

新しいリソグラフィ技術とレジスト

大 野 清 伍

沖電気工業株式会社 基盤技術研究所 〒193 東京都八王子市東浅川町 550-5

(1985 年 1 月 25 日 受理)

New Methods in Microlithography and Resists

Seigo OHNO

Research Laboratory, Oki Electric Industry Co., Ltd.
Higashiasakawa 550-5, Hachioji, Tokyo 193

(Received January 25, 1985)

This paper reviews recent developments in microlithography, which is a key technology in manufacturing LSI and other electron devices. Newly developed exposure techniques such as electron beam, X-ray, and deep UV methods make it possible to delineate submicron features. To bring these methods into practical use, development of suitable resists is essential. Requirements for these resists such as sensitivity, resolution, and resistivity to dry etching are also discussed.

1. はじめに

最近の電子デバイスは微細な回路素子からなるものが多く、これらを製造するために微細加工が必須技術になっている。従来より、この目的に写真食刻技術（フォトリソグラフィ）が用いられている。しかし、半導体集積回路（IC）の集積度は年率約 2 倍の割合で向上しており、光を用いる加工は早晩限界に達するといわれている。これを打破するため、より短波長の紫外線、電子線、軟 X 線、イオン線等、新しい線源を用いる方法が研究されている。一方、これらの新しい線源に適したレジスト材料の研究も勢力的に行われている。ここでは、レジストを中心として、各リソグラフィの現状、今後の課題について概説する。

2. フォトリソグラフィ

2.1 原 理

Fig. 1 はフォトリソグラフィを用いた微細加工の概略工程を示す。まず最初に基板表面にエッチングしようとする物質（例えばアルミニウム）の薄膜を形成し、この上にスピニング法等によりレジストを塗布する。レジストは光照射により、その溶解性が変化する被膜材料であり、エッチングの際に基板を保護する役目をもつ。レジストを塗布した基板に所望のパターンをもつ

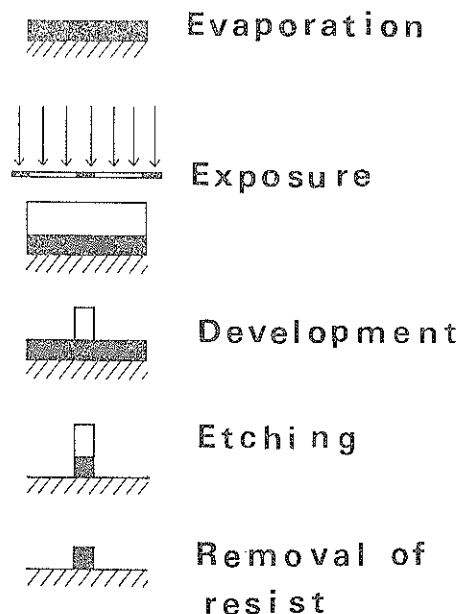


Fig. 1 Ordinary process in microfabrication.

フォトマスク（写真乾板に類似のもの）を通して光を照射し化学変化を起させた後、適当な溶媒（現像液）に浸漬すると、照射部または未照射部のみが選択的に溶出し、レジストのパターンが形成される。この場合、照射

により溶解性が増大しこの部分が溶出するものをポジ型レジスト (Fig. 1 はポジ型の例を示す), 逆に照射により不溶化し, 未照射部のみが溶出するものをネガ型レジストと称する。次に, この基板を適当なエッチャントを用いてエッチングすると, レジストパターンで被覆された部分はエッチングされないで残る。最後に, 役目が終わったレジストを剝離すると所望のエッチングパターンが得られる。

2.2 フォトレジストに要求される性質

(1) 感 度

ポジ型レジストの露光量と膜厚との関係は Fig. 2 のようになる。この場合, 感度は膜厚が零になる点 (矢印) の露光量 (またはこの逆数) で表わすのが一般的である。また, 膜厚が零になる点の近傍における特性線の接線の勾配でコントラスト ($\gamma = \tan \theta$) を定義する。

ネガ型レジストの露光特性は Fig. 3 のような形になる。この場合は, 膜厚が 50% になる点 (矢印) の露光量 (またはこの逆数) で感度を定義するのが一般的であ

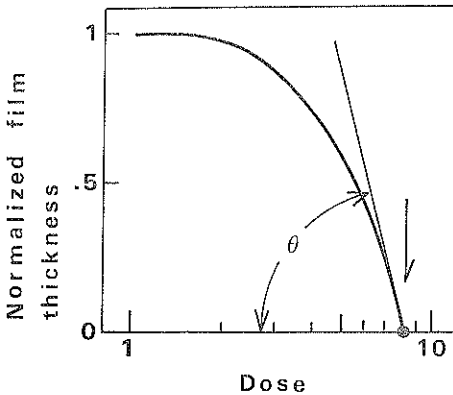


Fig. 2 Typical exposure response curve for a positive resist.

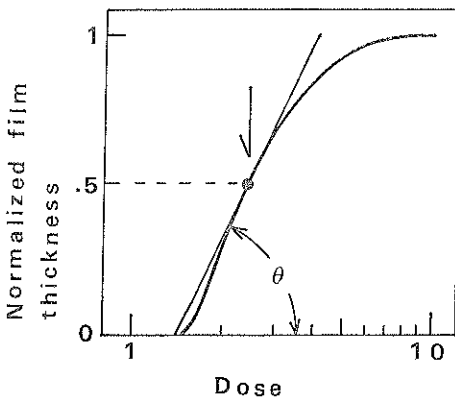


Fig. 3 Typical exposure response curve for a negative resist.

る。また, コントラストはこの点の勾配で定義する。

感度は, 当然のことであるが, 高い程望ましい。しかし, 実際には感度と解像性は相反することが多く, 高解像性をもちかつ高感度を示す材料を見出すことが, レジスト研究における重要なテーマになっている。

(2) 解 像 度

レジストをパターンニングして加工が可能な最小寸法で解像度を定義する。解像度はレジストを構成する材料によって大きく支配され, 一般には γ 値が大きい程高解像度を得られる。しかし, 解像度は露光方法, 現像条件等によっても変化するため, 材料固有の性質として一義的に定義することはできない。このため, より高い解像度を得るため, レジストの改良はもちろん, 露光方法, 現像プロセスの改良が絶えず行われている。

(3) エッチング耐性

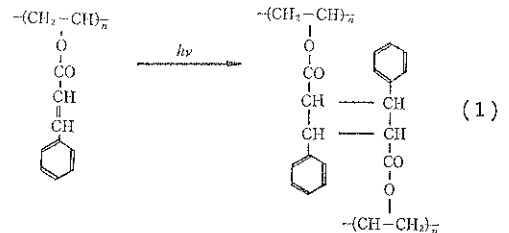
Fig. 1 に示したように, リソグラフィにおいてレジストパターン形成後基板はエッチングされる。以前はふっ酸等を用いる湿式エッチングが多用されたが, 最近の LSI の集積度の向上はめざましく, 極めて微細なパターンが要求されるようになった。このため, 異方性エッチングが可能なドライ方式が多用される傾向にあり, 特にドライエッチングに対して良好な耐性をもつ高解像レジストが望まれている。

芳香族化合物は放射線に対して良好な耐性を示すことがよく知られている。レジストのドライエッチング耐性の向上にも芳香族基の導入は極めて効果的である。

2.3 代表的なフォトレジスト

(1) ポリケイ皮酸系ネガ型レジスト

適当な増感剤を添加したポリケイ皮酸ビニルに光を照射すると, (1) 式のように架橋する。架橋が一定程度以上になるとゲル化し溶媒に不溶となるため, ネガ型レジストになり得る。これは KPR[®] として Kodak 社から発売され, トランジスタの加工に使用された。現在は, 半導体の加工にはほとんど用いられないが, 電子工業における微細加工の出発点になった歴史的な材料である。

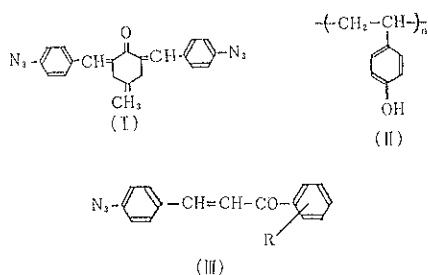


(2) アジド化合物を架橋剤とするネガ型レジスト

環化ゴムと芳香族ビスアジド (例えば, 2, 6-(4'-アジドベンザル) 4-メチルシクロヘキサン (I)) の混合物

に紫外線を照射するとビスアジドは光分解し、 N_2 を放出して活性なナイトレン($-N:$)が生成し、環化ゴムを架橋する。この場合も架橋が一定程度を越えるとゲル化し不溶性になるため、ネガ型レジストになる。

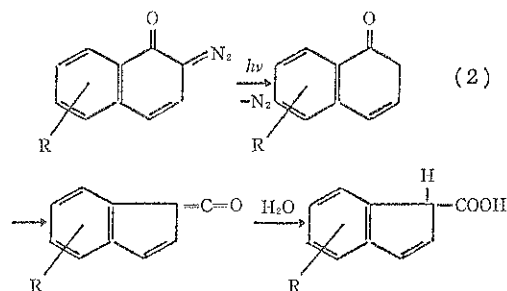
環化ゴム系レジストの解像度は後述するポジ型のそれに比べ低い。その主な原因は、光照射により不溶化(ゲル化)したレジストが現像液により膨潤し、変形するためである。Iwayanagi ら¹⁾はポリビニルフェノール(II)にアジドカルコン(III)を添加したネガ型フォトリソレジスト「MRL」を報告した。このレジストはアルカリ水溶液で現像され、事実上膨潤しないため高解像度が得られる。



(3) ポジ型レジスト

o-ナフトキノンジアジド化合物はアルカリ性水溶液に不溶であるが、紫外線照射により(2)式のように反応し、アルカリ可溶になるためポジ型レジストになる。実際のレジストには改質のため、ノボラック樹脂等が添加されている。このレジストは極めて高い解像度($1\mu m$ 以下)をもち、ドライエッチング耐性も優れている。

以前は現像液として無機アルカリが用いられ、この主成分である K^+ , Na^+ が半導体デバイスの大敵であるため、その使用範囲は限定されていた。最近は安定な有機アルカリ現像液が開発され、IC 類の製造に多く用いられている。特に、超 LSI の製造には不可欠の材料になっている。



2.4 露光方法

フォトリソグラフィ用光源は、当然のことながら、レジストを光分解または光架橋させ得る波長の光を発生す

るものでなければならない。実際には水銀灯が用いられ、その発光スペクトルのうち、主として g 線 (435 nm), h 線 (405 nm), i 線 (365 nm) が用いられる。ただし、縮小投影露光方式では単色光を用いるのが標準的である。

この光源を用いてレジストを塗布した基板を露光する場合、次の4種の方法が用いられている。

- ① コンタクト露光法
- ② プロキシミティ露光法
- ③ 等倍反射投影露光法
- ④ 縮小投影露光法

コンタクト露光法では、文字通り基板とマスクを密着させて露光する。これは古くから用いられており、高い解像度が得られるが、マスクと基板が接触するため、レジスト膜に傷がつきやすいこと、マスクが汚れやすいことが欠点である。

プロキシミティ露光は上記の欠点を除去するため、基板とマスクを数十ミクロン離して露光する方法である。これにより、上記の欠点は軽減できるが、逆に解像度の低下は避けられない。現在の大部分の露光装置(マスクアライナ)は簡単な操作でいずれかを選択できるようになっており、目的に応じて使いわけるのが普通である。

等倍反射投影露光法では、反射鏡よりなる光学系を用いて、マスクのパターンを色収差なしに 1:1 で基板上に投影して露光する。この場合、マスクと基板は十分離れており、レジスト膜の損傷及びマスクの汚れの心配は全くなくなる。

縮小投影露光法では、実際のチップの n 倍 (n は 5, 10 が一般的) のパターンをもつマスク(レチクル)を用い、レンズを用いて縮小像を投影して露光する。この方法の長所、短所は次の通りである。

レチクルの大きさは必要パターンの5ないし10倍であるから、製作が容易である。

アライメントもレチクルで行うから精度を維持しやすい。

チップ毎に露光するからスループットは低下する。

3. Deep UV リソグラフィ

Lin²⁾ は電子線(EB)レジストであるポリメチルメタクリレート(PMMA)(IV)に 250 nm 以下の紫外線を照射することにより、 $0.2\mu m$ のパターンの転写に成功し、注目された。この方法は従来のフォトリソグラフィと区別するため、Deep UV Lithography と名づけられた。

フォトリソグラフィにおいて、最小解像線幅はプロキシミティ露光では波長の $1/2$ 乗に、投影露光では 1 乗に

比例するから、短波長化が解像度の向上に有効であるのは当然であるが、この方法のもう一つの特長は増感剤を用いることなしに多くの有機ポリマーを分解ないし架橋できることである。前述の解像度、 $0.2\mu\text{m}$ 、には PMMA の高解像性が大きく寄与していると考えられる。

3.1 露光方法

Deep UV リソグラフィは従来の方法の直接的な発展形であり、いくつかの点を変更するのみで露光システムをつくりあげることができる。第一の変更点は光源である。重水素ランプは $200\sim 300\text{nm}$ の波長範囲でほぼ均一な強度の光を発生し、極めて好ましい光源であるが、大出力化が困難（市販品は 200W が最大）なため実用機には用いられていない。

Xe-Hg ランプでは Deep UV 光の発光効率はそれ程高くはないが大出力化が可能のため、Deep UV 用に改良された Xe-Hg ランプが開発された³⁾。このランプは多量の赤外線を発生するためこれを除去するコールドミラーも開発され⁴⁾、これらを用いた Deep UV コンタクト/プロキシミティ露光装置が発売されている。更に、等倍反射投影露光装置も開発された^{5,6)}。

最近、エキシマレーザが進歩し、これを用いた露光法が検討され^{7,8)}、Deep UV 光源として有望視されている。

他の変更点はマスク基板である。Deep UV 用には合成石英製のマスク基板を必要とし、当初はこれが高価であることが大きな欠点となっていたが、最近はかなり廉価になり、この問題も解消しつつある。

3.2 Deep UV 用レジスト

前記のように、Deep UV 法は有望な露光方法であるが、これに適した実用レジストが極めて少ないため、レジストの開発が重要な課題となっている。

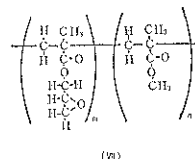
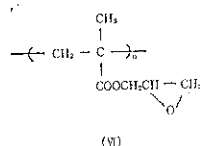
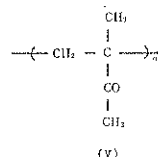
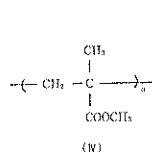
(1) ポジ型レジスト

すでに述べたように、Deep UV 照射により多くの有機ポリマーは直接反応するから、EB 用として研究された多くのレジストが Deep UV 用としても評価された。Lin²⁾ による PMMA はその最初の例であり、解像性は良好であるが低感度であることは EB の場合と同様である。ポリイソプロペニルケトン (PMIPK) (V) も EB 用として検討されたものであるが、光増感法により PMMA の数倍の感度をもつレジストに改良されている⁹⁾。

Deep UV 照射により、大部分のポリマーは EB の場合と同一形式で反応（ネガ型はネガ型、ポジ型はポジ型）することが明らかにされている¹⁰⁾。ただし、ポリグリシジルメタクリレート (PGMA) (VI) は例外で、EB 照射では分子内のエポキシ基の開裂により架橋するため

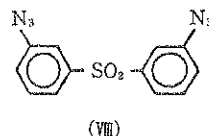
ネガ型となるが、Deep UV 照射に対してはエポキシ基が不活性で主鎖切断が優先するためポジ型になる¹⁰⁾。筆者ら¹¹⁾はこの性質を積極的に利用し、GMA と MMA を共重合化することにより、Deep UV 光に対してポジ型でパターン形成後の熱処理で架橋させ、性質を改良できるレジスト「GCM」(VII)を開発した。

以上のアクリル系レジストはいずれも高解像度をもつが、低感度であることおよびドライエッチング耐性が不十分であることが共通の欠点である。



(2) ネガ型レジスト

津田ら¹²⁾はグリシジルメタクリレートとこれのケイ皮酸エステルを共重合化したネガ型レジストを報告している。今村ら¹³⁾は EB 用として開発されたクロロメチル化ポリスチレン「CMS」を用いて、 $0.8\mu\text{m}$ のパターンを解像している。岩柳ら¹⁴⁾はポリビニルフェノール (II) と 3,3'-ジアジドフェニルスルホン (VIII) を主成分とするネガ型レジスト「MRS」を報告した。これは PMMA の約 100 倍の感度をもち、反射投影露光法で $1\mu\text{m}$ が解像できるといわれている。これらのレジストはアクリル系のポジ型レジストに比べドライエッチング耐性が改善されているのが共通の特徴である。



(3) リフトオフ用レジスト

通常の微細加工では、レジストパターン形成後露出部をエッチングして所望のパターンを形成する (Fig. 1)。これに対し、もう一つのパターン形成法としてリフトオフ法が知られている。この方法では、Fig. 4 に示すように、基板上にレジストパターンを形成した後、その上に真空蒸着法等で皮膜を形成し、次に良溶媒でレジスト

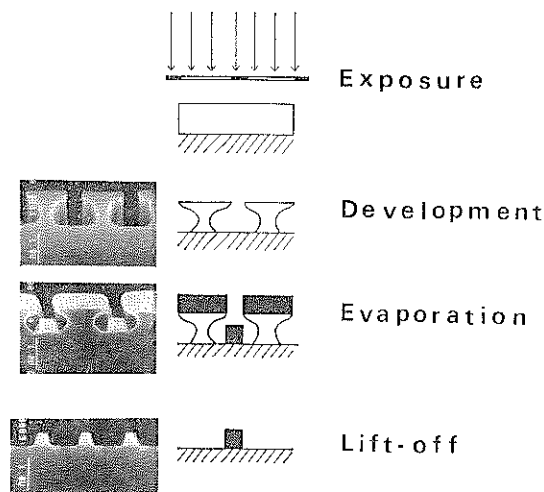
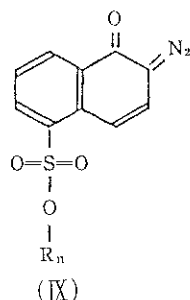


Fig. 4 Lift-off process by use of LMR resist.

を溶解除去する。この際、レジストの上に堆積した皮膜もレジストと一緒に除去(リフトオフ)され、谷間に堆積した皮膜のみが残り、パターンが形成される。この方法はエッチングしにくい金属、化合物のパターン形成に特に有効である。Fig. 4 より明らかなように、リフトオフを確実にを行うためには、レジストの断面が逆台形(またはキノコ状)であることが必須条件である。このため、多層レジスト法^{15,17)}、クロロベンゼン処理法¹⁶⁾等が提案されているが、工程が複雑なこと、再現性が不十分なこと等、満足できるものではない。

筆者ら¹⁸⁾は単純な現像工程でキノコ状の断面をもつパターンが再現性良く得られ、高感度 (PMMA の100倍以上) でかつ $0.3\ \mu\text{m}$ の解像度 (コンタクト法) をもつリフトオフ専用の Deep UV ネガ型レジスト「LMR」を開発した。LMR の主成分はナフトキノンジアジトのスルホン酸エステル(IX)であり、分子量が1000程度のオリゴマーである。このレジストを用いてアルミニウムのパターンを形成した例を Fig. 4 に示す。SEM 写真と模式図を対比して示してあるが、レジストのキノコ状断面がきれいに形成されており、サブミクロンのアルミ



ニウムのパターンも確実に形成されている。また、LMR は基板を 150°C に加熱して蒸着しても変形せずかつリフトオフも容易である。

4. 電子線 (EB) リソグラフィ

よく知られているように、電位差 V (Volt) で加速された EB の波長 λ (nm) は

$$\lambda = \sqrt{1.5/V}$$

で与えられる。例えば、20 keV の EB の波長は $8.7\ \text{pm}$ であり、要求される加工寸法 (ミクロン～サブミクロン) に比べ桁違いに短い。このため、回折による解像の限界は無視できる程小さい。また、EB は電磁的に集束および走査ができるため、いわゆる“一筆書き”が可能であり、データから直接パターンを描画できる。EB リソグラフィはこれらの性質を利用したものであり、マスターマスクの製造に威力を発揮しており、またウエハへの直接描画にも使用されている。

EB 露光装置は大きなシステムでありかつ優れた解説¹⁹⁾もあるため、ここでは物質 (レジストおよび基板) と EB の相互作用について解説する。

4.1 EB リソグラフィにおける解像度の支配因子

前記のように、EB リソグラフィは原理的には極めて高い解像度が期待できるが、実際には次のような解像度を低下させる因子が存在する。

- (1) 電子光学系の収差
- (2) レジストの解像性
- (3) レジスト内での前方散乱
- (4) 基板からの後方散乱

これらのうち、特に(2)と(4)が重要である。

Fig. 5 に示すように、入射 EB は前方散乱しながらレジスト層を通過するため、ここである程度の強度分布が生ずる。電子は更に基板に進入し、ある深さまで達した後、後方散乱される。後方散乱に関して、シリコン基

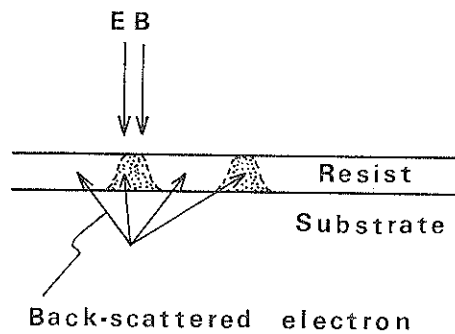


Fig. 5 Back-scattering and proximity effects in the EB lithography.

板上の PMMA レジスト膜の系についてモンテカルロ法によるシミュレーション結果が報告されており²⁰⁾, この拡がりは前方散乱のそれに比べはるかに大きい。例えば, 厚さ $1\mu\text{m}$ の PMMA レジストを塗布したシリコン基板に 20keV の EB を照射する場合, レジスト/基板界面における後方散乱による電子の拡がりは $2\mu\text{m}$ 程度に達する。

この結果から容易に想像できるように, 後方散乱は解像度を低下させる大きな原因になる。例えば, 20keV の EB で $2\mu\text{m}$ 間隔のパターンを描画する場合, Fig. 5 に示すように, 目的とするパターンの描画中に隣のパターンもある程度露光されてしまう。これがいわゆる近接効果であり, EB リソグラフィにおける解像度低下および描画寸法の変動の大きな要因の一つである。特に EB 照射により架橋するネガ型レジストの場合, 影響が大きい。これを打破するため, より高圧 ($\sim 50\text{kV}$) で加速し, 電子の進入を深くすることにより近接効果を低減させる方法が提案されている²¹⁻²³⁾。

4.2 EB レジスト

有機ポリマーは電離放射線に対して分解型と架橋型に分類でき, フォトレジストの場合と同様, 分解型はポジ型レジストに, 架橋型はネガ型レジストになり得る。EB リソグラフィでは分子の結合エネルギーより十分大きなエネルギーをもつ EB を使用するから, レジストになり得る (EB 照射により化学変化する) 物質は多い。しかし, 実際にレジストとしての条件を具備するものは極めて少ない。EB レジストの場合も, フォトレジストと同様, 下記の性質が基本的に重要である。

- 感 度
- 解像度
- エッチング耐性

(1) ポジ型レジスト

PMMA が放射線分解型ポリマーであることは以前から知られている²⁴⁾。Haller ら²⁵⁾はこのポリマーを EB レジストとして用い, 高解像パターンの形成に成功した。PMMA は現在でも最も高い解像度 ($\sim 0.1\mu\text{m}$) をもつレジストであり, 一種の“基準レジスト”になっている。欠点は感度が低い ($50\mu\text{C}/\text{cm}^2$) ことである。

その後, 多くのポリマーの EB 露光特性が検討された。代表的なポジ型レジストを Table 1 に示す。これらは PMMA に比べ感度は改善されているが, 解像度は同等か多少劣っている。

(2) ネガ型レジスト

ネガ型 EB レジストの感度は平均分子量に比例することが明らかになっており, 高感度化は容易であるが同時に解像度の低下を伴うのが普通であるから, 単純な高

感度化は意味がない。前にも述べたように, ネガ型レジストの解像度を低下させる最大の原因は現像液によるゲルの膨潤であり, これを抑制しながら高感度化することが一つのキーポイントである。

Table 2 に数種のネガ型レジストを示す。このうち, COP と PGMA は EB リソグラフィによるマスク製作の初期から用いられている実績の豊富なレジストである。

EB によるマスクの製造は実用レベルにあり, 次の応用は直接描画によるデバイス製作である。これにはドライエッチングが多用されるから, これに対する耐性の良いレジストが不可欠である。ドライエッチング耐性の向上に芳香族基の導入が有効であることは前に述べた。Table 1 および 2 に示した CMS を除くレジストは芳香族基を含んでおらず, 耐性は不十分である。

CMS はドライエッチング耐性を向上させるように設計されたレジストである。解像度もネガ型としては最高の部類に属するが, 感度は他のネガ型レジストに比べ 1 桁低い。すなわち, 直接描画用のレジストはまだ十分とはいえず, 更に改良が望まれる。

5. X 線リソグラフィ

X 線は波長が短い ($0.5\sim 5\text{nm}$) ため回折の影響が少なくかつ EB に比べ透過能が桁違いに大きいから, これを線源としたリソグラフィは高解像が期待できる。

Smith ら²⁶⁾は軟 X 線を用いたリソグラフィを検討し, 大きなアスペクト比で微細なパターンが転写できることを実証した。その後, 線源, マスク, 露光装置等が勢力的に研究された²⁷⁾。

X 線をリソグラフィへ応用する場合, 当面はマスクを用いた転写に限られるであろう。当然のことであるが, マスクの支持体としては吸収係数の小さい材料, パターン部の吸収体としては吸収係数の大きい材料が望ましい。吸収体としては加工が容易な金がよく用いられる。支持体としては, ポリイミド, ポリエステル, Si, Si_3N_4 等が用いられているが, 有機ポリマー膜は耐薬品性, 耐熱性に難点があり, 無機膜は機械的強度が不十分である。いずれにせよ, マスクは他の方法 (例えば EB 法) で製作せざるをえない。従って, これが解像度の支配因子の一つになる可能性がある。

X 線リソグラフィにおいて, レジストも大きな課題の一つである。X 線照射による反応は, 発生した光電子によるものが主体であり, 前述の EB レジストは X 線レジストとしても用いられる。また, X 線吸収能の大きい元素を導入し, 感度の向上をはかった専用レジストもあるが²⁸⁾, まだ十分とはいえず。

Table 1 Sensitivities of positive EB resists

Symbol	Material	Sens./ $\mu\text{C cm}^{-2}$	Ref.
PMMA	poly (methyl methacrylate) (IV)	50	25)
PBS	poly (butene-1-sulfone) (X)	0.8	26)
FBM-110	poly (fluoroalkyl methacrylate) (XI)	0.4	27)
EBR-9	poly (2, 2, 2-trifluoroethyl- α -chloroacrylate) (XII)	3-0.4	28)
P(MMA-AN)	poly (methyl methacrylate-co-acrylonitrile) (XIII)	5	29)
FMR-E 101	α -cyanoacrylate polymers (XIV)	0.2	30)
PMIPK	poly (isopropenyl ketone) (V)	2	31)

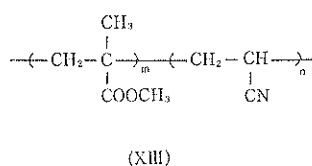
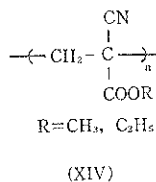
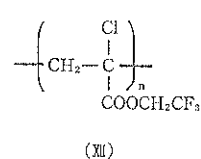
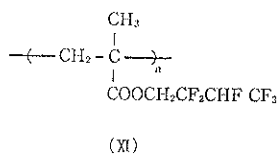
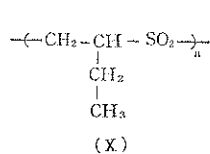
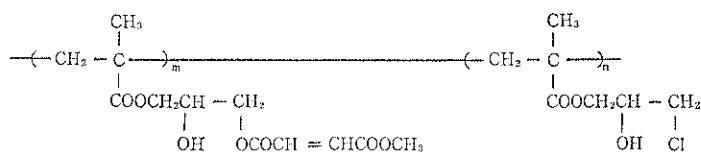
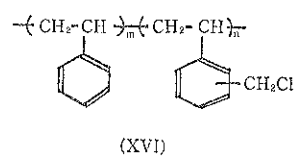
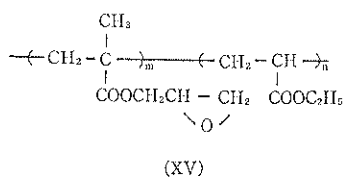


Table 2 Sensitivities of negative EB resists

Symbol	Material	Sens./ $\mu\text{C cm}^{-2}$	Ref.
COP	poly (glycidyl methacrylate-co-ethyl acrylate) (XV)	0.3	32)
PGMA	poly (glycidyl methacrylate) (VI)	0.8	33)
CMS-EX	chloromethylated polystyrene (XVI)	4	34)
SEL-N	copolymer of methyl methacrylates (XVII)	0.3	35)



最近は、平行性が良く大出力密度が得られるシンクロトロン放射光 (SOR) を線源としたリソグラフィが研究されており³⁹⁾、次の世代のパターン転写の重要技術として期待されている。

6. 集束イオンビームリソグラフィ

EB リソグラフィで大きな問題となる後方散乱は線源としてイオンビームを用いることにより軽減できる。また、イオン照射により発生する二次電子の平均エネルギーは EB 照射の場合より低く、近接効果を事実上なくすることができるため、解像性が向上する。また、イオンビームに対するレジストの阻止能が大きいため、見かけの感度が高くなる。最近、 Be^{2+} イオンを用いて PMMA に 16 nm のパターンを描画した結果が報告された⁴⁰⁾。

この方法のもう一つの特徴は、直接エッチング、イオンインプランテーション、イオンビームアシストエッチング等が可能なことである。イオン源をはじめ、まだ多くの研究・開発を必要とするが、将来はレジストを全く用いないデバイス製造技術を実現できる可能性があり、夢の多い技術である。

7. おわりに

以上、レジスト材料を中心にして、リソグラフィ技術の概要を述べた。この技術は電子工業における中枢技術であり、その要求は益々高度化すると考えられる。リソグラフィは高度な複合技術であり、その構成要素が一つでも欠けると機能しなくなる。例えば、露光装置がいかに進歩しても、それにふさわしいレジストがなければ実用化は不可能である。従って、今後共に、露光システム、レジストおよびプロセス技術を調和した形で進歩させることが極めて重要である。

最近、リソグラフィのプロセスをドライ化する研究が進展している。これに関しては本誌に優れた解説^{41,42)}があるので、ここでは述べなかった。また、紙面の都合上、レジストは有機物に限定した。これ以外に、無機レジストが知られており、これについても詳細な報告⁴³⁾があるので、これを参照していただきたい。

文 献

- 1) T. Iwayanagi, M. Hashimoto, S. Nonogaki, S. Koibuchi, and D. Makino: *Polymer Eng. Sci.*, **23**, 935 (1983).
- 2) B. J. Lin: *J. Vac. Sci. Technol.*, **12**, 1313 (1975).
- 3a) 中根靖章, 津守利郎, 三船忠良, 吉良健裕, 百瀬克己, 加納一郎: 第 25 回応用物理関係連合講演会予稿集 (1978) p. 322 (30a-M-1).
- 3b) 吉良健裕: 第 17 回半導体・集積回路シンポジウム講演論文集 (電気化学協会, 1979) p. 72.
- 4) 加納一郎, 百瀬克己: 第 16 回半導体・集積回路シンポジウム講演論文集 (電気化学協会, 1979) p. 84.
- 5) 岩松誠一, 朝波健一: 第 17 回半導体・集積回路シンポジウム講演論文集 (電気化学協会, 1979) p. 78.
- 6) S. Iwamatsu and K. Asanami: *Solid State Technol.*, **23**, No. 5, 81 (1980).
- 7) K. Jain, C. G. Willson, and B. J. Lin: *Electron Device Lett.*, **EDL-3**, 53 (1982).
- 8) H. G. Craighead, J. C. White, R. E. Howard, L. D. Jackel, R. E. Behringer, J. E. Sweeney, and R. W. Epworth: *J. Vac. Sci. Technol.*, **B-1**, 1186 (1983).
- 9) 小峰 孝, 中村洋一: *電子材料* **18**, No. 10, 40 (1979).
- 10) 三村義昭, 大久保高志, 竹内辰男, 関川京三: 第 12 回半導体・集積回路シンポジウム講演論文集 (電気化学協会, 1977) p. 54.
- 11) Y. Yamashita, K. Ogura, M. Kunishi, R. Kawazu, S. Ohno and Y. Mizokami: *J. Vac. Sci. Technol.*, **16**, 2026 (1979).
- 12) 津田 稔, 笈川節子, 中村洋一, 小原秀克, 永田英男, 横田 晃, 中根久: 第 16 回半導体・集積回路シンポジウム講演論文集 (電気化学協会, 1979) p. 78.
- 13) 今村三郎, 原田勝征, 菅原駿吾: 第 17 回半導体・集積回路シンポジウム講演論文集 (電気化学協会, 1979) p. 90.
- 14a) 岩柳隆夫, 小橋隆裕, 野々垣三郎, 松沢敏清, 堂田喜久雄, 柳沢寛: 第 20 回半導体・集積回路シンポジウム講演論文集 (電気化学協会, 1981) p. 48.
- 14b) T. Iwayanagi, T. Kohashi, S. Nonogaki, T. Matsuzawa, K. Douta, and H. Yanazawa: *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-28**, 1306 (1981).
- 15) C. Li and J. Richards: *IEDM Technical Digest* (Electron Devices Soc., IEEE, 1980) p. 412.
- 16) M. Hatzakis, B. J. Canarello, and J. M. Shaw: *IBM J. Res. Develop.*, **24**, 452 (1980).
- 17) M. Hatzakis: *J. Vac. Sci. Technol.*, **16**, 1984 (1979).
- 18a) 河津隆治, 山下吉雄, 川村和民, 大野清伍, 浅野孝輝, 小林健二, 永松元太郎: 半導体・トランジスタ研究会予稿 SSD-83-178 (電子通信学会, 1984) p. 1.
- 18b) Y. Yamashita, R. Kawazu, K. Kawamura, S. Ohno, T. Asano, K. Kobayashi, and G. Nagamatsu: *J. Vac. Sci. Technol.*, **B-3**, 314 (1985).
- 19) 例えば, 鳳紘一郎, 垂井康夫: *応用物理* **49**, 70 (1980).
- 20) D. Kyser and N. S. Viswanathan: *J. Vac. Sci. Technol.*, **12**, 1305 (1975).

- 21) T.R. Neill and C.J. Bull: *Electronics Lett.*, **16**, 621 (1980).
- 22) M. Yoshimi, M. Takahashi, K. Kawabuchi, Y. Kato, and T. Takigawa: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22**, Supplement 22-1, 179 (1983).
- 23) M. Yoshimi, K. Kawabuchi, T. Takigawa, M. Takahashi, and Y. Kato: *Electronics Lett.*, **18**, 880 (1982).
- 24) A. Charlesby: "Atomic Radiation and Polymers" (Pergamon Press, 1960) p. 335.
- 25) I. Haller, M. Hatzakis, and R. Srinivasan: *IBM J. Res. Develop.*, **12**, 251 (1968).
- 26) L.F. Thompson and M.J. Bowden: *J. Electrochem. Soc.*, **120**, 1722 (1973).
- 27) 村瀬啓, 菅原駿吾, 覚知正美, 助川 健, 今村三郎: *応用物理* **46**, 929 (1977).
- 28) T. Tada: *J. Electrochem. Soc.*, **126**, 1829 (1979).
- 29) Y. Hatano, H. Shiraishi, Y. Taniguchi, S. Horigome, S. Nonogaki, and K. Naraoka: *Proc. Symp. Electron and Ion Beam Sci. Technol.*, **78-5** (Electrochem. Soc., 1978) p. 332.
- 30) 土屋宗次, 本間正美, 松田俊介, 長谷川克衛, 浅野孝輝, 永松元太郎: 第11回半導体・集積回路シンポジウム講演論文集 (電気化学協会, 1976) p. 66.
- 31) A.W. Levine: *Polymer Eng. Sci.*, **14**, 518 (1974).
- 32) L.F. Thompson, J.P. Ballantyne, and E.D. Feit: *J. Vac. Sci. Technol.*, **12**, 1280 (1975).
- 33) Y. Taniguchi, Y. Hatano, H. Shiraishi, S. Horigome, S. Nonogaki, and K. Naraoka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18**, 1143 (1979).
- 34) S. Imamura: *J. Electrochem. Soc.*, **126**, 1628 (1979).
- 35) 越智英夫: *電子材料* **18**, No. 10, 70 (1979).
- 36) D.L. Spears and H.I. Smith: *Electronics Lett.*, **8**, 102 (1972); *Solid State Technol.*, **15**, No. 7, 21 (1972).
- 37) 例えば, 吉原秀雄, 早坂東重: *応用物理* **50**, 1211 (1981).
- 38) G.N. Taylor: *Solid State Technol.*, **23**, No. 5, 73 (1980).
- 39) 鳳紘一郎: *応用物理* **53**, 17 (1984).
- 40) 塩川高雄, 落合幸徳, 青柳克信, 金 剛 鉉, 豊田浩一, 難波 進: 第44回応用物理学会学術講演会予稿集 (1983) p. 223 (25p-T-4).
- 41) 津田 穰: *表面科学* **5**, 455 (1984).
- 42) 服部秀三: *表面科学* **5**, 445 (1984).
- 43) 吉川 昭: *応用物理* **50**, 1118 (1981).