



レジスト材料と光学素子への応用動向

小 舘 香 椎 子

日本女子大学物理学教室 〒112 東京都文京区目白台 2-8-1

(1982年12月25日受理)

Trends of Resist Materials and Their Applications for Optical Elements

Kashiko KODATE

Department of Physics, Japan Women's University,
2-8-1, Mejirodai, Bunkyo-ku, Tokyo 112, Japan

1. はじめに

フォトリソグラフィとは化学エッチングのマスクに利用される高分子感光材のことで、Kodak 社の商品名 Kodak Photo Resist から出たものでありこの材料が半導体素子製作に使われてから類似の材料まで photoresist (フォトリソグラフィ) とよばれるようになった。最近では照射光として可視光からX線までが使用されるためこれらを含めたに resist (レジスト) とよばれるようになってきた。

レジストの利用は歴史的には精密機械加工や写真製版に始まったものであるが¹⁻³⁾、IC や LSI などの製品プロセスに応用されて^{4,5)} 飛躍的な発展をとげている。また将来の光ICにむけての研究の一環として薄膜レーザ、光カプラ、ビームスプリッタ、分光素子などの光部品作成にも積極的に用いられている。これらの素子の高性能化のために最近ではサブミクロンの加工精度が望まれている。0.5 μm までの解像度の要求に対しては、紫外線 (UV)⁶⁾ とともに深紫外線 (deep UV)^{7,8)}、電子線⁹⁾、X線¹⁰⁾を用いるリソグラフィの研究開発が活発化しておりさらにイオンビームリソグラフィ法も基礎的な検討段階にある¹¹⁾。

これらのリソグラフィ技術は微細加工の中心をなすものである^{12,13)}。リソグラフィの概念を Fig. 1 に示す。一般にリソグラフィ工程は基板前処理、プリベーク、露光、現像、リンス、ポストベーク、エッチング、剥離の工程で行なわれる。レジストは各工程における使

用条件により解像度、密着性が左右され加工特性を決める重要な役割を担っているのが最適条件で使用するのが望ましい。

本稿ではレジスト材料の開発動向を紹介し、とくにレジストの広い応用分野のうちから回折格子型光学素子への開発例について概観する。さらに具体的な応用例として回折格子作成プロセスについて述べる。

2. レジスト材料の開発動向

現在微細加工用レジストは Fig. 2 に示す4種類に大別できる。以下各レジスト別に開発の動向にふれる。紙面の都合で限られたレジストにしか言及できないが、現在使用可能および開発済みのレジストに関しては一覧表にして示したので詳しくは末尾の参考文献を引用していただきたい。

2.1 UV 用レジスト

UV レジスト材料には感光により不溶化するネガタイプと逆に溶解度の増加するポジタイプがあるので両者に分けて述べる。代表的 UV レジストを Table 1 に示す。

2.1.1 ポジタイプ UV レジスト

ポジタイプで実用化されているものの多くはナフトキノジアド系のものである。露光によりアルカリ可溶性に変化する。ネガタイプに比べ密着性、耐薬品性に劣るが解像度に優れたドライエッチング技術の導入によりプロセス用として広く使用されている。またアルカリ金属類の半導体への悪影響を除去した有機アルカリ現像液²⁶⁾ (MF 現像液 (Shipley 社), NMD-3 (東京応化

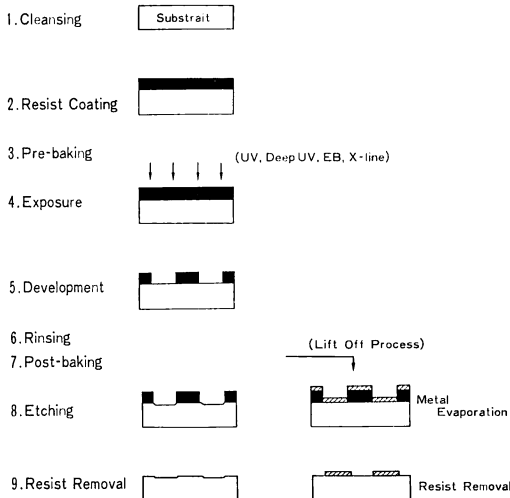


Fig. 1 リソグラフィーの概念図

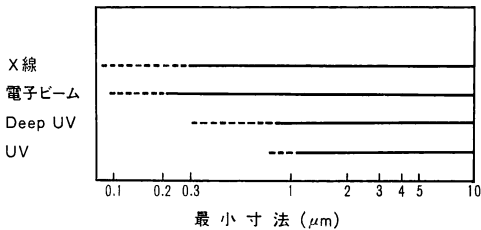


Fig. 2 各レジストの解像度

(株) など) もある。

2.2.2 ネガタイプ UV レジスト

Table 1 に示すレジストのうち KPR¹⁹⁾ はケイ皮酸残基の光二量化反応により架橋し照射部分が網状巨大ポリマーとなり不溶化する。微細化に伴い性能に限界を生じ、現在では主として印刷製版に使用されている。ポリケイ皮酸-β-ビニロキシエチル(IV)²⁴⁾ が半導体微細加工用として開発され SVR, OSR²⁴⁾ として市販されている。ゴム系ネガレジストの2~3倍の感度を持ち、接着性、耐熱性も高く1μmまでの加工実績がある²⁴⁾。ほかに環化ゴム系レジストとして KTFR^{21, 22)} がある。この種のゴム系レジストは現像の際膨潤するため2~3μm以上の高解像度が得にくかったが、近年原料ゴムの反応方法の開発や現像液の検討が進み1~2μmの実用的な解像度が得られている²⁷⁻²⁹⁾。

UV 露光法としては、ドライエッチング技術の開発とともに、1/10縮小投影露光法の開発³⁰⁾、解像度のあるポジタイプレジストを用いたレジスト表面の薬品処理³¹⁾、二層および三層構造パターンの形成^{32, 33)}、などによりサブミクロンへの可能性も生まれている²⁷⁻²⁹⁾。

2.2 deep UV レジスト

従来の UV リソグラフィーより短波長の200~300nmを使用し回折現象の軽減、解像度の向上をはかる deep UV リソグラフィー法が提案され⁷⁾実用化の検討が進め

Table 1 代表的な UV レジスト

レジスト	タイプ	感度 (mJ/cm ²)	解像度 (μm)	メーカー	備考	文献
AZ 1350	P	3×10 ⁻⁶	1~0.6	Shipley	高感度	6, 14, 17
AZ 1350 J	P			"		14, 15, 17
AZ 1350 B	P			"		16, 17
AZ 111	P	3.1×10 ⁻⁶		"		18
OFPR-77	P			東京応化		18
OFPR-800	P		1	"		18
OMR-81	N			"		18
OMR-83	N			"		18
OMR-83-SR	N			"		18
KPR	N	5×10 ⁻⁶		Kodak		19
Kodak Microresist 747	N			"		20
KTFR	N	2×10 ⁻⁵	1	"		21, 22
KMER	N			"		21, 22
Waycoat-Type 3	N			Hunt Chem.		
Waycoat IC	N			"		
CBR-M	N		1.6	日本合成ゴム	耐熱性	23
SVR	N		1	東京応化	高感度	24
OSA	N		1	"	"	24
PDP	N		2		ドライプロセスレジスト	25

Table 2 代表的な deep UV レジスト

レジスト	タイプ	感度 (J/cm ²)	解像度 (μm)	メーカー(開発)	備考	文献
PMMA	P	0.5~0.6	0.25	(IBM)		7, 8, 36, 37
P(M-OM-CN)	P	0.03	0.75	(通研)		36
P(M-OM)	P	0.08		"		36
P(MMA-MA)	P	0.7		"		8, 38
FBM	P	0.094	0.3	"		8, 39
PBS	P	5		"		8, 40
PMIPK (ODUR 1010)	P		0.5	東京応化		41
(ODUR 1013)	P		0.5	"		41
(ODUR 1014)	P			"		41
AZ 2400	P		0.4~0.8	Shipley		29, 37
AZ 1350 J	P			"		34, 37
GCM-06	P	0.25	<1	(沖電気)	高感度	42
MRS-1	N		0.38	(日立)	耐ドライエッチ	43, 44, 45
White resist	N	0.01	1	(超LSI共同研)	高感度	34
ODUR-110 WR	N			東京応化	"	45
ODUR-120	N			"		45

られている^{8,34,35)}。Table 2に代表的な deep UV レジストを示す。

2.2.1 ポジティブ deep UV レジスト

電子線レジストでもある PMMA^{36,37)} や PMIPK^{18,41)} が主流を占めている。電子線レジストは 340 nm 以下の短波長紫外線も吸収し励起状態から遷移し主鎖切断を起こして露光部が溶解する。高解像度を示すが感度は低い。PMIPK (ODUR 1010) に増感剤を添加した増感 PMIPK が開発され PMMA の 5 倍の感度向上がはかられた⁴¹⁾。さらにドライエッチ耐性の欠点を補い解像度向上をはかるため、deep UV 照射後、現像を高周波プラズマ中で行なうドライプロセスをとり入れ 0.5 μm ラインを転写した報告例などもある^{46,47)}。

2.2.2 ネガティブ deep UV レジスト

ネガティブレジストはいずれも感度が低い。電子線レジストである PGMA は deep UV 光に対し主鎖が切断しポジティブになるので、エポキシ基を残したままケイ皮酸を付加しネガティブとして使用する考案もある⁴⁸⁾。実用レジストとしてはゴム系の ODUR-110 WR やフェノール樹脂系 ODUR-120 が市販され高感度、下地との密着性向上という利点を持つがポジティブに比べ解像度が低い⁴⁵⁾。フェノール樹脂とアジド化合物を主成分とする MRS は AZ 系レジストと同じプロセス処理で強い吸収を持つため定在波が立ちにくく鋭い断面形状を示す⁴⁴⁾。また膨潤もなく高感度で 0.38 μm のライン幅を解像した報告⁴³⁾ などがある。deep UV リソグラフィーの実用化のためには、高輝度光源の開発とともにこれら

レジストのいっそうの改良進展が必要である。

2.3 電子線レジスト

電子線リソグラフィに使用される電子線エネルギーは 5~30 keV である。電子線照射により誘起される化学反応によりレジストが可溶性や不溶性になる。この範囲は光化学反応を起こす物質範囲より広いので、初期には UV レジストが感光材として使用されていた⁴⁹⁻⁵¹⁾。ただしこれらは低感度で実用性を欠くため専用の高感度電子線レジストの開発が行なわれている。Table 3 に代表的電子線レジストを示す。

2.3.1 ポジティブ電子線レジスト

ポジティブのうち早くから使用されていたのは PMMA⁵²⁾ である。このレジストは 0.1 μm までの高解像力と耐エッチング性、入手容易などの利点を持っている。しかし実用的には低感度であり、高感度材料の開発が進められている。大部分は Table 3 に示すように PMMA の誘導体メチルメタクリレート⁵³⁾の共重合体である。EBR-9 は PMMA の α 位を塩素原子に置換し、側鎖のメチルエステル部をトリフルオロエチルに置換したもので PMMA の 100 倍の感度を持つ⁵²⁾。その他 Bell 研では、高感度レジスト PBS を開発し⁵⁴⁾、また熱処理をしてあらかじめ不溶化しておくレジスト⁵⁵⁾などすでに実用段階に達した電子ビームリソグラフィーに対してレジストの開発研究が相ついで行なわれている。

2.3.2 ネガティブ電子線レジスト

一般にポジティブに比べ感度が高くコントラストは低い。放射線架橋タイプが用いられ、エポキシ基を持つも

Table 3 代表的な電子線レジスト

レジスト	タイプ	感度 (C/cm ²)	解像度 (μm)	メーカー(開発)	備考	文献
PMMA	P	50	0.6	(IBM)	高解像度	51, 52
FBM-110	P	0.4	0.3	ダイキン工業(通研)		53
FMR-101	P	0.2		富士薬品工業		54
OEBR-1030	P	5		東京応化(日立)		5
PBS	P	12	0.5	Meed (Bell 研)		55
POS	P	15				56
MPR-1	P	4	0.13	(松下電器)	高解像度	57
-MAC	P	5	0.2	(通研)		58
EBR-1-U	P	0.8	0.3	(超LSI共同研)		59
EBR-9	P	0.8	0.1	"	高解像度	60
CP-3	P	0.4	0.3	"	耐ドライエッチ良	61
CNR	N	0.09	0.6	"		
DER (PGMA-CO-EA)	N	0.1	0.2	"		62
COP	N	0.6	0.5	Meed (Bell 研)		63
OEBR-100	N		0.25	東京応化(日立)		64
SEL-N	N	0.3	0.3	リマール工業(日電)		
CMS	N			東洋曹達(通研)	耐ドライエッチ良	65
AZ 2415	N	175	0.5	Shipley		66
M-CMS	N	3.9	0.7			67

Table 4 代表的なX線レジスト

レジスト	タイプ	線源	感度 (mJ/cm ²)	解像度 (μm)	メーカー(開発)	備考	文献
PMMA	P	Al	600~20,000	0.1	(IBM)	高解像度	72
FBM	P	Mo	52	0.3	(通研)		53
PBS	P	Pd	94	0.5	Meed (Bell 研)		55
EBR-1	P	Al	34	0.3			54
FPM	P	Mo	64	0.5			
P(MMA-DMM)	P	Al	7	0.5		高感度	5
COP	N	Pd	175	0.5	(Bell 研)	後重合大	63
DCPA	N	Pd	7	1.0	(Bell 研)		70
DCOP	N	Pd	15	0.8			70
EK-88	N	W	9	0.5			73
XR-79	N	Al	2	0.5			74
PDBA	N	Al	1.5	0.5		高感度	5

のとして PGMA があり 0.25 μm の高解像度を示している⁶⁴⁾。また耐ドライエッチ性の高い CMS⁶⁵⁾ なども開発されている。

2.4 X線レジスト

X線リソグラフィは波長の短い軟X線 (0.4~4nm) を利用するため回折、干渉効果を見ることができ、基板からの後方散乱も少なく高解像度を得ることができる。集束光学系の作成が困難なため点光源として利用しX線をターゲットに照射し励起による低電子線でレジストに化学反応を起こす。初期の研究では電子線レジストを用いた

が^{68,69)}、エネルギー密度が高くないのと、炭素、水素、酸素、窒素から成る有機物のX線吸収率が小さいため金属やハロゲンを導入した独自のX線レジストの開発が活発化している⁷⁰⁾。Table 4 に代表的なX線レジストを示す。

2.4.1 ポジタイプX線レジスト

電子線レジストである PMMA は Al 線源で 2J/cm² の感度を示す⁵⁾。さらにこの PMMA に ZnI₂ を混入したレジストは混入量の増加とともに高感度を示す⁷¹⁾。またX線照射前後の溶解度差が大きい P(MMA-DMM)

は高感度とともに高解像度も持っている⁵⁾。

2.4.2 ネガタイプX線レジスト

Cop は電子線レジストとして開発されたが Pd 線源, Al 線源で, 175 mJ/cm^2 , 20 mJ/cm^2 の高感度を示す⁶³⁾。その他側鎖に臭素元素を持つ PDBA⁵⁾ や高感度レジスト EK-88⁷³⁾ の開発などが行なわれている。

高解像度の微細加工を可能にするため, レジストの高性能化とは別に多層構造の利用⁶¹⁾やドライ現象^{46,70)}などのプロセスの工夫も行なわれている。

以上のような有機高分子レジスト材料のほかに $\text{AS}_2\text{-S}_3$, Se-Ge などのカルコゲン非晶質材料が無機レジスト^{75,76)}として提案されている。この無機レジストは高解像力と多機能性を持ち, 多層構造, ドライ現象などのプロセスへも適用可能な新しいレジスト材料である。

3. レジストを用いた回折格子型光学素子の開発動向

3.1 回折格子型光学素子の種類

レジストを用いた回折格子型光学素子を **Table 5** に示す。

このうち分散素子用回折格子は商品化され広く用いられている。回折格子は従来主に機械的刻線法とレプリカ技術により作成されていた。近年レーザー光学の発展に伴い, ホログラフィック法によりレジスト上に質の良い平面, 凹面あるいはブレース格子などが作成されている⁹⁰⁻⁹⁵⁾。また分散素子以外の光エレクトロニクスデバイスとしては **Fig. 3**, **Fig. 4** に示すようなものが検討されている。**Fig. 3** に示した回折格子型光多重分波器は, 屈折率分布型レンズの一端面に回折格子を形成し他の端面に入出力用光ファイバーを固着一体化した $1.3 \mu\text{m}$ 帯半導体レーザー光5波用分波回路で, 小型でかつ大きな多重度を取れる特徴を持っている⁷⁹⁾。**Fig. 4** は光導波路用グレーティングレンズの模式図⁹⁶⁾である。たとえばパイレックスガラス基板上にガラスを RF スパッタしてリソグラフィ法などで作成する。これらは光スペクトルアナライザへの応用などが考えられている。

これら光学素子に適用する場合のレジストに対する要求は LSI 用レジストへの要求より厳しいものがある。

(1)高感度, (2)高解像度, (3)高コントラスト, (4)特性の直線性, (5)耐プラズマ性, 耐熱性の良さ, (6)密着性が高く耐エッチング性の良さ, (7)プロセスにおける高許容度, などがあげられる。

現在市販されている商品中では上記要因を完全に具備するレジストはなく光学素子の高性能化のためにはレ

Table 5 レジストを用いた回折格子型光学素子

レジストを用いた回折格子型光学素子	文 献
光 導 波 路	77
光 合 波 分 波 器	78, 79
光 ス イ ッ チ	80
光 フィ ル タ ビーム ス プ リ ッ タ	81, 82, 83
光 結 合 器	84
フ ォ ト カ プ ラ	85
反 射 器	86, 87
集 光 レ ン ズ	88, 89
分 散 素 子	90
光 ピ ッ ク ア ッ プ レ ン ズ	91

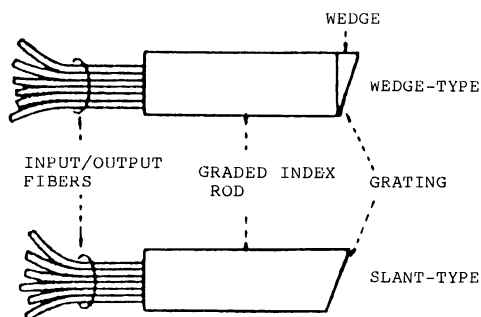


Fig. 3 回折格子型光多重分波器⁷⁹⁾

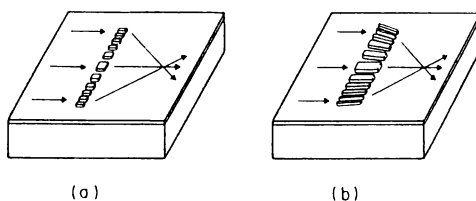


Fig. 4 光導波路用グレーティングレンズ模式図⁹⁶⁾

ジストの新たな開発研究が必要である。

3.2 レジスト回折格子の作成例

光学素子としての回折格子の作成を目標に筆者らは過去数年間にわたって各種レジストを用いてきた。そのうちからいくつかの実験例をここに紹介する。レジストの使い方の参考にできれば幸いである。

3.2.1 ホログラフィック格子の作成と空間分解能

ホログラフィック法で微細格子を作成するためレジストのレリーフ形成の機構を明らかにすることを試みた⁹⁷⁾。露光用光源として He-Cd レーザーの 4416 \AA の波長を用い AZ 2400 レジスト上にホログラフィック格子を作成しその断面形状の SEM 観察により現像溶解過程の進行に伴い溝の深さが減少する傾向と溝形成の正弦波状からのずれが生じるのを見出した (**Fig. 5(a)**)。

この現象は

$$\frac{\partial z}{\partial t} = c(x) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)^2}$$

ただし $c(x)$ は溶解度係数

で示される2次元モデルを用いた計算機シミュレーションと一致する(Fig. 5(b)). 従来格子ピッチを $1\mu\text{m}$ 以下にするとホログラフィック回折格子は必ず急激な回折効率の低下を生じこれに対する周波数はレジスト固有の値として空間遮断周波数とよばれてきた⁹⁸⁻¹⁰⁰. しかし AZ 2400 レジストがステップ露光において $0.2\mu\text{m}$ 以下の鋭い立上り幅を持つことから⁹⁷, 微細格子の回折

効率の減少は主に現象過程におけるサイドエッチング効果¹⁴⁾として理解できる. この減少をさけ高効率微細ホログラフィック格子を作成する方法として前露光による最適現象時間の制御¹⁰¹⁾ や同時露光現象法^{102,103)}の検討がある. しかし $0.25\mu\text{m}$ 以下のピッチの格子作成はホログラフィック法では困難であるという報告もある¹⁰⁴⁾.

3.2.2 deep UV リングラフィー法を用いた微細格子の作成

光学的手法によるレジスト格子のピッチの微細化の方向として従来の UV 露光法の延長上にあり波長 200nm 以下の短波長光源を用いた deep UV リングラフィー法

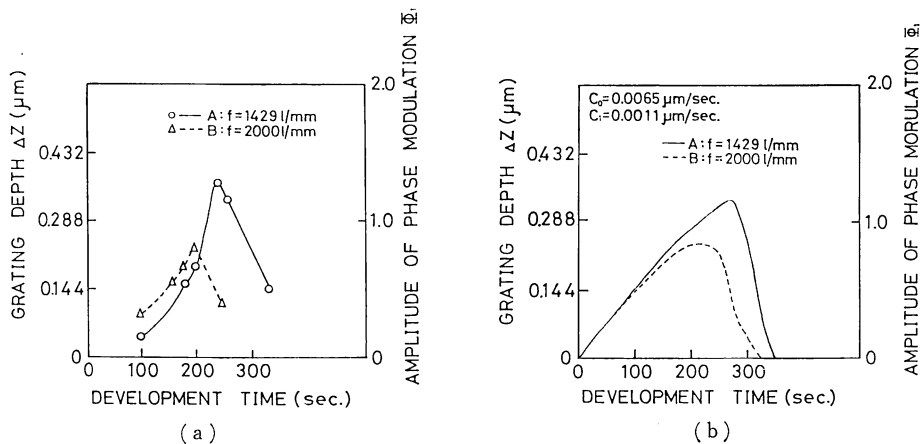


Fig. 5 微細ホログラフィック格子の現象時間に依存した位相変調振幅と格子みぞの深さ
 (a) 実験結果: ϕ_1 の値は SEM 観察より算出,
 (b) 数値解析結果.

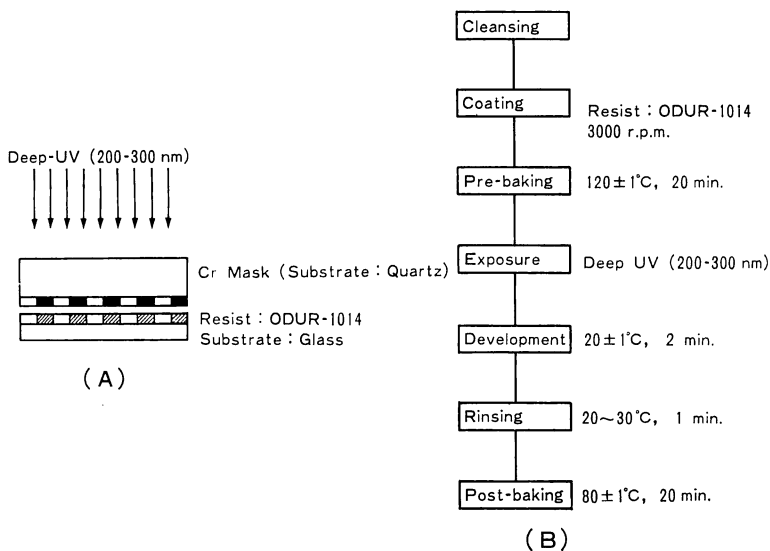
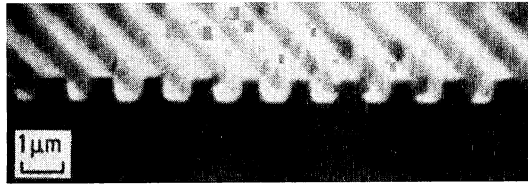


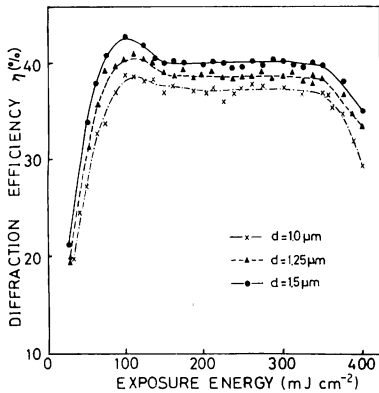
Fig. 6 deep UV リングラフィーの作成プロセス
 (a) deep UV 露光配置
 (b) deep UV リングラフィー作成工程

が高感度メタクリル樹脂系レジスト材の利用などからも有望であると考え検討を加えた¹⁰⁵⁾。Fig. 6 に示す作成工程条件により電子ビーム描画 Cr マスクを用いレジスト ODUR 1014 上に微細格子(格子ピッチ, 1.0, 1.25, 1.5 μm) を作成した。

Fig. 7 に作成格子の断面形状, 垂直入射条件下における露光量に依存した回折効率の値を示す。この方法で作成した格子は ±1 次光で 90% 近い高効率を示すアスペクト比の高いラメラ格子で, 中間領域において Bragg 角から著しくはずれた入射角に最大効率が現われ,



(a)



(b)

Fig. 7 (a) 作成格子の断面形状 (SEM 観察) レジスト厚: 0.62 μm, 露光量: 100 mJ/cm², 1 次回折効率 (λ=632.8 nm): 41.2%. (b) 1 次回折回折効率の露光量依存性 (垂直入射) (λ=632.8 nm).

また極大値が二つ以上の入射角に出現するなど従来の Raman-Nath 回折理論では説明しにくい入射角特性を示すことがわかった。この電子ビーム描画によるマスク作成と deep UV リソグラフィーとの組合せは高効率微細格子の新しい作成法として再現性のある有効な方法である。

3.2.3 電子ビームリソグラフィー法による非周期格子の描込み実験

光エレクトロニクスの急速な発展に伴い小型・高性能な新型素子の開発が盛んになっている。これらの目的のため従来の周期格子から非周期や曲線の回折格子の作成の必要性が生まれている。そのうち高効率マイクロフレネルレンズの作成法として 3.2.2 で記述した電子ビーム描画と deep UV リソグラフィー法の組合せが設計作成の自由度の大きい方法であると考えられる。卓上型ミニ SEM を改良した電子ビーム描画でレジスト PMMA 上に NA=0.42, 最小ライン幅 0.67 μm のマイクロフレ

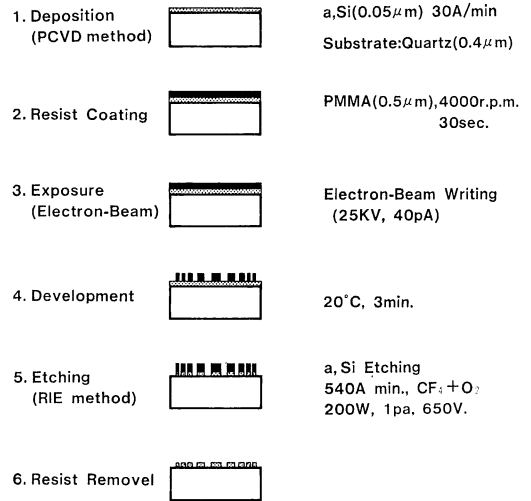
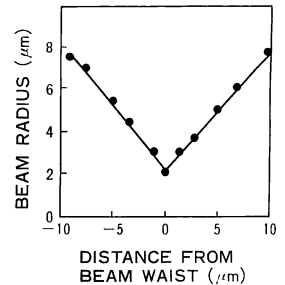


Fig. 8 電子ビームリソグラフィー描画工程



(a)



(b)

Fig. 9 (a) 転写リニアフレネルレンズの断面形状 (deep UV リソグラフィー法) (b) 転写リニアフレネルレンズの結像スポット径

ネルレンズマスクの試作を試みた¹⁰⁶⁾。Fig. 8 に作成工程を示す。この試作マスクを用い転写したレンズの断面形状写真を Fig. 9(a) に示すが、この転写レンズによる結像スポット径はナイフエッジ法を用いた測定で 2 μm であった (Fig. 9(b))。

4. む す び

以上示したようにレジスト材の開発はめざましく、サブミクロン領域の微細加工が自由に行なえるようになってきた。これを利用した回折格子型光学素子作成の研究動向を紹介したが今後の発展の余地はきわめて大きいものと期待される。

終りに本稿を執筆する機会をお与えくださり種々ご助言をいただいた東大工学部神谷武志助教授に感謝いたします。

文 献

- B. E. Tory: *Photolithography* (Horwitz, 1957).
- P. Eisler: *The Technology of Prited Circuits* (Heywood, 1959).
- W. S. Forest: *Photoresist* (McGraw-Hill, 1975).
- 榎岡清威, 二瓶正志: フォトエッチングと微細加工 (工学図書, 1977).
- 垂井康夫: 超 LSI 加工 (オーム社, 1982).
- F. H. Dill: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-22** (1975) 440.
- B. J. Lin: J. Vac. Sci. Technol., **12** (1975) 1317.
- 三村義昭: 応用物理, **47** (1978) 223.
- 中山 了, 早坂東亜: 応用物理, **46** (1977) 758.
- D. L. Speas & H. I. Smith: Electron. Lett., **8** (1972) 102.
- 吉田和衛: 電子通信学会誌, **65** (1982) 860.
- 榎岡清威: エレクトロニクスの精密微細加工 (総合電子出版社, 1980).
- M. J. Bowden & L. F. Thompson: Solid State Technol., **22** (1979) 72.
- F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge & J. M. Sballn: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-22** (1976) 445.
- F. H. Dill & J. M. Shaw: IBM. J. Res. Dev., **21** (1977) 210.
- A. C. Livanos, A. Katzir, J. B. Shellan & A. Yariv: Appl. Opt., **16** (1977) 1633.
- D. J. Elliott & M. A. Hockey: Solid State Technol., **5** (1979) 53.
- 小峰 考, 中村洋一: 電子材料, **18** (1979) 40.
- E. M. Robetso, W. P. van Dauser & L. M. Minsk: J. Appl. Polym. Sci., **2** (1959) 302.
- J. Frejlich & J. J. Chair: J. Opt. Soc. Am. **67** (1977) 92.
- E. Froschle & R. Backhus: Solid State Electron., **14** (1971) 95.
- R. F. H. Thornley & T. Sun: J. Electrochem. Soc., **112** (1965) 1151.
- 渡辺 徹: 電子材料, **17** (1978) 118.
- M. Kato & H. Nakane: Photogr. Sci. Eng., **23** (1979) 207.
- N. Smith: *Proc. of the 2nd Symp. on Dry Process.*, Oct. (1980) p. 71.
- IBM Tech. Discl. Bull., **13**, No. 17 (1970).
- D. A. Doane: Solid State Technol., **23** (1980) 101.
- K. L. Tai: J. Vac. Sci. Technol., **17** (1980) 1170.
- J. H. Bruning: J. Vac. Sci. Technol., **17** (1980) 1147.
- 長谷川昇雄, 柳沢 寛: 第 43 回応物学会予稿集 (1982) p. 359.
- M. Matzakakis: IBM J. Res. Dev., **24** (1980) 452.
- K. L. Tai, L. F. Tohnson, D. W. Murphy & M. S. C. Chung: *Extended Abstracts of 157th E.C.S. Meeting*, **79-1** (1979) p. 244.
- J. M. Moran & D. Maydon: J. Vac. Sci. Technol., **16** (1979) 1620.
- S. Iwamatsu & K. Asanami: Solid State Technol., **23** (1980) 81.
- 吉田和衛: 電子通信学会誌, **61** (1979) 888.
- E. A. Chandroso, E. Reichmanis, C. W. Wilkeno, Jr. & R. L. Hartless: Solid State Technol., **24** (1981) 81.
- B. J. Lin: J. Electrochem. Soc., **127** (1980) 202.
- B. J. Lin: IBM J. Res. Dev., **20** (1976) 213.
- 三船忠良, 中根靖章, 津守利予, 平野興治: 第 7 回境界領域における電気化学セミナー予稿集 (1977) p. 1.
- M. Feldmann, D. L. White, E. A. Chandroso, M. J. Bowden & J. Appelbaum: *Kodak Microelectronics Seminar Proceedings*, Monray, Calif., Oct. (1975) p. 40.
- M. Tsuda, S. Oikawa, Y. Nakane, H. Nagata, A. Yokota, H. Nakane, T. Tsumori & T. Mifune: Photogr. Sci. Eng., **23** (1979) 290.
- Y. Yamashita, K. Ogura, M. Kunishi, R. Kawano, S. Ohno & Y. Mizakami: J. Vac. Sci. Technol., **16** (1979) 2026.
- T. Matsuzawa & H. Tomioka: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-28** (1981) 1284.
- T. Matsuzawa & H. Tomioka: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-28** (1981) 1306.
- 小峰 考, 中村洋一, 市川 進, 金井 渡: 電子材料, **20** (1981) 173.
- M. Tsuda, S. Oikawa, W. Kanai, A. Yokota, I. Hijikawa, A. Uehara & H. Nakane: J. Vac. Sci. Technol., **19** (1981) 259.
- 津田 穰, 横田 晃, 柏木健一, 金井 渡, 笈川節子, 中根 久: 第 43 回応物学会予稿集 (1982) p. 218.
- 津田 穰, 中村洋一: 第 16 回半導体集積回路技術シンポジウム (1979).
- 伝田精一: 応用物理, **36** (1967) 544.
- K. D. Perkins & R. Bennett: *Kodak Photoresist Seminar Proc.*, **II** (1968) p. 39.
- B. Broyde: J. Electrochem. Soc., **116** (1969) 1241.
- I. Haller, M. Hatzakis & S. Srinvason: IBM J.

- Res. Dev., **12** (1968) 251.
- 53) K. Murase, M. Kakuchi & S. Sugawara: *Proc. Int. Conf. Microlithography*, Paris (1977) p. 261.
- 54) T. Tada: *J. Electrochem. Soc.*, **126** (1979) 1635.
- 55) M. J. Bowder & L. F. Thompson: *J. Appl. Polym. Sci.*, **17** (1973) 3211.
- 56) L. F. Thompson & M. J. Bowder: *J. Electrochem. Soc.*, **120** (1973) 1722.
- 57) 日比野邦男, 竹山健一, 森本考克, 松浦静也, 小西文弥: 第11回理研シンポジウム, イオン活入とサブミクロン加工 (1980) p. 207.
- 58) K. Harada, O. Kogure & K. Murase: *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-29** (1982) 518.
- 59) 加藤博久: 第17回半導体集積回路技術シンポジウム (1979).
- 60) T. Tada: *Extended Abstracts of 154th E.C.S. Meeting*, **78-2** (1978) p. 475.
- 61) 佐伯英夫: 第17回半導体集積回路技術シンポジウム (1979).
- 62) H. Kato: *Extended Abstracts of 158th E.C.S. Meeting*, **80-2** (1980) p. 831.
- 63) L. F. Thompson, E. D. Feit & R. D. Heidenrich: *Polym. Eng. Sci.*, **14** (1974) 529.
- 64) Y. Hatano, H. Morishita & S. Nonogaki: *Am. Chem. Soc., Div. Org. Coat. Plast. Chem.*, **35** (1975) 258.
- 65) 山尾達彦, 枕谷敦広, 新地 巧, 戸所義博: 第43回応物学会予稿集 (1982) p. 520.
- 66) 吉見 信, 高橋 稔, 川淵勝弘: 第28回応物学会予稿集 (1981) p. 366.
- 67) 今村三郎, 菅原駿吾: 通研研究実用化報告 (1982) p. 1897.
- 68) L. F. Thompson, E. D. Feit, M. J. Bowder, P. V. Lenzo & E. G. Spenor: *J. Electrochem. Soc.*, **121** (1974) 1500.
- 69) J. S. Greeneich: *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-22** (1975) 434.
- 70) G. N. Taylor: *Solid State Technol.*, **23** (1980) 73.
- 71) 島崎有造, 加藤博久: 第39回応物学会予稿集 (1978) p. 94.
- 72) R. Feder, E. Spiller & J. Topalian: *J. Vac. Sci. Technol.*, **12** (1975) 1332.
- 73) W. D. Buckley & G. P. Hughes: *J. Electrochem. Soc.*, **128** (1981) 1106.
- 74) G. A. Wardly, E. Munro & K. W. Scott: *Proc. Int. Conf. Microlithography*, Paris (1977) p. 217.
- 75) 吉川 昭: 応用物理, **50** (1981) 1118.
- 76) Y. Handa, T. Suhara, H. Nishihara & J. Koyama: *Opt. Lett.*, **5** (1980) 309.
- 77) 布下正宏, 内藤初彦, 野村良徳, 西 和郎, 大村由和: 電気通信学会論文集 (c) J60-c, **10** (1977) 610.
- 78) R. Ulrich & R. Zengerle: *Tech. Dig. Integrated and Guided-Wave Opt.*, IEEE, New York, 1-4 (1980).
- 79) K. Kobayashi & M. Seki: *IEEE J. Quantum. Electron.*, **QE-16** (1980) 11.
- 80) T. H. Suhara & J. Koyama: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **176** (1979) 48.
- 81) C. S. Hong, J. B. Shellen, A. C. Livanos, A. Yariv & A. Katzir: *Appl. Phys. Lett.*, **31** (1977) 276.
- 82) A. Katzir, A. C. Livanos, J. B. Shellen & A. Yariv: *IEEE J. Quantum. Electron.*, **QE-13** (1977) 296.
- 83) H. Kotani, M. Kawabe & S. Nanba: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18** (1979) 279.
- 84) A. Katzir, A. C. Livanov & A. Yariv: *Appl. Phys. Lett.*, **30** (1977) 225.
- 85) F. Auracher & H. H. Witte: *Appl. Opt.*, **16** (1977) 2195.
- 86) H. Nishihara, Y. Harada, T. Suhara & J. Koyama: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **239** (1980) 134.
- 87) P. K. Tier: *Opt. Lett.*, **1** (1977) 64.
- 88) P. R. Ashley & W. S. C. Chang: *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978) 490.
- 89) G. Hatakoshi & S. Tanaka: *Opt. Lett.*, **2** (1978) 142.
- 90) 波岡 武, 野田英行: 光学, **3** (1974) 25.
- 91) 小島千秋, 大木 裕: 光学, **10** (1981) 425.
- 92) 永田 浩: 応用物理, **47** (1978) 992.
- 93) 波岡 武: 応用物理, **45** (1976) 655.
- 94) 青柳克信, 難波 進: 応用物理, **45** (1976) 657.
- 95) M. C. Hutley: *Opt. Acta*, **22** (1975) 1.
- 96) 波多腰玄一: 光学, **11** (1982) 338.
- 97) K. Kodate, T. Kamiya, H. Takenaka & H. Yanai: *Jpn. J. Appl. Phys., Suppl.*, **17** (1978) 121.
- 98) A. Bartolini: *Appl. Opt.*, **13** (1974) 129.
- 99) S. Austin & F. T. Stone: *Appl. Opt.*, **15** (1976) 1071.
- 100) S. Austin & F. T. Stone: *Appl. Opt.*, **15** (1976) 2120.
- 101) F. Iwata & J. Tsujiuchi: *Appl. Opt.*, **13** (1974) 1327.
- 102) T. W. Tsang & S. Wang: *Appl. Phys. Lett.*, **24** (1974) 196.
- 103) T. W. Tsang & S. Wang: *Appl. Phys. Lett.*, **24** (1974) 519.
- 104) L. F. Johnson, G. W. Kammlatt & K. A. Ingersoll: *Appl. Opt.*, **17** (1978) 1165.
- 105) K. Kadate, T. Kamiya & H. Takenaka: *Opt. Quant. Electron.*, **14** (1982) 85.
- 106) 小館香椎子, 竹中はる子, 神谷武志: 第13回画像工学コンファレンス, 5-3 (1982) p. 109.