

# 解説

## 高密度光ディスクプロセス

飯田 哲哉

パイオニア(株)総合研究所ディスクシステム研究部 〒350-02 鶴ヶ島市富士見 6-1-1

(1994年1月31日受理)

### High Recording Density Optical Disc Mastering

Tetsuya IIDA

Corporate Research and Development Laboratory, Pioneer Electronic Corporation,  
6-1-1, Fujimi, Tsurugashima 350-02

#### 1. はじめに

従来より光ディスクには半導体プロセスと同様、フォトレジストを使ったリソグラフィ手法が用いられてきた。これらふたつのプロセスの間には共通点もあるが異なる点も多くみられ、プロセス材料、装置に求められる特性は大きく異なるものとなっている。そのため、半導体集積回路の製造工程で用いられる高密度化技術がそのまま高密度光ディスクプロセスに適用できるわけではない。本稿では、高密度光ディスクプロセスを進めるにあたり半導体プロセスとの相違点を明確にしつつ、用いられる材料および装置に必要なとされる諸特性について考察していきたい。

#### 2. 半導体プロセスと光ディスクプロセス

##### 2.1 半導体プロセス

半導体製造工程における光ディスクプロセスは主に集積回路のパターンを形成するために行われ、回路を完成させるため10数回にわたり、繰り返し行われる。図1に簡略化したリソグラフィ工程を示す<sup>1)</sup>。これはp型シリコンの一部に表面からn型不純物(ドナー)であるリンを拡散させpn接合ダイオードをつくり、アルミニウム配線を接続する場合の例である。この例では、フォトレジストにネガ型が用いられ、露光は光学系にレンズを用いた投影露光装置でステップアンドリピート露光が行われる。

現像には、無機アルカリによる金属イオンの残留を避けるため、TMAHなどの有機アルカリが用いられ、パドル方式で行われる。

現像後、湿式または乾式によりエッチングを行うとフォトレジスト膜はエッチングに対する保護膜として働き、フォトレジストに覆われていない部分が除去される。この状態からリンを含んだ雰囲気中で加熱処理を行うことによりn型領域を形成し、結果としてpn接合が形成される。その後は、同様の工程を繰り返しアルミニウム配線が形成される。

以上がフォトレジストを用いた半導体プロセスの例である。

##### 2.2 光ディスクプロセス

光ディスク製造工程におけるリソグラフィは、射出成形により光ディスク基板を得るためのスタンプ(マスター)を作製するために行われ、マスタリングとも呼ばれる。図2にその概略を示す。

フォトレジストにはポジ型が用いられ、厚さは信号再生時にピットまたはグルーブ深さが読出し光の波長で位相差を生じるよう設定され、通常100nm前後である。これはフォトレジストをエッチング時のマスクとして用いる半導体プロセスと比べ、1/5~1/10の値である。また光ディスクは、大きいものでは直径が30cmあり、マスタリング時にはそれ以上の大きさにわたって欠陥がなく一様にフォトレジスト層が形成される必要がある。露光装置にはレーザービームレコーダ(以下LBRと省略する)が用いられる。LBRの概観を図3に示す。LBRの対物レンズはNAが0.9程度と大きく、焦点距離が短く焦点深度も浅い。また、光ディスクではピット深さおよびフォトレジスト表面の形状が信号の質に影響を与える。そのためフォトレジスト層には、100nm程度の膜厚で表面の平滑性と膜厚の均一性が要求される。

現像液は無機系, 有機系どちらでもよく, スピン方式で行われることが多い。

現像, ポストベーク後には表面に導電化処理が施され, 電鍍によってニッケルのスタンプが作製される。

完成したスタンプからは通常, 射出成形法によって光ディスクが作製される。大量に成形が必要な場合には, 一枚のスタンプではまかないきれないため, スタンプ(マスター) → サブマスター → ベビートと電鍍工程が繰り返

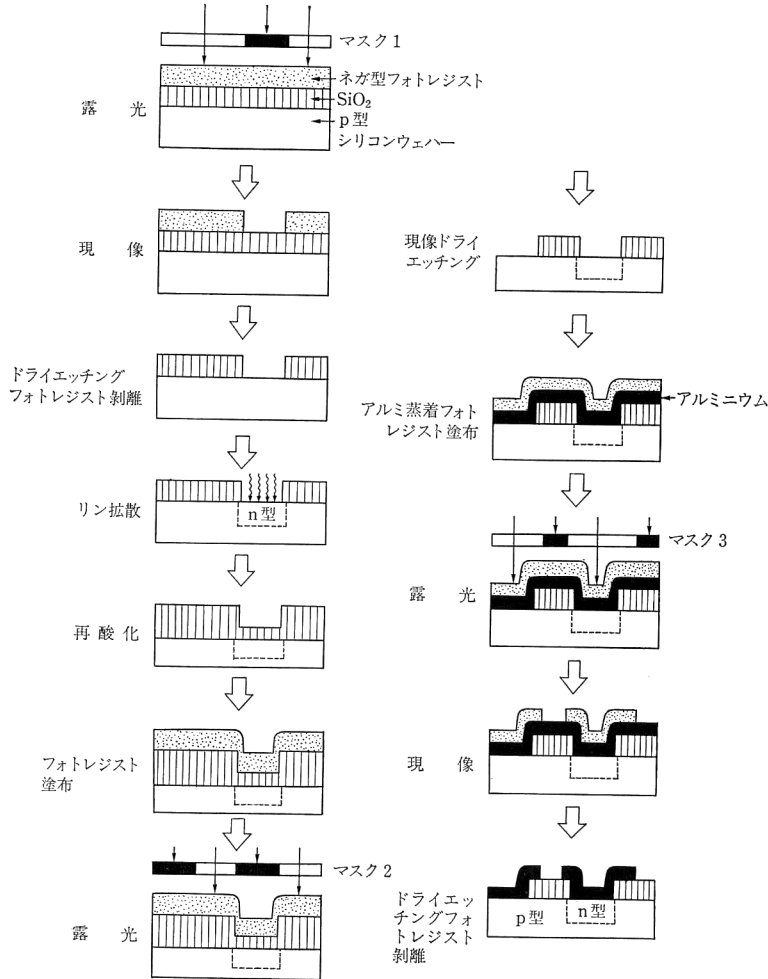


図 1 半導体プロセスのリンググラフィ工程

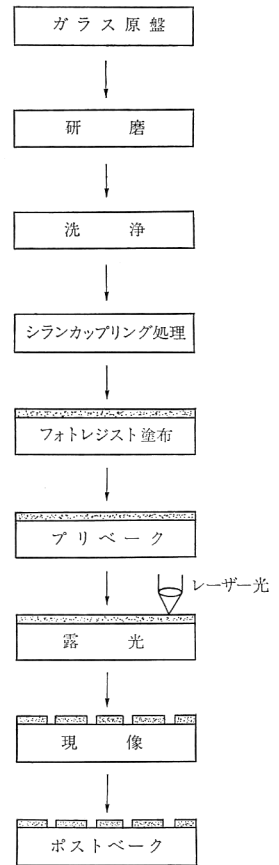


図 2 光ディスクのマスターリング工程

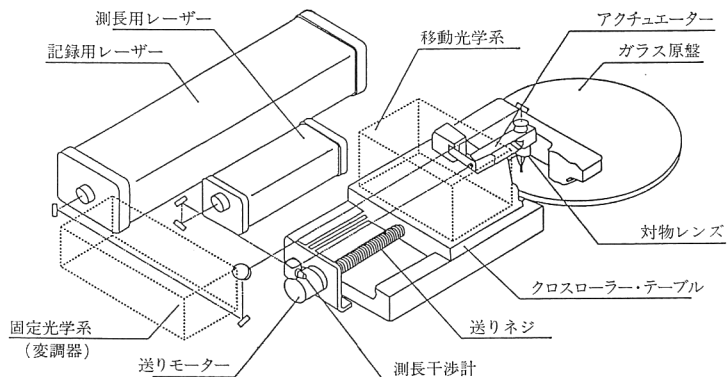


図 3 LBR の概観

返され、マスタースタンプと同じ形状を持つベーススタンプが複数枚作製された後、ベーススタンプを用いて成形が行われる。これは、アナログレコードの製造工程で用いられてきた手法である<sup>2)</sup>。

その他の基板作製方法としては、スタンプからの2P転写<sup>3)</sup>、ドライエッチングにより凹凸が形成されたシリコン基板をスタンプとした転写<sup>4)</sup>などの方法が提案されている。

### 3. 光ディスクプロセスで必要とされる特性

光ディスクプロセスにおいて、リソグラフィはマスタースタンプを作製するために行われ、その時に塗布されるフォトレジスト層の厚さは約100nmである。そのため、1000nm程度の厚さで何度もフォトレジストが塗布される半導体プロセスと比較すると、フォトレジストの使用量は数桁小さい。その結果、市販フォトレジストの材料設計は半導体プロセスで用いられることを前提に行われ、光ディスク専用で開発されたフォトレジストは皆無である。そこでこの項では光ディスクプロセスで必要とされる特性について、半導体プロセスで用いられる場合と比較しながら考察してみたいと思う。

光ディスクプロセスの良し悪しを判断する基準となるのは信号再生時の電気特性、主にCN比である。CN比はC(キャリアレベル)よりむしろN(ノイズレベル)の影響が支配的である<sup>5)</sup>。ノイズレベルを低減させるためには、同一の露光量で形成されるピットまたはグループ形状が均一であることが望ましい。ROM型ディスクでは同一線速で単一周波数を記録した場合のピットの形状がすべて均一であることが理想的である。

ここではフォトレジストを含むプロセスの諸特性と、CN比の関係を中心に考察するため、フォトレジストパターンを形成した原盤での再生電気特性を中心に話を進める。

#### 3.1 感度特性

フォトレジストのプリベーク後の膜厚に対する、ポストベーク後の膜厚の割合を各露光量についてプロットしたものが感度特性である。ポジ型フォトレジストの感度特性の典型例を図4に示す。

ここで $\gamma$ 値は(1)式で<sup>6)</sup>、また式中の $a$ をそのプロセス条件でのフォトレジストの感度と定義する。

$$\gamma = (\log ab)^{-1} \quad (1)$$

$a$ : 残膜率が0%になる露光量=感度

$b$ : 感度曲線の傾斜部を延長し、残膜率が100%になる露光量

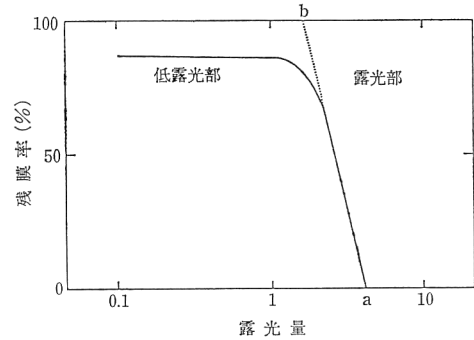


図4 ポジ型フォトレジストの感度特性例

光ディスクプロセスにおいて形成されるピットやグループの側壁の傾斜は $\gamma$ 値を反映するものと考えられ、 $\gamma$ 値が高いほど微細なリソグラフィが可能になる。

次に露光量が小さい領域(以下低露光部という)での、プリベーク後の膜厚に対するポストベーク後の膜厚の割合を低露光部残膜率として定義する。低露光部の膜厚の変化が大ききことはプロセスを管理する上で好ましくないため、低露光部残膜率は100%に近いほど良いと考えられる。

また、現像液濃度を変化させた場合の感度特性の変動(以下、感度特性のばらつきという)は小さい方が好ましい。つまり、感度特性のばらつきが小さいということは、現像液濃度の違いによる感度、 $\gamma$ 値、低露光部残膜率の差が小さいことを示している。すなわち、露光量が同じ場合、現像速度(現像液に対するフォトレジストの溶解速度)が現像液の濃度による影響を受けにくく現像の均一性が高いということである。したがって同一の露光量で形成されるピットやグループの形状も均一性が高く、その結果CN比の向上が期待される。反対に感度特性のばらつきが大きいフォトレジストでは溶解の均一性が低く、形成されるピットやグループの形状にもそれが反映されるため、高いCN比を得ることは期待できない。

一方、半導体プロセスでは感度、 $\gamma$ 値、低露光部残膜率は問題にされるが、形成されたパターンの均一性は光ディスクプロセスほど重要ではない。

#### 3.2 表面粗さ

フォトレジストの感度特性において残膜率が50%近くになるところ(以下中間残膜領域という)の表面粗さはピット形状の不均一性を定量的に示すデータと考えられる。フォトレジストの初期膜厚が80nmの場合に感度特性で膜減り量が30nmのところの表面粗さとCN比の関係を図5に示す。中間残膜領域はカッティング

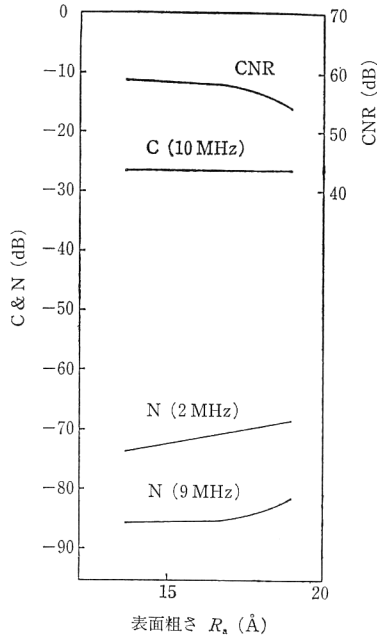


図5 表面粗さとノイズレベル, CN 比の関係

により形成されたピットの側壁部に相当すると考えられる。したがって、この部分の表面粗さが大きければサブミクロンオーダーで露光、現像過程が不均一に進行していると予想され、ピット形状も不均一になる。これにともない再生ノイズレベルが増大していることがわかる。以上の考察から、光ディスクプロセスに用いられるフォトレジストには中間残膜領域の表面粗さが小さいことが要求される。これは、とりもなおさず露光、現像過程が均一に進んだ結果であって、要因はフォトレジスト内の成分に負うところが大きい。

### 3.3 ABC パラメータ

感光性材料の評価パラメータのひとつに ABC パラメータがある<sup>7)</sup>。A 値は単位厚さあたりの光学濃度の変化量、B 値は単位厚さあたりの樹脂成分と露光した感光成分の合計の光学濃度、C 値は露光開始直後の単位露光エネルギーあたりの感光成分の分解量をそれぞれ表す。

フォトレジストの ABC 値と、原盤再生 CN 比の関係を表 1 に示す。A 値が大きく、B 値が小さいフォトレジストにおいて高い CN 比が得られることがわかる。これは、そのような特性を持ったフォトレジストの場合、自ら露光コントラストを拡張する働き<sup>8)</sup>によって、露光時のコントラストが大きくなり、また露光の均一性が高まることにより形成されるピットの形状がより均一になるためと考えられる。したがって、光ディスクプロセスに用いられるフォトレジストには高い A 値と低い B

表 1 ABC 値と CN 比の関係

フォトレジスト	CN 比 (dB)	ABC パラメータ		
		A 値 ( $\mu\text{m}^{-1}$ )	B 値 ( $\mu\text{m}^{-1}$ )	C 値 ( $\text{cm}^2/\text{mJ}$ )
A	54.5	0.56	0.23	0.07
B	57.7	1.52	0.46	0.12
C	59.1	1.10	0.20	0.09
D	57.1	1.48	0.42	0.12
E	55.0	0.74	0.22	0.05
F	56.8	1.52	0.46	0.12
G	55.4	1.32	0.47	0.11
H	52.6	1.06	0.76	0.06

値を併せもつことが要求される。一方、半導体プロセスではフォトレジストが  $1\mu\text{m}$  程度の厚膜で用いられることが多いため、光ディスクプロセスより低いところに A 値の最適値があるものと考えられる。

### 3.4 耐ドライエッチング性

光ディスクプロセスにおいては、半導体プロセスで行われるようにパターンが形成されたフォトレジストをマスクにして下地をエッチングする必要がなく、原盤そのものをマスタースタンプにする場合などの希少な例を除くと、ドライエッチングが用いられることは少ない。

したがって、フォトレジストがドライエッチングに対して文字どおり抵抗 (resist) する性能は必要とされない。このことは、半導体プロセスで用いられるフォトレジストがドライエッチング耐性を抜きにして議論できないのと比べ、大きな相違点である。

## 4. 特性向上に必要なフォトレジストの構成

### 4.1 フォトレジスト

光ディスクプロセスで用いられるポジ型フォトレジストは図 6 に示すように樹脂成分、感光成分およびそれを溶解している溶媒から成っている。

一般的なフォトレジストは感光剤のナフトキノンジアジドがバラスト化合物につけられ感光成分となっている。

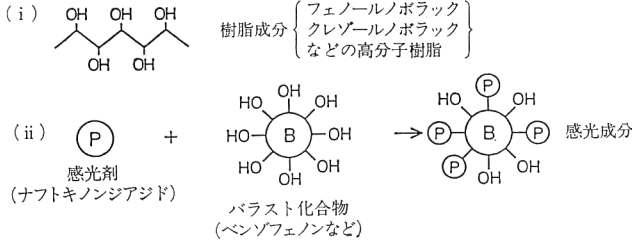
バラスト化合物の末端の  $-\text{OH}$  基のうち感光剤におきかかわっている割合をエステル化率といい、露光の均一性に関わる重要な要素と考えられる。

光ディスクの特性とこれらフォトレジスト内成分の関係について次に述べる。

### 4.2 特性向上に必要なフォトレジストの改良

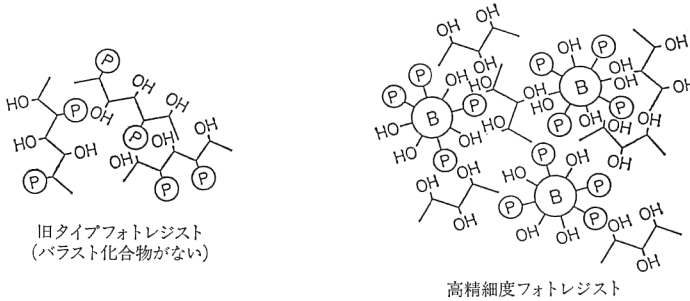
ROM 型光ディスクにおいて良い特性 (高い CN 比) を得るためには、同一露光量で形成されるピットの形状

1. フォトレジストの部分



(iii) 溶媒(ECA, MCA, EL, PGMEA など)

2. フォトレジストのタイプ



3. エステル化率

(バラスト化合物の末端の -OH 基のうち, 感光剤とおきかわっている場合)



図 6 フォトレジストの構成

をいかに均一にするかが最大のポイントであり, それは露光から現像の過程を均一に進めるということに他ならない. そのためには, 感光成分および樹脂成分といったフォトレジスト材料内の成分が均一であることがまず要求される.

樹脂成分は高分子であるため分子量分布<sup>9)</sup>を小さくおさえる必要がある. 感光成分では単一種類のバラスト化合物を用いることはもちろんのこと, 個々の感光成分のエステル化率を揃えることが必要である.

これらフォトレジスト材料成分の均一化によって, 露光から現像の過程が均一に進み, 中間残膜領域の表面粗さが小さく抑えられ, 感度特性のばらつきも抑えられることにより, CN 比の向上につながるものと考えられる.

また, 露光時 (フォトレジストが感光するとき) に高いコントラストをフォトレジスト (材料) 側で実現することができれば, 露光装置のコントラスト不足を補うことができ, 感光の (露光の) 均一化にも寄与する. そのためにはフォトレジストは, 露光される波長において大

きいA値と小さいB値を併せもつことが必要であり, その結果, フォトレジスト内部でコントラストを拡張する効果が高まり, 感光 (露光) が均一に進むと予想される.

5. 高密度化の流れ

5.1 半導体プロセス

半導体プロセスで量産される DRAM の大容量化とそれに必要なデザインルールの年次推移を図7に示す. 光を用いたリソグラフィでは 16 Mbit を実現するために, 光源がg線 (436 nm) から i 線 (365 nm) へと移り, さらに 64~256 Mbit を実現するためにエキシマレーザー波長 (KrF: 248 nm, ArF: 193 nm) へと移りつつある. これら光源の短波長化とは別に位相シフト技術<sup>10)</sup>や CEL 法<sup>11)</sup>などによる解像度の向上が検討されている. 光以外のリソグラフィでは, 光源に電子線を用いたり<sup>12)</sup>, X線縮小投影露光による微細化の努力がなされている. また, 今後の超高密度リソグラフィの可能性が期待できるものとして, 走査型プローブ顕微鏡 (以下 SPM と省略する) を応用した加工技術がある. これは, 本来表面

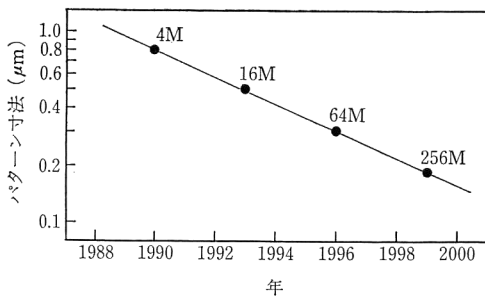


図 7 DRAM の容量, パターン寸法の年次推移

観察の手段として用いられてきた SPM を原子、分子を操作して表面形状を変化させるために使用するものである。代表的な加工例では、IBM アルマデン研究所の Eigler らによりニッケル基板上にキセノン原子で 5 nm 程度の大きさの文字を形成したものが<sup>13)</sup>。その他、電界蒸発を用いる方法<sup>14)</sup>や電気的方法<sup>15)</sup>、磁気・光磁気的方法<sup>16)</sup>などが報告されている。

## 5.2 光ディスクプロセス

従来、高密度な情報記録媒体であるといわれてきた光ディスクにもより一層の高密度化を求める声が高まりつつあり、これを実現するために波長変換素子や短波長半導体レーザーに代表される短波長読み出し光源の研究が盛んに行われている。それにともなってマスタリングにも高密度化技術が求められている。

従来、レーザーディスクやコンパクトディスクに代表される光ディスクのマスタリングには波長 458 nm のアルゴンレーザーや 442 nm のヘリウムカドミウムレーザーが用いられトラックピッチ 1.6 μm、最短ピット長約 0.6 μm で記録が行われてきた。しかし最近 351 nm や 364 nm などの短波長光源を用いる動きがみられトラックピッチおよびピット長をつめることにより CD 比 4 倍～6 倍のマスタリングが行われている<sup>17,18)</sup>。

また、光以外を用いたリソグラフィ法としては半導体プロセスと同様に電子線や SPM を用いることが考えられる。電子線を用いたリソグラフィは、かつて CED (静電容量) 方式ビデオディスクの開発段階に原盤記録技術の一環として検討されたことがあり<sup>19)</sup>、今後の高密度化の流れの中で再び検討される可能性がある。

## 6. ま と め

光ディスクプロセスを進めるにあたり半導体プロセスとの相違点を明確にしながらプロセス材料およびプロセス装置に求められる特性について述べた。光ディスクにおいて電気特性 (CN 比) を向上させるためには、同一

の記録パワーで形成されるピットあるいはグループの形状を均一に揃えることが必要であり、そのためには材料の均一性と露光のコントラストの拡張によるパターン形成過程 (露光, 現像) の均一化が重要となる。露光装置のコントラストが高いことは当然であるが、材料自身にも露光時のコントラストを拡張する効果をもつことが要求される。

これからも高密度化の流れのなかで、半導体プロセスで用いられる材料や高密度化技術が光ディスクプロセスにも採用されることになるだろう。しかし、両プロセスで必要とされる特性が異なる部分に関しては、光ディスクプロセスに合った材料の選択、改質、およびプロセス改善が今後も必要である。

## 文 献

- 1) 鳳 紘一郎: 半導体リソグラフィ技術 (産業図書, 1985).
- 2) 山本武夫: レコードプレーヤ (日本放送出版協会, 1971) pp. 37-39.
- 3) 滝本靖之: “ポリマー, フォトポリマーのオプトエレクトロニクスへの応用”, *O plus E*, **12** (1990) 92-97.
- 4) 堀籠信吉, ほか: “CD-ROM 用高速レプリカ技術”, 光メモリシンポジウム '92 論文集 (1992) pp. 43-44.
- 5) 飯田哲哉, ほか: “高密度マスタリング技術の開発”, *光学*, **23** (1994) 133-141.
- 6) 山本亜夫: 超微細加工とレジスト材料 (シーエムシー, 1985) pp. 195-199.
- 7) F. H. Dill: “Characterization of positive photoresist,” *IEEE*, **22** (1975) 445-452.
- 8) 戸所義博, 渡辺尚志, 井上森雄: “リソグラフィ技術の最新開発動向”, *メカトロニクス*, No. 2 (1991) 14-17.
- 9) 片山将道: 高分子概論 (日刊工業新聞社, 1975) pp. 187-194.
- 10) 岡崎信次: “位相シフト技術”, *光学*, **20** (1991) 488-493.
- 11) 米沢輝彦: 新・機能性高分子の応用 (シーエムシー, 1988) pp. 195-199.
- 12) 片岡睦男: レジスト材料・プロセス技術 (技術情報協会, 1991) pp. 58-70.
- 13) D. M. Eigler and E. K. Schweizer: “Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope,” *Nature*, **344** (1990) 524-526.
- 14) H. J. Mamin, P. H. Guethner and D. Rugar: “Atomic emission from a gold scanning-tunneling-microscope tip,” *Phys. Rev. Lett.*, **65** (1990) 2418-2421.
- 15) R. C. Barrett and C. F. Quate: “Change storage in a nitride-oxide-silicon medium by scanning capacitance microscopy,” *J. Appl. Phys.*, **70** (1991) 2725-2733.
- 16) E. Betzig, P. L. Finn and J. S. Weiner: “Combined shear force and near-field scanning optical microscopy,” *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1991) 2484-2486.
- 17) 栗林祐基, ほか: “高密度マスタリング技術の検討 (II)”, 第 54 回応用物理学会学術講演会予稿集, 28 a-SF-1 (1993) p. 1004.
- 18) S. Katuda, *et al.*: “Quadrupled CD-ROM fabricated using UV light source,” *ISOM/ODS '93 Postdeadline Papers* (1993) p. 38.
- 19) E. O. Keizer: “Video disc mastering,” *RCA Rev.*, **39**, 1 (1978) 60.