



高密度マスタリング技術の開発

飯田 哲哉・樋口 隆信・佐々木宏尚・尾越 国三・横関 伸一

パイオニア(株)研究開発本部総合研究所ディスクシステム研究部第二研究室
〒350-02 鶴ヶ島市富士見 6-1-1

(1993年8月9日受付, 1993年11月17日受理)

High Recording Density Optical Disc Mastering

Tetsuya IIDA, Takanobu HIGUCHI, Hironao SASAKI, Kunizo OGOSHI
and Shin'ichi YOKOZEKI

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

(Received August 9, 1993; Accepted November 17, 1993)

Aiming at obtaining a high CNR and four times recording density than that of the conventional laser disc, we have developed a mastering process for a laser beam recorder utilizing an ultraviolet laser. The conventional mastering process however did not meet the target. A photoresist claimed for high resolution and high CNR has been screened out from the photoresist available on the market. By the improvement of the photo active component on the photoresist, a CNR of 61.5 dB was obtained in the case of the four times higher density (at a linear velocity=6 m/s, and track pitch=0.8 μm , pit length=0.3 μm).

1. はじめに

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, 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出し光源の研究が盛んに行われている。

それとともに, 光ディスクのマスタリングにも高密度化技術が求められている。現在, レーザー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, トラックピッチ約 1.6 μm , 最短ピット長約 0.6 μm で記録が行われている。

今回われわれはトラックピッチ, ピット長とも従来の2分の1にし, 現行レーザーディスクの約4倍の高密度化の実現を目指すため, 記録時に波長 351 nm のアルゴンレーザーを用いた。しかし, 従来の 458 nm から 351 nm への変更では(1)式で規定されるビーム径は, 従来の77%にしかならない。

$$d = k \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

d : ビーム径

λ : 光源の波長

NA : 対物レンズの開口数

k : 開口形状や入射ビーム断面の強度分布などで決まる定数

また記録波長, 再生波長が従来と異なること, 形成されるピットのサイズも従来の約4分の1となることなどから, フォトレジストおよびプロセスに求められるスペックを新たに見直す必要があった。

以上のことから, 今回プロセスに求められた課題は,

(1) フォトレジストの解像度を向上し微小ピットを形成すること

(2) ノイズレベルを低減することにより高CN比を達成すること

の2点であった。

これらの課題を解決するために,

① 微細加工用フォトレジストの評価・選定

② 選定されたフォトレジストの改質
(光ディスクプロセスへの最適化)

という順序で研究を進めた。

2. プロセスの概要

Fig. 1 に光ディスクのマスタリングプロセスの概要を示す。ガラス原盤は表面の微細な傷や、やけを除去するため¹⁾精密研磨される。研磨後、清浄に洗浄されたガラス原盤は表面にシランカップリング処理がほどこされた後フォトレジストが塗布される。次に波長 351 nm のアルゴンレーザーを搭載した UV-LBR で信号の書き込みが行われる。UV-LBR は、光変調器で ON/OFF したレーザー光を対物レンズで微小スポットに絞りに、フォトレジストを塗布したガラス原盤を回転させながら露光する。露光後フォトレジストの露光された部分だけが現像により除去され、ピットが形成される。

通常の光ディスク作製工程ではこのあと電極形成～電鍍によってニッケルスタンプを作製し、射出成形法などでレプリカを得る。今回われわれは、ピットが形成されたフォトレジスト上に反射膜のアルミを成膜し、その裏側（ガラス面側）から再生装置で信号を読みとることによって原盤での評価を行った。そのためガラス原盤として 1.2 mm 厚のものを用いた。

3. 実験方法

実験の流れを **Fig. 2** に示す。ガラス原盤上に成膜されたフォトレジストを UV-LBR で露光（以下、カッティングという）し、ピット形成後の原盤に反射膜を形成することにより原盤再生による電気特性 (CN 比) の評

価を行った。**Fig. 3** に今回用いた UV-LBR の概略図、**Table 1** にその仕様を示す。

再生時、トラッキングには 3 ビーム法を用いるためピット高さは変調度だけを考慮(2)式に従って決められ

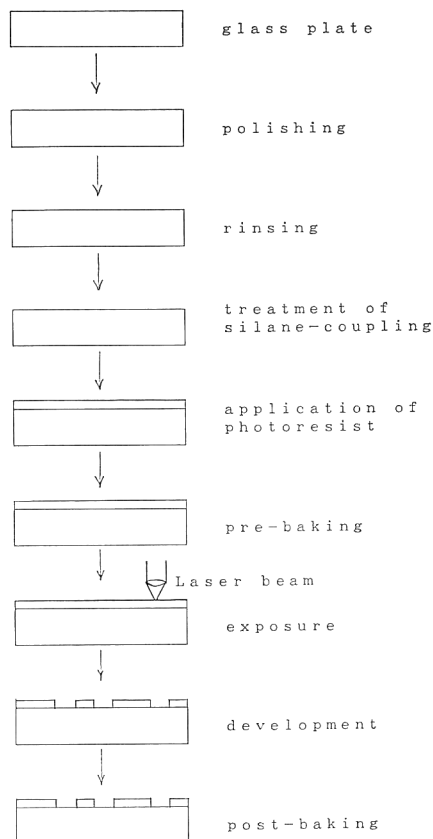


Fig. 1 Mastering process of optical disc.

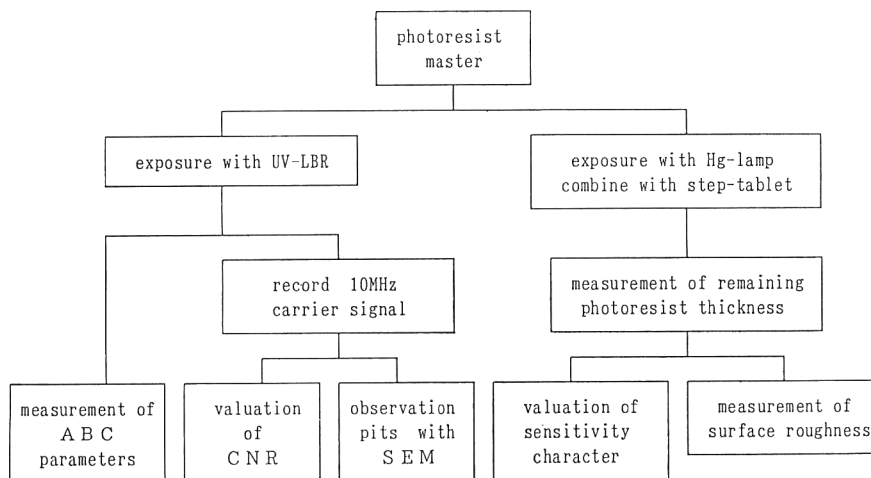


Fig. 2 Flow of experiments.

る²⁾.

$$d = \lambda / 4n \quad (2)$$

d : ピット深さ

λ : 読出し光源の波長

n : 光路中の媒体 (フォトレジスト) の屈折率

プロセス全体をとおしてのフォトレジストの残膜率を約 90% と見込み, 塗布時のフォトレジストの膜厚を約 80 nm に設定して実験を行った。残膜率は, 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百分率で表したものと定義する。

ここで UV-LBR でのカッティングパターンは次のとおりである。

線速 : 6 m/s 記録周波数 : 10 MHz

ピット長 : 0.3 μ m トラックピッチ : 0.8 μ m

また再生装置での測定条件は次のとおりである。

λ : 442 nm NA : 0.5

RBW : 30 kHz 線速 : 6 m/s

キャリアレベル : 10 MHz で測定

ノイズレベル : 9 MHz で測定

CN 比 : キャリアレベル/ノイズレベル

今回, UV-LBR によるカッティングと並行してフォトレジストの基本的な特性を把握するため以下の解析を行った。

3.1 感度特性の測定

各露光量に対する現象後のフォトレジストの膜厚を 80 nm のフォトレジスト膜について測定した。このと

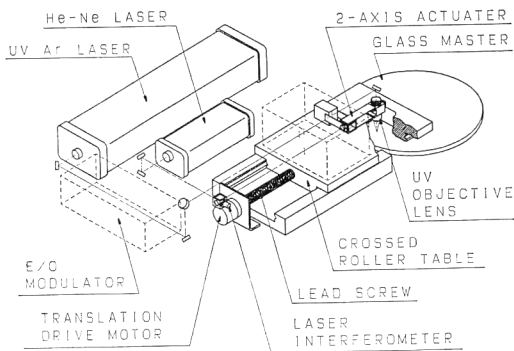


Fig. 3 An outline of UV-LBR.

Table 1 Specification of UV-LBR.

Light source	Ar laser
Wave length	351.1 nm
N. A.	0.9
Modulater	E/O
Quenching ratio	17 : 1 (at 10 MHz)

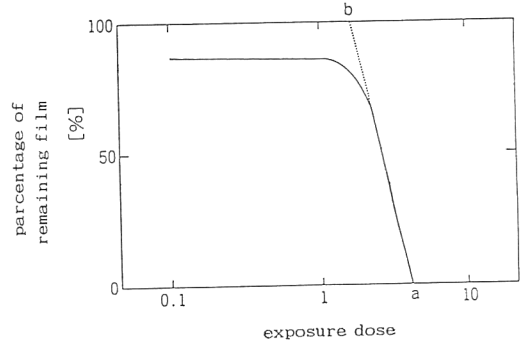


Fig. 4 An example of sensitivity character.

き, 実際の露光はステップタブレットをとおして超高圧水銀灯により行った。

ポジ型フォトレジストにおける感度特性の典型例を Fig. 4 に示す。ここで γ 値は, (3) 式で定義される³⁾。

また, 式中の a をその実験条件におけるフォトレジストの感度と定義する。

$$\gamma = (\log a/b)^{-1} \quad (3)$$

a : 残膜率が 0% になる露光量

b : 感度曲線の傾斜部を延長し, 残膜率が 100% になる露光量

形成されたピット側壁の傾斜は γ 値を反映するものと考えられ, γ 値が高いほど小さいピットを形成することが可能である。今回用いたポジ型フォトレジストの場合, 露光量が小さく感度特性が平坦な領域 (以下, 低露光部という) での残膜率は, 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として定義される。低露光部の膜厚の変化が大きいためはプロセスを管理する上で好ましくないため, 低露光部の残膜率は 100% に近いほどよいと考えられる。また現象液濃度の違いによる感度特性の広がり (以下, 感度特性のばらつきという) を観測した。

3.2 ピット形状の観察

UV-LBR でカッティングを行い形成されたピットの形状を走査型電子顕微鏡 (日立製作所製 S-4000) で観察した。走査型電子顕微鏡による観察では加速電圧が高いほどレジスト内部からの 2 次電子がふえ, 表面の観察に適さなくなるとの考えから, 低加速電圧 (2kV 程度) での観察を心がけた。

3.3 膜減り量 30 nm 相当のレジスト表面 (以下, 中間残膜領域という) の表面粗さの測定

われわれは, フォトレジストの中間残膜領域の表面粗さをピット形状の不均一性を定量的に示すデータと考えた。そのため感度特性で膜減り量が 30 nm のところの

表面粗さを走査型トンネル顕微鏡（デジタルインストルメント製ナノスコープII）を用い測定した。

3.4 フォトレジストの分子量分布の測定

フォトレジストの樹脂成分および感光成分の分子量分布⁴⁾の測定をゲル浸透クロマトグラフ（ウォーターズ社244型）を用いて行い、これらの均一性が電気特性にどのように影響するのかを調べた。使用カラムを次に示す。

樹脂成分の測定

AD 80 M/S (2本) + AD 8025 (1本)

感光成分の測定

KF-804 L (3本)

(カラムはすべて昭和電工製)

ここで、フォトレジストの構成と、露光から現像までの過程での各成分の機能について簡単に述べる (Fig. 5 参照)。

フォトレジストは樹脂成分、感光成分およびそれらを溶解している溶媒から成っている。樹脂成分としては、フェノールノボラック、クレゾールノボラックなどの高分子が用いられ、これらがリソグラフィ後に形をなす部分の主成分である。

感光剤としてはナフトキノンジアジドが用いられる。露光されていないナフトキノンジアジドを含むノボラックはアルカリ水溶液（現像液）に対する溶解速度がノボラック単体より3桁小さい。しかし露光によりナフトキノ

ノンジアジドはインデンカルボン酸になりアルカリ水溶液（現像液）に対する溶解速度はノボラック単体に比べ1桁大きくなる。したがって露光の前後で溶解速度が4桁異なり、現像によるパターン作製が可能となる。以上がポジ型フォトレジストを用いたフォトリソグラフィの原理である。

旧タイプのフォトレジストではナフトキノンジアジドが直接樹脂につけられているものもあるが、一般的にはナフトキノンジアジドがパラスト化合物につけられ感光成分となっている。パラスト化合物としては感光剤のナフトキノンジアジドをいくつか持つことのできるベンゾフェノンなどが用いられる。パラスト化合物の導入により露光部と未露光部の溶解速度差をさらに大きくすることが可能となる。また、フォトレジストを設計する際に樹脂成分と感光成分を別個に制御できるというメリットがあり、フォトレジストの高精細化には不可欠である。

パラスト化合物の末端の-OH基のうち感光剤におきかわっている割合をエステル化率という。エステル化率が広い幅をもつと露光の均一性が失われると予想され、それを抑えるためにはエステル化反応（パラスト化合物にナフトキノンジアジドをつける反応）を飽和させることによる、エステル化率の均一化が必要である。

3.5 フォトレジストの ABC パラメータ^{5,6)}の測定

351 nm におけるフォトレジストの ABC パラメータの測定を UV-LBR で光路中にレジスト原盤を配置し、透過光強度をモニターすることにより行った。ここで ABC パラメータは(4)~(6)式のように定義される。

$$A = \frac{1}{d} \ln [T(\infty)/T(0)] \quad (4)$$

$$B = -\frac{1}{d} \ln [T(\infty)] \quad (5)$$

$$C = \frac{A+B}{A I_0 T(0) [1-T(0)]} \frac{dT(0)}{dt} \quad (6)$$

d : フォトレジストの膜厚

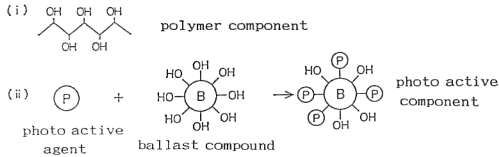
$T(0)$: 未露光時の透過率

$T(\infty)$: 露光量無限大時の透過率

I_0 : レジスト表面での光強度

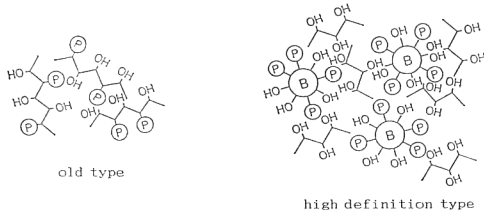
ここで、 A 値は単位厚さあたりの光学濃度の変化量、 B 値は単位厚さあたりの樹脂成分と露光した感光成分の合計の光学濃度、 C 値は露光開始直後の単位露光エネルギーあたりの感光成分の分解量をそれぞれ表すと考えられる。

1. Components of photoresist



(iii) Solvent (ECA, MCA, EL, PGMEA)

2. Type of photoresists



3. Esterification ratio

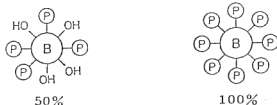


Fig. 5 Components of photoresist.

4. 市販レジストの評価

4.1 感度特性の評価

代表的なフォトレジストの感度特性を Fig. 6 に示す。フォトレジスト B および C は現像液濃度 20% での実験結果、フォトレジスト A は感度が低いため、実際のカッチングを考慮し現像液濃度 30% での実験結果を示した。

高密度プロセスで用いる場合のフォトレジストに求められる特性は、 γ 値と低露光部の残膜率がともに高く、感度が適切な値をもつことである。しかし以上の評価の範囲内では各市販フォトレジスト間で有意な差を見いだすことは困難であった。

ところが、現像液濃度の変化に対する感度特性の変化(ばらつき)を見ると Fig. 7 のように各フォトレジスト間で大きくその特性が異なることがわかる。この中ではフォトレジスト C が最も感度特性のばらつきが小さい。感度特性のばらつきが小さいというのは現像液濃度の違いによる感度、 γ 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の形状も均一性が高く、CN 比の向上が期待できる。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、形成されるピット形状にもそれが反映される結果、高い CN 比を得ることは期待できない。

4.2 電気特性 (CN 比) の評価結果

Table 2 に各フォトレジストのキャリアレベル、ノイズレベルおよび CN 比を示す。フォトレジスト A は感

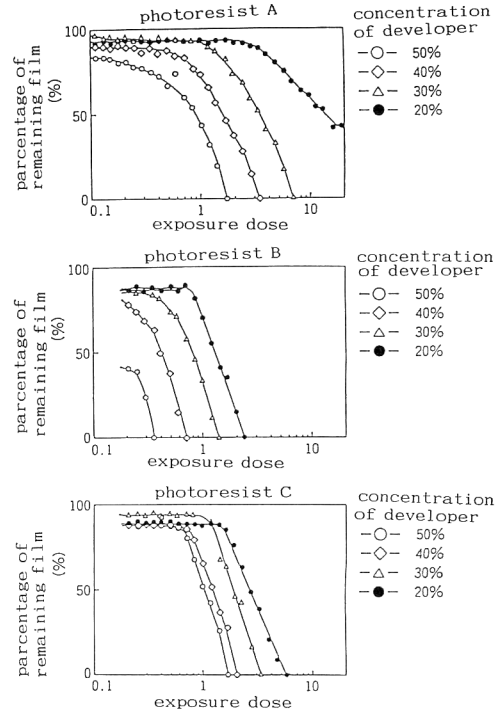


Fig. 7 A dispersion of sensitivity character.

Table 2 CNR of various photoresists.

Photoresist	C (dB)	N1 (dB)	N2 (dB)	CNR (dB)
A	-26.4	-80.9	-68.3	54.5
B	-26.4	-84.1	-71.9	57.7
C	-26.3	-85.4	-70.1	59.1
D	-26.0	-83.2	-69.1	57.1
E	-26.4	-81.4	-68.7	55.0
F	-26.9	-83.6	-69.8	56.8
G	-26.4	-81.8	-67.5	55.4
H	-27.3	-79.9	-63.6	52.6

C: Carrier level at 10 MHz, N1: Noise level at 9 MHz, N2: Noise level at 2 MHz.

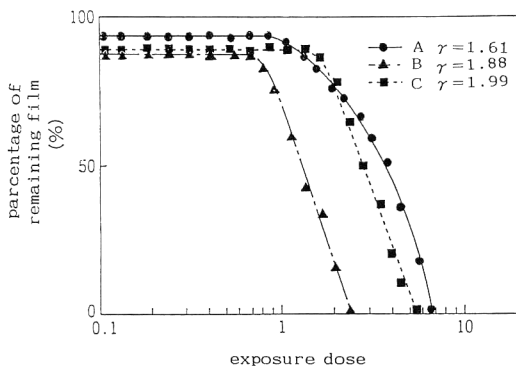


Fig. 6 Sensitivity character of typical photoresists.

度が低く UV-LBR のカッチングパワー範囲では濃度 20% の現像液でピット形成ができないため濃度 30% の現像液を用いた。それ以外はすべて濃度 20% の現像液での実験結果である。この表から、キャリアレベルはほぼ一定で、電気特性の優劣の要因は主としてノイズレベルにあることがわかる。

ノイズは、再生光学系が読んだ信号の揺らぎ、つまり個々のピットの形状の変動によって生じると考えられる。そしてこの変動は、フォトレジストの露光の過程および現像の過程をとおして発生する。

このうち露光の過程においては、UV-LBR の露光の安定性（露光のくりかえしの均一性）が十分高いことが確認されているため、露光されるフォトレジスト側に変動要因があるものと考えられる。

また、現像の過程については4.1の感度特性の結果で述べた理由により感度特性のばらつきが小さいものほどノイズレベルが低く、その結果 CN 比が高くなっていることがわかる。

4.3 中間残膜領域の表面粗さと CN 比の相関

中間残膜領域のレジスト表面の表面粗さと原盤再生 CN 比およびノイズレベルの関係を Fig. 8 に示す。中間残膜領域はカッティング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、この表面粗さが大きければサブミクロンオーダーの領域で露光、現像過程が不均一に進行していると考えられ、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劣

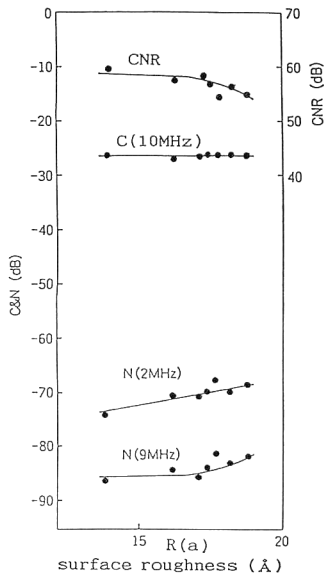


Fig. 8 C&N dependence on surface roughness of photoresists.

化していることがわかる。

4.4 分子量分布と CN 比の相関

代表的なフォトレジストの感光成分と樹脂成分の分子量およびその分布の測定結果を Table 3 に示す。つぎに感光成分のゲル浸透クロマトグラフ測定結果のうち代表的なチャートを CN 比とともに Fig. 9 に示す。フォトレジスト A は古いタイプであるためパラスト化合物を用いず、感光成分が直接樹脂成分につけられている。そ

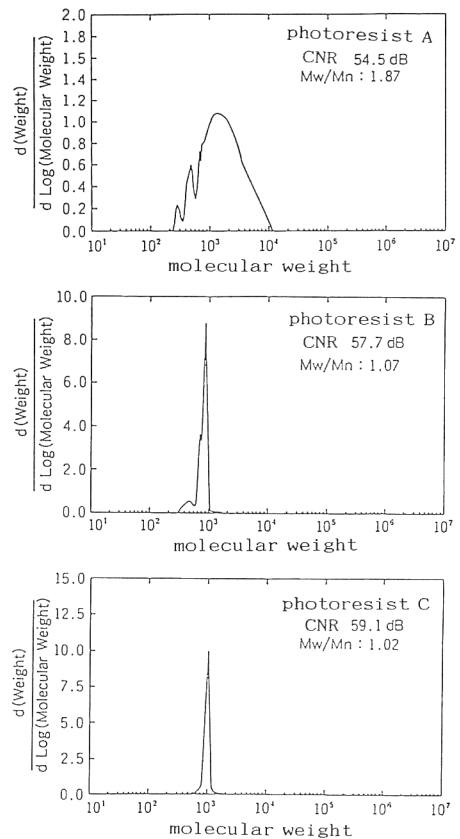


Fig. 9 Molecular weight distribution of photo active component.

Table 3 Molecular weight distribution of various photoresists.

	Photo active component			Polymer component		
	Molecular weight		Distribution	Molecular weight		Distribution
Photoresist	$M_n/10^3$	$M_w/10^3$	M_w/M_n	$M_n/10^3$	$M_w/10^3$	M_w/M_n
A	11.50	21.50	1.87	1.25	10.50	8.40
B	7.32	7.83	1.07	1.61	8.62	5.35
C	8.83	8.99	1.02	1.30	7.86	6.05

M_n : number-average molecular weight (g/mol), M_w : weight-average molecular weight (g/mol).

のため、見かけ上広い分子量分布をもっている。このようなタイプのフォトレジストでは露光時にこの分布を反映してしまい露光の均一性が低くなると考えられる。つぎにフォトレジストBの感光成分の分子量分布をみると、Aに比べかなり改善されている。そしてCN比も3 dB以上の改善を見せている。しかし図を詳細に見ると、まだ三つほどのピークが重なっていることがわかる。最後にフォトレジストCでは、ピークプロファイルが一つで感光成分が単一であることがわかる。そのためCN比もフォトレジストBよりさらに1 dB以上改善されている。

つぎに樹脂成分の分子量分布と原盤再生CN比の関係を Fig. 10 に示す。この図から樹脂成分の分子量分布とCN比の間には明確な相関があり、分子量分布が小さいほどCN比が高いことがわかる。

以上の結果から、感光成分が単一成分からなり、樹脂成分の分子量分布がより均一であるほど高いCN比が得られることがわかる。これはフォトレジストの各成分の均一化がピット形状の均一化に寄与した結果と考えられる。

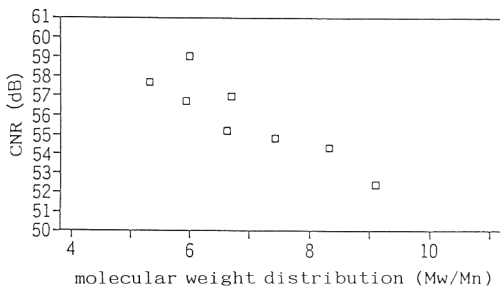


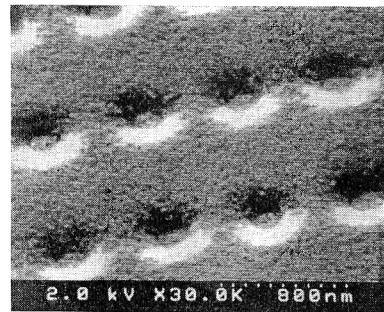
Fig. 10 CNR dependence on molecular weight distribution in photoresists.

Table 4 ABC parameters of various photoresists.

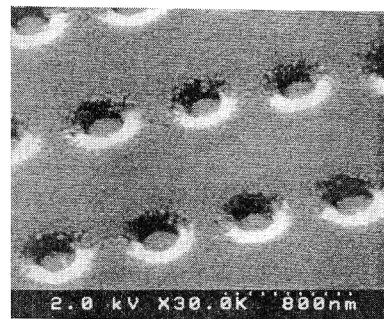
Photoresist	CNR (dB)	ABC parameters		
		A value (μm^{-1})	B value (μm^{-1})	C value (cm^2/mJ)
A	54.5	0.56	0.23	0.07
B	57.7	1.52	0.46	0.12
C	59.1	1.10	0.20	0.09
D	57.1	1.48	0.42	0.12
E	55.0	0.74	0.22	0.05
F	56.8	1.52	0.46	0.12
G	55.4	1.32	0.47	0.11
H	52.6	1.06	0.76	0.06

4.5 ABC パラメータと CN 比の相関

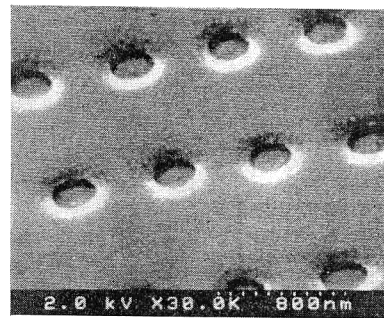
フォトレジストの ABC パラメータと原盤再生 CN 比の関係を Table 4 に示す。UV-LBR のカッティング波長である 351 nm で B 値が小さく、なおかつ A 値が大きいフォトレジスト C で高い CN 比が得られていることがわかる。これはそのような特性をもったレジストの場合、一般に言われる内部 CEL (contrast enhancement layer) 効果⁷⁾によって、露光時のコントラストが大きくなり、その結果、露光の均一性が高まることにより形成されるピットの形状もより均一になったためと考えられる。



Photoresist A



Photoresist B



Photoresist C

Fig. 11 SEM photographs of micro pits at various photoresists.

4.6 ピット形状の観察

代表的なフォトレジストのピット形状の走査型電子顕微鏡写真を Fig. 11 に示す. ピット形状の均一性, 表面粗さの大きさに注目して写真を観察すると, それらと CN 比との関係がつかみやすいと考えられる.

5. フォトレジスト材料の開発

5.1 フォトレジスト材料開発の方向

市販フォトレジストの評価結果から, われわれは

- ① 中間残膜領域の表面粗さと原盤再生 CN 比の相関
- ② 感光成分および樹脂成分と原盤再生 CN 比の相関
- ③ ABC パラメータと原盤再生 CN 比の相関

の三つの相関を見いだした. これらはフォトレジスト材料の分子レベルでの露光 (感光), 現像のされかたの均一性が CN 比向上に必要な条件であることを意味している. そこでわれわれは, フォトレジストの改質により電気特性をさらに向上させることができると考え, 次に

示した指針にそってフォトレジスト C の改質品の試作をレジストメーカーに依頼し, 試作されたフォトレジストの評価を行った.

- (1) 露光をより均一に進めるため感光成分に変更を加える
- (2) 現像をより均一に進めるため現像速度をコントロールする

それぞれの指針に対する具体的な進め方として, 次に示すような手法を用いた.

- (1) 感光成分の均一化, 感光成分の増量を行う
感光成分の均一化では, エステル化率を 100% にすることで, より一層の均一化を図ることを試みた.
- (2) 樹脂成分の分子量を変更する, 樹脂成分の分子量分布を小さくする

それぞれの試作品の内容を Table 5 に示す.

5.2 改質レジストの評価

改質フォトレジストの電気特性の評価結果を ABC パラメータの測定結果とともに Table 6 に示す. また, 改

Table 5 Details of improvement.

Photoresist	Details of improvement
C 0	Standard : photoresist C
C 1	21% increase of molecular weight of polymer component
C 2	34% increase of molecular weight of polymer component
C 3	Decrease of molecular weight distribution of polymer component
C 4 a	20% increase in quantity of photo active component
C 4 b	Uniformalize and 20% increase in quantity of photo active component
C 5	50% increase in quantity of photo active component
C 6	100% increase in quantity of photo active component

Table 6 ABC parameters of newly developed photoresists.

Photoresist	CNR (dB)	ABC parameters		
		A value (μm^{-1})	B value (μm^{-1})	C value (cm^2/mJ)
C 0	59.1	1.10	0.20	0.09
C 1	58.3	**	**	**
C 2	59.4	**	**	**
C 3	58.6	1.14	0.20	0.08
C 4 a	60.8	1.35	0.21	0.09
C 4 b	61.5	1.60	0.24	0.11
C 5	61.4	1.60	0.24	0.11
C 6	61.0	1.99	0.29	0.17

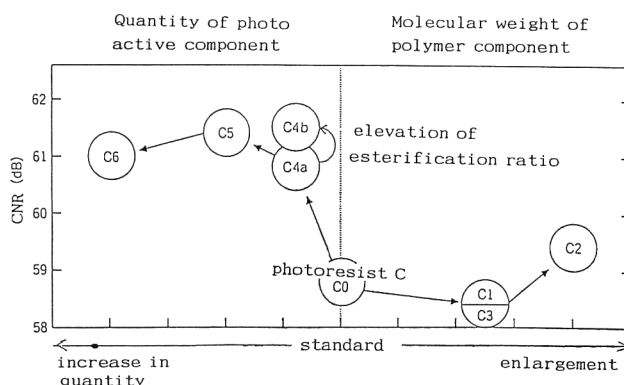


Fig. 12 Improvement of photoresist and its result.

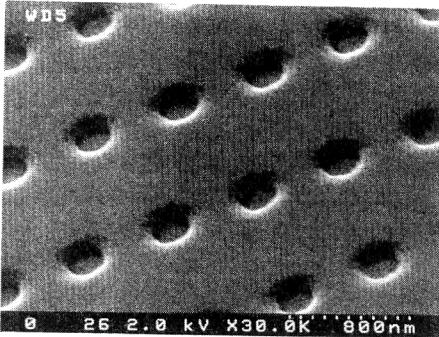


Fig. 13 SEM photograph of micro pits.

質の方向に対する効果を Fig. 12 に示す。このときの現像液の濃度は 20%，またカッティングパターンおよび再生信号の測定条件は「3. 実験方法」で述べた条件と同一である。感光成分の増量と均一化（エステル化率の均一化）によって CN 比が大きく改善した。これは、感光成分の増量と均一化によって露光のコントラストがさらに向上した結果、ピット形状がより均一になったことによるものと考えられる。

これは ABC パラメータの測定結果からも裏付けられる。通常半導体プロセスでフォトレジストを用いる場合には膜厚が 1~2 μm と、光ディスクに比べ桁以上大きい。そのためむやみに A 値を上げると光が基板までとどかず、矩形パターンの形成が難しくなる。したがって、通常 A 値は 1.0 前後に調整される。しかし、高密度光ディスクプロセスではフォトレジストの膜厚が約 80 nm と薄く A 値を約 1.6 まであげても CN 比は低下せずコントラストを改善する方向に働いていることがわかる。

一方で、樹脂成分の平均分子量の変更および分子量分布の均一化では電気特性は改善されず、この範囲の変更では効果が小さいことがわかった。

最後に改質フォトレジスト C4a でのピットの走査型電子顕微鏡写真を Fig. 13 に示す（トラックピッチ 0.8 μm ，ピット長 0.3 μm ）。

6. ま と め

市販のフォトレジストの中から高密度リソグラフィが

可能で 351 nm での露光に最適な i 線用フォトレジスト C を選定し、さらにこれを改質することによって CN 比 61.5 dB を得た。

また高密度光ディスクプロセスに用いる場合のフォトレジスト材料に必要とされる特性について、つぎの 3 点を見いだした。

(1) 解像度が高いこと

従来の約 4 分の 1 の面積のピットを形成するため、フォトレジストにはそれ以上の解像度が必要である。

Fig. 11 の SEM 写真から、フォトレジスト A のように解像度の低いフォトレジストでは微小ピットを形成することが困難であることは明らかである。

(2) 露光のコントラストが高いこと

電気特性 (CN 比) を向上させるためには、ピット形状を均一にそろえることが必要であり、そのためには露光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、この効果は感光成分の増量とともに増大し、50% 増量時に最も高くなるものと考えられる (Table 5 および Table 6 より)。

(3) 分子レベルでの均一性が高いこと

フォトレジストの感光成分、樹脂成分の均一性と CN 比には相関があり、改質（感光成分の均一化向上）によりさらに CN 比が向上した。これは電気特性向上のために、フォトレジスト材料に分子レベルでの均一性が要求されることを示唆している。

文 献

- 1) 土橋正二：ガラス表面の物理化学（講談社，1980）。
- 2) 岩村総一：ビデオディスクと DAD 入門（コロナ社，1982）。
- 3) 山岡亜夫：超微細加工とレジスト材料（シーエムシー，1985）。
- 4) 片山将道：高分子概論（日刊工業新聞社，1975）。
- 5) F. H. Dill: *Characterization of Positive Photoresist*, Ed-22 (7) (IEEE, 1975) pp. 445-452.
- 6) 米沢輝彦：新・機能性高分子の応用（シーエムシー，1988）。
- 7) 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.