためのたて方向の走査は考慮していない。仮にたて方向に 2.5cm 程度走査したとすると，その分(3倍程度)電流を増やすか，高感度なレジストを使う必要がある。即ち，この図は感度 $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ のレジストを用い，たて方向に 2.5cm 程度走査したときの関係と読み変えることができる。

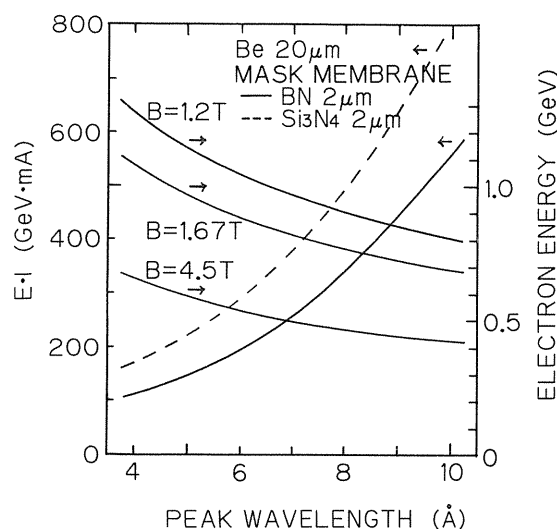


Fig. 11 Electron energy E and stored current I required for 1 sec exposure of a resist with 10 times higher sensitivity than PMMA ($120\text{J}/\text{cm}^2$ at the depth of $1\mu\text{m}$). B ; magnetic flux of the bending magnet.

4.5 露光領域の拡大・一様化

①反射鏡の振動，②電子軌道の揺動，③マスクとウェハの機械的走査，などが実験されている。①は，斜入射反射鏡を主反射角を中心に振動させる方法である。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利点があるが，一方，反射率が数10%で強度の損失があること，表面の汚染や加工精度により反射率が変化することなどが問題である。この方法は，IBMや西独のBESSYで実験されている^{72, 73)}。

②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振動させると，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⁷⁴⁾。この方法は振り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。図12に，この方法の有効性を確かめた実験の結果を示す⁷⁵⁾。±50 Gauss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倍以上に拡大されている。

この方法ではリングの電子軌道全体が変動する

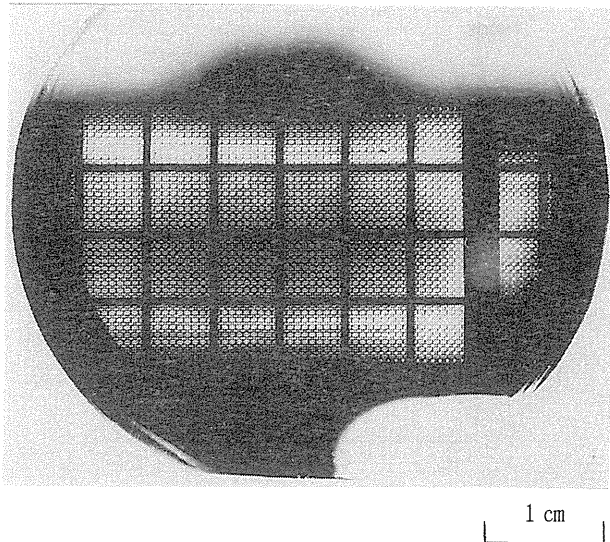


Fig.12 Exposure field expanded in the vertical direction by wobbling the electron beam of the ring. The narrow bright area in the right side of the photograph is exposed with a stationary synchrotron radiation.

ことになるので、全てのビームラインで所要の振り幅を得るには、ラティス構成の最適化や、対応するビーム揺動の位相に応じてビームラインの長さを変える等の工夫が必要であろう⁷⁶⁻⁷⁸⁾。またリングの小型化との両立性も問題となろう。

③マスク/ウェハの機械的走査

この方式によるたて型X線ステッパーが、西独のKarl Süss社から発表されている^{79, 80)}。マスクとウェハを、ファインアライメント後定盤にクランプし、全体を機械的に上下に走査する方式である。X線束の損失がなく、蓄積リングやビームラインに変更を加える必要がないことが魅力である。一方問題点として、機構が複雑になること、走査に伴う振動の影響、露光中の位置合わせ制御が困難、等が考えられるが、これらに関する体系的な評価結果はまだ報告されていない。

5. おわりに

放射光リソグラフィは、以上見てきたように、

シンプルなプロセスで高解像度、高精度、高スループットを実現することができ、従って $0.25\mu\text{m}$ 以下のパターンをターゲットとするならば、最も現実的な大量転写技術と云えよう。

しかしその実用化のためにはいくつかの課題がある。 $0.25\mu\text{m}$ をターゲットとする限り避け得ない共通的な課題のほか、X線リソグラフィあるいは放射光リソグラフィ固有の課題として大きなものは、小型リングの開発、マスク技術の確立およびここでは割愛したが、マスクの検査・修整技術の開発などである。

放射光は、他のX線源に比較すれば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、露光領域の拡大による強度の低下などがあり、決して余裕があるほどではない。特に小型リングでは電子の寿命や不安定性の問題があり、放射光照射によるガス放出が蓄積電流の寿命を低下させることなどを考えると、蓄積電流は少ない方が望ましい。このためには放射パワーの利用効率やレジスト感度の向上が必要となるが、この意味で最近の実用に耐え得るレジストの高感度化は重要である。これらの点に関して、今後さらに進展の余地があるものと考えられる。

マスクについては、多くの研究の結果、問題の所在や解決の道筋が明らかにされてきており、着実に進展している。アライメントについては、要求に適合するものが開発されており、今後より実環境での評価と、それに基づき完成度を高めていく必要がある。

X線リソグラフィの技術上の問題の多くは等倍転写であることに起因しており、悲観的見方もないではない。しかし少なくとも $0.5\mu\text{m}$ レベルではデバイス作製に適用可能であることが、昨年相次いで報告されている⁸¹⁻⁸³⁾。 $0.35\mu\text{m} \sim 0.25\mu\text{m}$ パターンに向けた技術開発と共に、放射光リソグラフィの有用性を実際のデバイス作製において実証していく努力も必要となっている⁸⁴⁾。

反射光学系による縮小投影方式は確かに魅力的

であるが、現状ではかなり長波長を使うこととなり、これに適したマスクやレジストの開発を同時に進めなければならない。また、現状の放射光リソグラフィは、結果的にリソグラフィ用としてかなり最適化された波長領域を使っており、これと異なる波長領域の選択には、匹敵し得る利点をいかに求めるかが重要ではないかと考える。

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。現状では常電導型の方がより確実な選択と考えられるが、COSYを始めとする小型リングの開発により、要求を満足するものが実現されれば、放射光リソグラフィの実用化を大きく進展させることとなろう。この点については、本年中にある程度の見通しが得られるものと期待される。

謝 辞

電総研における放射光リソグラフィの研究は、当所の鳳紘一郎（現横浜国大）、平田正紘、金山敏彦、一村信吾、谷野浩史、伊藤順司各氏、およびソルテックの乙武太朗（現ニコン）、長谷川晋也、清水秀夫（現ソニー）各氏と共同して進められており、本報告をまとめるにあたって、その成果の一部を利用させていただいた。放射光の利用については、当所の冨増多喜夫量子放射部長および、山崎鉄夫室長を始めとする放射線技術研究室各位による放射光施設の維持・性能向上に対する絶えざる尽力に負うところが大きい。以上各氏に深く感謝する。

参考文献

- 1) 佐藤隆, 中瀬真, 堀池靖浩, 第47回応用物理学会 学術講演会予稿集, 324 (1986).
- 2) V. Pol, J.H. Bennowitz and J. T. Clemens, Proc. 1987 Symp. VLSI Tech., 1 (1987).
- 3) 鈴木淑希, 電子材料別冊: 超LSI製造・試験装

- 置ハンドブック1987年版, 115 (1986).
- 4) 阿刀田伸史, 同上1988年版, 92 (1987).
- 5) 鳳紘一郎, 応用物理 G 17 (1984).
- 6) E. Spiler, D.E. Eastman, R. Feder, W. D. Grobman, W. Gudat and J. Topalian, J. Appl. Phys. G, 5450 (1976).
- 7) B. Fay, J. Trotel, Y. Petroff, R. Pinchaux and P. Thiry. Appl. Phys. Lett. 29, 370 (1976).
- 8) H. Aritome, T. Nishimura, H. Kotani, S. Matsui, O. Nakagawa and S. Namba, J. Vac. Sci. & Tech. 15, 992 (1987).
- 9) K. Hoh and H. Tanino. Bul. Electrotech. Lab. 49, 983 (1985).
- 10) H. Matsumura, Extended Abstract 18th (1986) Intern. Conf. Solid State Devices & Materials, 17 (1986).
- 11) 木下博雄, 金子隆司, 武井弘次, 石原直, 第47回 応用物理学会学術講演会予稿集, 322 (1986).
- 12) 鈴木茂雄, 電子材料別冊; 超LSI製造・試験装置 ハンドブック1989年版, 90 (1988).
- 13) A.M. Howryluk and L.G. Seppala, J. Vac. Sci. & Tech. B6, 2162 (1988).
- 14) J. Itoh, T. Kanayama, N. Atoda and K. Hoh, ibid B6, 409 (1988).
- 15) T. Tomimasu, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado and M. Chiwaki. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30, 3133 (1983).
- 16) 冨増多喜夫, 放射光 1, 33 (1988).
- 17) 伊藤順司, 金山敏彦, 阿刀田伸史, 鶴島稔夫, Bul. Electrotech. Lab. 49, 613 (1985).
- 18) 金子隆司, 鈴木雅則, 中田宏, 小沢章, 大久保高志, 第46回応用物理学会学術講演会予稿集, 323 (1985).
- 19) 阿刀田伸史, 清水秀夫, 第35回応用物理学関係連合講演会, 31p-K-6 (1988).
- 20) 清水秀夫, 阿刀田伸史, 小林郁朗, 第36回応用物理学関係連合講演会予稿集, 610 (1989).
- 21) 伊藤順司, 清水秀夫, 阿刀田伸史, 金山敏彦, 同上, 610 (1989).

- 22) K.Okada, K.Fujii, Y.Kawase and M. Nagano, *J. Vac. Sci. & Tech.* **B6**, 191 (1988).
- 23) J. Schwinger, *Phys. Rev.* **75**, 1912 (1949).
- 24) H.Winick, "Synchrotron Radiation Research" edited by H.Winick and S.Doniach (Plenum Press, New York, 1980), P. 11.
- 25) M.Tsuda, S.Oikawa and A.Suzuki, *Polymer Eng. Sci.* **17**, 390 (1977).
- 26) K.Mochiji, T.Kimura, H.Obayashi and H. Maezawa, *Proc. SPIE* **539**, 56 (1985).
- 27) 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).
- 28) 阿刀田伸史, 谷野浩史, 鳳紘一郎, 平田正紘, 一村信吾, 第24回半導体, 集積回路技術シンポジウム講演論文集, 42 (1983).
- 29) H.S.Choong and F.J.Kahn, *J. Vac. Sci. & Tech.* **B1**, 1066 (1983).
- 30) N.Atoda, H.Kawakatsu, H.Tanino, S. Ichimura, M.Hirata and K.Hoh, *ibid* **B1**, 1267 (1983).
- 31) T.Kanayama, T.Ohta, J.Itoh, N.Atoda and K.Hoh, *Digest of Papers 1st MicroProcess Conf.*, 84 (1988).
- 32) R.Feder, E.Spiller and J.Topalian, *Polymer Eng. Sci.* **17**, 385 (1977).
- 33) N.Atoda K.Hoh, *Proc. Intern. Symp. VLSI Tech. System and Appl.*, Taipei (1987) p.48.
- 34) J.Itoh and T.Kanayama, *Japan. J. Appl. Phys.* **25**, L684 (1986).
- 35) J.Itoh, T.Kanayama, N.Atoda and K.Hoh, *Proc. SPIE* **773**, 7 (1987).
- 36) R.Viswanathan, A.D.Wilson, J.Lafuente, H.Voelker and A.Kern, *ibid* **448**, 130 (1983).
- 37) J.P.Lazzari and P.Parrens, *ibid* **393**, 213 (1983).
- 38) E.Bassous, R.Feder, E.Spiller and J. Topalian, *Solid State Tech.* **55** (Sept., 1976).
- 39) D.Maydan, G.A.Coquin, H.J.Levinstein, A. K.Sinha and D.N.K.Wang, *J. Vac. Sci. & Tech.* **16**, 1959 (1979).
- 40) T.Ebata, M.Sekimoto, T.Ono, K.Suzuki, J. Matsui and S.Nakayama, *Japan. J. Appl., Phys.* **21**, 762 (1982).
- 41) R.E.Acosta, J.R.Maldonado, L.K.Towart and J.M.Warlaumont, *Proc. SPIE* **448**, 114 (1983).
- 42) H.Lüthje, B.Matthiessen, M.Harms and A. Bruns, *ibid* **773**, 15 (1987).
- 43) K.Suzuki and J.Matsui, *J. Vac. Sci. & Tech. B* **4**, 221 (1986).
- 44) G.M.Wells, G.Chen, D.So, E.L.Brodsky, K.Kriesel and F. Cerrina, *ibid* **B6**, 2190 (1988).
- 45) A.W.Yanof, D.J.Resnick, C.A.Jankoski and W.A.Johnson, *Proc. SPIE* **632**, 118 (1983).
- 46) K.Suzuki, *ibid* **773**, 23 (1987).
- 47) M.Sekimoto, A.Ozawa, T.Ohkubo and H. Yoshihara, *Extended Abstract 16th (1984 Intern.) Conf. Solid State Devices & Materials*, 23 (1984).
- 48) I.Plotnik, M.E.Porter, M.Toth, S.Akhtar and H.I.Smith, *Microelectronic Eng.* **5**, 51 (1986).
- 49) M.Karnezos, R.Ruby, B.Heflinger, H. Nakano and R.Jones, *J. Vac. Sci. & Tech.* **B5**, 283 (1987).
- 50) T.Kanayama, M.Sugawara and J.Itoh, *ibid* **B6**, 174 (1988).
- 51) N.Yoshioka, S.Takeuchi, H.Morimoto and Y.Watakabe, *Proc. SPIE* **923**, 2 (1988).
- 52) Y.C.Ku and H.I. Smith, *J. Vac. Sci. & Tech. G*, 2714 (1988).
- 53) M.Urai, K. Iguchi, C. Shiga and M. Koba,

- Digest of Papers 1st MicroProcess Conf., 82 (1988).
- 54) W.A.Johnson, R.A.Levy, D.J.Resnick, T. E.Saunders and A.W.Yanof, *J. Vac. Sci. & Tech.* **B5**, 257 (1987).
- 55) R.A. Levy, D.J.Resnick, R.C.Frye, and A. W.Yanof, *ibid* **B6**, 154 (1988).
- 56) P.L.King, L.Pan and P. Pianetta, *ibid* **B6**, 162 (1988).
- 57) K.Iguchi, C.Siga, M.Urai and M.Koba, *Digest of Papers 1st MicroProcess Conf.*, 80 (1988).
- 58) Y.Vladimirsky, *J. Vac. Sci. & Tech.* **B6**, 183 (1988).
- 59) A. Heuberger, *Microelectronic Eng.* **5**, 3 (1986).
- 60) D.C.Mancini, J.W.Taylor, T.V.Jayaraman and R.J.West, *Proc. SPIE* **920**, 372 (1988).
- 61) K.-F. Dössel, H.L.Huber and H.Oertel, *Microelectronic Eng.* **5**, 97 (1986).
- 62) R.Dammel, K.F.Dosscl, J.Lingnau, J. Theis, H.Huber and H.Oertel, *ibid* **6**, 503 (1987).
- 63) E.Tai, B.Fay, C.M.Stein and W.E.Feely, *Proc. SPIE* **773**, 132 (1987).
- 64) D.Seligson, S.Das, H.Gaw and P.Pianetta, *J. Vac. Sci. & Tech.* **86**, 2303 (1988).
- 65) D.Seligson, H.Ito and C.G.Willson, *ibid* **B6**, 2268 (1988).
- 66) U.Trinks, F.Nolden and A.Jahnke, *Nucl. Instr. Meth.* **200**, 475 (1982).
- 67) A. Heuberger, *Proc. SPIE* **448**, 8 (1983).
- 68) H.Betz, *J. Vac. Sci. & Tech.* **A6**, 1618 (1988).
- 69) N. Takahasi and SHI Accelerator Research Group, *Proc. SPIE* **923**, 47 (1988).
- 70) T.Hayasaka, *Proc. SEMI Tech. Symp.* 88 (Tokyo), 228 (1988).
- 71) A. D. Wilson, *Proc. SPIE* **537**, 85 (1983).
- 72) R.P.Haelbich, J.P.Silverman, W.D.Grobman, L.R.Maldonado and J.M.Warlaumont, *J. Vac. Sci. & Tech.* **B1**, 1262 (1983).
- 73) M.Bieber, H.-U.Scheunemann, H.Betz and A. Heuberger, *ibid* **B1**, 1271 (1983).
- 74) H. Betz and G. Muhlhalt, *Proc. SPIE* **448**, 83 (1983).
- 75) H.Tanino, K.Hoh, M.Hirata, S.Ichimura, N.Atoda, T.Tomimasu, T.Noguchi, S. Sugiyama and T.Yamazaki, *Japan. J. Appl. Phys.* **22**, L667 (1983).
- 76) 富增多喜夫, *真空* **29**, 299 (1986).
- 77) T. Tomimasu, *Japan. J. Appl. Phys.* **26**, 741 (1987).
- 78) 高田博史, 富增多喜夫, *電気学会論文誌 C* **108-C**, 547 (1988).
- 79) E.Cullmann, K.A.Cooper and W.Vach, *Proc. SPIE* **773**, 2 (1987).
- 80) E.Cullmann and K.A.Cooper, *J. Vac. Sci. & Tech.* **B6**, 2132 (1988).
- 81) G.Zwicker, L.Csepregi, H.-L.Huber, W. Windbrack and A. Heuberger, *Proc. SPIE* **923**, 55 (1988).
- 82) J.P.Silverman, V.DiMilia, D.Katcoff, K. Kwietniak, D.Seeger, L.K.Wang, J.M. Warlaumont and A.D.Wilson, *J. Vac. Sci. & Tech.* **B6**, 2147 (1988).
- 83) R.Viswanathan, R.B.Acosta, D.Seeger, H. Voelker, A.Wilson, I.Babich, J.Maldonado, J.Warlaumont, O.Vladimirky and F. Hohn, *ibid* **B6**, 2196 (1988).
- 84) A. Heuberger, *ibid* **B6**, 107 (1988).

