

# ドライエッチングプロセスによるナノパターン形状制御

## Nano-pattern profile control technology using reactive ion etching

藤村 恵, 細田 康雄, 勝村 昌広, 小林 正規, 北原 弘昭  
Megumi Fujimura, Yasuo Hosoda, Masahiro Katsumura, Masaki Kobayashi, Hiroaki Kitahara

橋本 和信, 加園 修, 飯田 哲哉, 栗山 和巳, 横川 文彦  
Kazunobu Hashimoto, Osamu Kasono, Tetsuya Iida, Kazumi Kuriyama, Fumihiko Yokogawa

**要 旨** 我々は、Blu-ray Disc および次世代光ディスク実現のために電子ビーム記録装置 (Electron Beam Recorder : EBR) の開発および光ディスク作製行程における各プロセス技術の開発を行っている。本報告では、生産の安定性を考慮に入れ、シンプルなプロセスにおける誘導結合型プラズマ反応性イオンエッチング (Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching : ICP-RIE) 装置を用いたナノパターン形状制御技術について検討した成果について示す。第一に、パターン側面の傾斜角度を制御するためのパラメータとして、エッチング電力比 (アンテナ電力 / バイアス電力) を導入し、パターン傾斜角度とエッチング電力比の関係を調査した。その結果、パターン傾斜角度と電力比は線形関係にあることを確認した。第二に、容量 100GB の ROM パターンにおいて ICP-RIE 技術を用いてパターン傾斜角度の異なる 2 種類のサンプルを作製した。これらのピット形状の違いを明らかにするために、ライン幅変動 (Line Edge Roughness : LER) の評価を行った結果、角度を急峻にすることが LER の低減に有効であることを確認した。最後に、これらの ICP-RIE 技術を 300GB の ROM パターンに適用した。

**Summary** We have developed an electron beam recorder (EBR) and studied a process technology for high-density optical disc mastering. In this study, we aimed at controlling a nano-pattern profile by adopting inductively coupled plasma reactive ion etching (ICP-RIE) under simple conditions for good productivity. To control the pattern inclination angle, we introduced an etching power ratio of antenna power to bias power and investigated the relationship. From the results of our investigation, it was confirmed that inclination angle depended on etching power ratio linearly. Furthermore, in the case of a 100 GB read-only memory (ROM) equivalent pattern, we formed two kinds of inclined pattern by adopting ICP-RIE. We evaluated line edge roughness (LER) to determine the difference in pit profile accurately. As a result, it was confirmed that LER was improved at a steep inclination angle. In addition, we applied ICP-RIE to a 300 GB ROM pattern.

**キーワード** : 光ディスク, マスタリング, 反応性イオンエッチング, 電子ビーム記録装置

### 1. まえがき

我々は、高記録密度の光ディスクマスタリングを実現するために電子ビーム記録装置 (Electron Beam Recorder : EBR) を開発している<sup>(1-3)</sup>。EBR は、Blu-ray Disc および次世代光ディスクを実現するために有効な装置である。EBR 描画技術によって形成したパターンを製品化するための光ディスク生産工程において、生産性を向上することは重要な課題である。

生産性を向上する一つとして、樹脂基板の成形時におけるサイクルタイムの短縮化が考えられる。森田などは射出成形用スタンプのパターン底部において側面の傾斜を緩やかにすることによって、転写行程において、良好な転写性能を保ちながら、サイクルタイムが短縮したことを報告している<sup>(4)</sup>。スタンプのナノパターン形状を制御することによって、成形時のサイクルタイムを短くし、生産性を向上できる可能性がある

るものと考えられる。従って、EBRを用いたスタンパ作製プロセスにおいては、EBR描画後のナノパターン形状制御が重要であると考えられる。

一方、次世代光ディスクのように高密度で微細なパターンにおいては、パターンエッジの乱れが再生信号を悪化させる要因になると考えられる。従って、次世代光ディスクのマスタリングにおいては、パターンの乱れを低減することが必須の技術課題である。

ここで、パターンの形状制御は、反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching : RIE) プロセスの適用によって実現できることが報告されている<sup>(4,5)</sup>。また、我々は、Blu-ray Discのマスタリングプロセスにおいて、EBRで形成したレジストパターンにRIEプロセスを適用することで再生信号が向上することを報告している<sup>(6,7)</sup>。このように、RIEプロセスの導入は、パターンの形状制御のみならず、再生信号の改善も期待できる。

以上に示すように、光ディスクの生産性を向上するためには、RIEプロセスを用いたナノパターンの形状制御が有効であるものと考えられる。ここで、生産の安定性を考慮に入れると、ナノパターンの形状制御は複雑なプロセスを用いず、シンプルな条件で実現することが望ましい。そこで、本報告では、シンプルなRIEプロセスによるパターン形状制御に着目し、パターンの底面と側壁が成す角度 (パターン傾斜角度) の制御技術の確立を目指した。

## 2. エッチングパラメータ

本実験ではパターン傾斜角度を制御するために、誘導結合型プラズマ (Inductively Coupled Plasma: ICP)RIE装置を用いた<sup>(8,9)</sup>。ICP-RIE装置の特徴は、低圧でプラズマが形成できることである。低い圧力では、エッチングガス分子の平均自由行程が長くなり、エッチングガス分子が微細パターンの底部まで到達出来る特徴がある。従って、ICP-RIE装置は高密度で微細なパターンのエッチングに有効である。

エッチングによって形成されるパターンの傾斜角度に主に影響を与えるICP-RIEプロセスのパラメータとして以下の項目が挙げられる。

1. 基板温度
2. エッチングガス種
3. エッチング電力

本研究では、シンプルで安定したプロセスを実現するために、エッチング電力に注目し、他のパラメータを固定とした。ICP-RIE装置において制御できる電

力は、プラズマを形成するアンテナ電力と、プラズマと基板の間に電位差を形成するバイアス電力の二電力に分けられる。ICP-RIE装置では、アンテナ電力とバイアス電力は独立に制御することができる。

プラズマ中に形成されるラジカルとイオンのうち、電氣的に中性なラジカルは、電場の影響を受けないため、拡散によって基板上にあるパターンの上に広がり、パターンの上面、底面および側面全てに付着、反応する。従って、ラジカルは等方性エッチングに効果がある。ラジカル量はアンテナ電力によって変更できることから、アンテナ電力は等方性エッチングに効果があるものと考えられる。

一方、イオンは荷電粒子であるため、電場の影響を受ける。エッチング装置内においては、電場はバイアス電力によって、基板方向に対して垂直方向に形成されることから、イオンは基板上のパターンに対して垂直方向にのみ反応する。従って、イオンは異方的なエッチングに効果がある。電場強度はバイアス電力によって制御されることから、バイアス電力は異方性エッチングに効果がある。

パターンの傾斜角度は、等方的なエッチングが支配的な場合になだらかな角度となり、異方的なエッチングが支配的な場合に急峻な角度になる。そこで、我々は、パターンの傾斜角度は等方性エッチングと異方性エッチングの比をとることで制御可能であると考えた。ここで、エッチング電力比

$$\alpha = \text{アンテナ電力} / \text{バイアス電力}$$

を異方性と等方性のエッチング比を示すパラメータとして定義する。パターン傾斜角度制御は、エッチング電力比 $\alpha$ とパターン傾斜角度との相関を調査することによって実現できるものと考えられる。

## 3. 実験方法

図1に実験プロセスフローを示す。

1. 電子線レジスト (ZEP520: Nippon ZEON Co.,Ltd) をシリコン基板にスピコート法により成膜した。
2. EBRでグループまたはピットパターンを描画した。描画条件の詳細は次章に示す。
3. ZED-N50を用いてディッピング法により現像した。
4.  $\text{CF}_4$  ガスを用いたICP-RIEプロセスにより、描画パターンをSi基板上に転写した。表1に詳細条件を示す。
5. レジストを、 $\text{O}_2$  ガスを用いたICP-RIEプロセスにより除去した。

6. エッチングしたナノパターン形状を走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope : SEM) を用いて評価した。

本研究では、より正確なパターン形状評価のために、エッチング深さを約 70nm に統一し、マスクとなるレジスト膜厚を約 160nm とした。

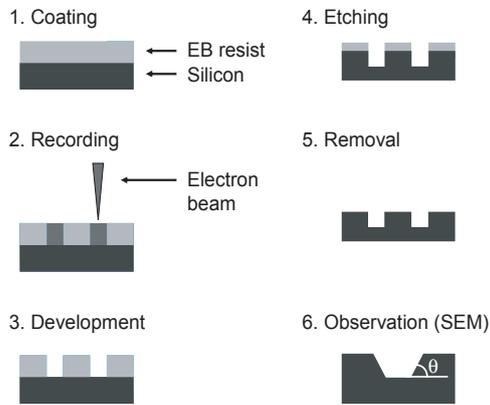


Fig1 Experimental process flow.  
図 1 実験方法

表 1 ICP-RIE 条件

Table I ICP-RIE conditions.

Etching condition	
Species of etching gas	CF <sub>4</sub>
Gas flow [sccm]	30
Pressure [Pa]	0.5
Etching power	Antenna power [W] 50 - 400
	Bias power [W] 5 - 20
	Etching power ratio: $\alpha$ 2.5 - 30
Substrate temperature [°C]	20

#### 4. 実験結果

##### 4.1 パターン傾斜角度制御

エッチング電力比  $\alpha$  を 2.5 から 30.0 の範囲で調節した場合のパターン傾斜角度変化を調査した。ここでの実験用サンプルには、パターンの断面形状をより正確に観察するために、トラックピッチが 320nm のグループパターンを用いた。グループパターンを形成するための EBR 描画条件を表 2 に示す。

図 2 に  $\alpha = 5.0$  におけるエッチングしたサンプルの断面 SEM 像を示す。パターン傾斜角度  $\theta$  の測定方法としては、SEM 像を用い、図 2 に示すようにパターン底面と側面との角度を測定した。

図 3 に  $\alpha$  と傾斜角度  $\theta$  の関係を示す。グラフから

傾斜角度  $\theta$  は  $\alpha$  と線形関係にあることが確認できた。この結果から、パターン傾斜角度  $\theta$  はエッチング電力比  $\alpha$  を調節することによって容易に制御可能である。従って、エッチング電力比  $\alpha$  を用いることにより、任意の傾斜角度を形成することが可能になったと考えられる。

表 2 EBR の記録条件

Table II Recording condition of the EBR.

Acceleration voltage [kV]	50
Beam diameter [nm]	55
Beam current [nA]	120

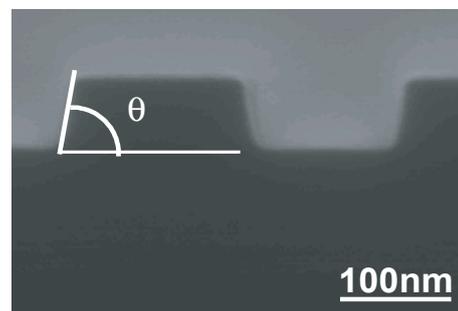


Fig. 2 SEM images of etched samples with typical inclination angles.  $\alpha = 5.0$

図 2 エッチングサンプルの断面 SEM 像  $\alpha = 5.0$

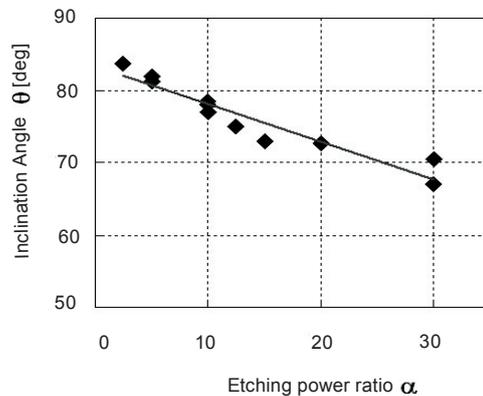


Fig.3 Relationship between etching power ratio  $\alpha$  and pattern inclination angle  $\theta$ .

図 3 エッチング電力比  $\alpha$  とパターン傾斜角度  $\theta$  の関係

##### 4.2 100GB パターン形状制御

DVD 換算で 100GB の容量となる ROM パターンに ICP-RIE 技術を適用した。図 4(a), (b) に Blu-ray Disc の ROM (BD-ROM) と 100GB-ROM の最短ピットの上

面および断面形状のイメージ図を示す。上面図において、外側の円周はピット上部が占める領域を示し、内側の円周はピット底部が占める領域を示す。グレーに塗られた部分はパターン傾斜面を上へ投影した（傾斜面投影）領域である。ここで、傾斜角度およびパターン深さが同じ場合には、ピット領域全体に対する傾斜面投影領域の面積比は、ピットサイズが小さくなるにつれて増加する。傾斜面投影領域の面積比増加は、再生信号の劣化を引き起こすものと考えられる。面積比を減少する手法としては、図4(c)に示すように傾斜角度を急峻にすることが考えられる。

$\alpha = 5.0$  (パターン傾斜角度  $\theta = 80$  度) となるエッチング条件で作製した 25GB 容量の BD-ROM においては、ジッタ値 4.7% と良好な再生信号が得られる<sup>(6)</sup>。ここで、25GB 容量の BD-ROM では、最短ピットに占める傾斜面投影領域の面積比は 26% となることから、良好な再生信号を得るには、26% 程度の面積比にする必要があるものと考えられる。表3に BD-ROM と 100GB-ROM の最短ピットに占める傾斜面投影領域の面積比を計算した結果を示す。傾斜角度 80 度において、100GB-ROM の面積比は 43% と BD-ROM の面積比に比べて増大する。一方、傾斜角度を 84 度とすれば、100GB-ROM における面積比は 27% に減少する。従って、100GB-ROM においては、パターン傾斜角度 84 度の実現によって、良好な再生信号が得られるものと考えられる。表3の結果から、パターン傾斜角度 84 度を得るためには、エッチング条件を  $\alpha = 2.5$  とすれば良い。

実際に 100GB-ROM パターンを EBR を用いて描画し

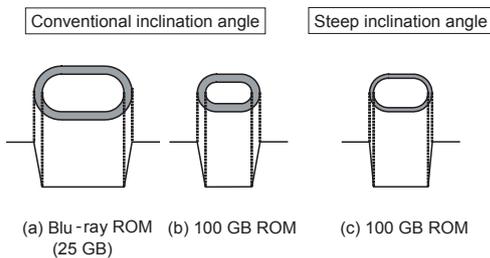


Fig.4 Images of minimum pit patterns with top and cross-sectional views.

(a) BD-ROM with capacity of 25 GB and (b) 100 GB ROM with conventional inclination angle. (c) 100 GB ROM with steep inclination angle.

図4 最短ピットの上面及び断面図

(a) BD-ROM 25GB (b) 100GB-ROM (c) a, b に比べ急峻となる角度の 100GB-ROM

た。表4に 100GB-ROM のパラメータを、表5に EBR の描画条件をそれぞれ示す。傾斜面投影面積の減少効果を調査するために、パターン傾斜角度  $\theta = 80$  度および 84 度となるエッチング条件として、 $\alpha = 5.0$  および 2.5 の 2 条件で描画パターンをエッチングした。図5にエッ

表3 傾斜面投影領域の面積比

Table III Inclined projected area ratios.

Inclination angle [deg]	BD-ROM (25 GB) [%]	100 GB ROM [%]
80	26	43
84	16	27

表4 100,200,300GB ROM パターンのパラメータ

Table IV Parameters of 100, 200 and 300 GB ROM.

	100 GB	200 GB	300GB
Modulation	8 / 16	8 / 16	8 / 16
Track pitch [nm]	160	113.1	92.3
Minimum pit length [nm]	87	61.5	50.2
Disc size, $\phi$ [nm]	120	120	120

表5 EBR の記録条件

Table V Recording conditions of EBR.

Acceleration voltage [kV]	50
Beam diameter [nm]	25
Beam current [nA]	12

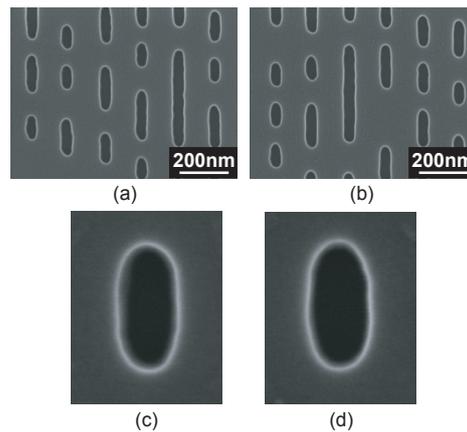


Fig.5 SEM images of etched 100 GB ROM pattern.

Pattern inclination angle: (a) and (c)  $\theta = 80$ , and (b) and (d)  $\theta = 84$ .

図5 100GB-ROM パターンの SEM 像

パターン傾斜角度: (a), (c)  $\theta = 80$  (b), (d)  $\theta = 84$ .

チング後のサンプルのSEM像を示す。図5(c)と5(d)の比較から、急峻な角度の実現によって、パターンのエッジが鋭くなっている様子が観測された。

ピット形状の詳細を調査するために、ピット幅の変動量を計測した。20個以上の長ピットのSEM像から、図6に示すようにピット中央部の幅を5nm間隔で合計800点以上測定し、ピット幅変動量の標準偏差値(3σ)を算出した。ここで、算出したピット幅変動量をラインエッジラフネス(Line Edge Roughness: LER)として定義する。

図7に、パターン傾斜角度θとLERの関係を示す。ラインはEBRで形成したレジストパターンのLERを示しており、マークはエッチングパターンのLERを示している。図7から、LERはICP-RIEプロセスの適用によって改善されることが分かる。その原因については調査中であるが、レジスト側面部における深さ方向の荒れがICP-RIEプロセスによって平均化されるため、結果としてエッチン

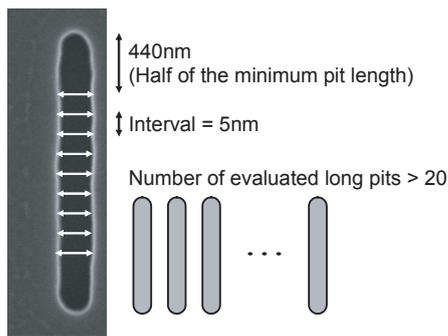


Fig.6 Measurement method for pit width.

図6 ピット幅測定方法

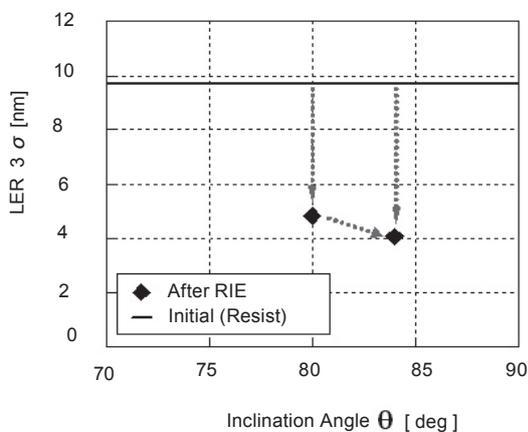


Fig.7 Relationship between pattern inclination angle θ and LER.

図7 パターン傾斜角度とLERの関係

グ前のレジストパターンよりもLERが低減しているものと推測している。一方、傾斜角度を80度から84度にすることによって、LERはさらに低減している。従って、傾斜面投影領域を減少させることによって、LERを低減できるものと考えられる。

以上の結果から、ICP-RIEプロセスの適用および、傾斜角度の急峻化によって100GBのROMパターン程度の微細なナノパターンの形状を改善できることが確認された。

#### 4.3 高密度パターンへの適用

100GBを超える超高密度パターンにおいてもICP-RIEプロセスの適用が可能であるかどうかについて検討した。例えば、DVD換算で300GBの容量となるパターンの最短ピット長は50nmであり、最短ピット長とレジスト厚さ(160nm)のアスペクト比は約3と大きくなる。微細で高アスペクト比のパターンでは、ラジカルやイオンがパターン底面へ到達することが困難になることが予想され、その為にICP-RIEプロセスが適用できなくなる可能性がある。

そこで、200GB、300GB容量の超高密度パターンを急峻な傾斜角度となるICP-RIE条件、α=2.5でエッチングを試みた。前述した表4に各パターンのパラメータを、表5にEBRの描画条件をそれぞれ示す。

図8にエッチングしたサンプルのSEM像を示す。ピット長50nmの超微細パターンにおいても良好なパターンが形成されていることが確認された。このように、ICP-RIEプロセスは300GBのROMパターンのような超高密度光ディスクに対しても適用可能であることが確認された。

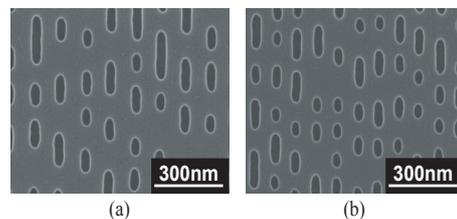


Fig.8 SEM images of etched samples.

- (a) 200 GB ROM pattern.
- (b) 300 GB ROM pattern.

図8 エッチングサンプルのSEM像

- (a) 200 GB ROM (b) 300 GB ROM

#### 5. まとめ

我々は、光ディスクの生産性向上および次世代光ディスク実現のために、ICP-RIEによるナノパターン

形状制御について検討した。第一に、単一ガスを用いた電力のみを変更するシンプルな ICP-RIE プロセスによって、パターン傾斜角度制御を試みた。エッチング電力比  $\alpha$  = アンテナ電力 / バイアス電力を定義し、パターン傾斜角度とエッチング電力比の関係を調査した。その結果、パターン傾斜角度はエッチング電力比  $\alpha$  に対して、線形に変化することを確認した。これにより、パターン傾斜角度は、電力比  $\alpha$  のみによって容易に制御できることが明らかとなった。第二に、100GB-ROM パターンに ICP-RIE プロセスを適用し、パターンの LER を評価した。その結果、EBR で形成したレジストパターンの LER は、ICP-RIE プロセスを適用することによって、低減することを確認した。さらに、パターン傾斜角度を急峻にすることによっても LER は低減することを確認した。最後に、容量 200, 300GB となる超高密度パターンに ICP-RIE プロセスを適用し、良好な微細パターンを得た。

以上に示したように、我々は EBR 描画パターンにエッチング電力比  $\alpha$  を用いた ICP-RIE プロセスを適用することによって、ナノパターンの形状制御を実現した。本プロセスは、Blu-ray Disc や次世代の光ディスクにおける光ディスクマスタリングにおいて有効な生産プロセスであると考えられる。

## 参 考 文 献

- (1) Y. Kojima, H. Kitahara, O. Kasono, M. Katsumura and Y. Wada: Jpn. J. Appl. Phys. Vol.37 p.2137 (1998)
- (2) Y. Wada, M. Katsumura, Y. Kojima, H. Kitahara and T. Iida: Jpn. J. Appl. Phys. Vol.40 p.1653 (2001)
- (3) H. Kitahara, Y. Kojima, M. Kobayashi, M. Katsumura, Y. Wada, T. Iida, K. Kuriyama and F. Yokogawa: Tech. Dig. ISOM / ODS WA3 (2005)
- (4) S. Morita, M. Nishiyama, H. Konishi, M. Hayashi, T. Akiyama and T. Niwa: Tech. Dig. ODS MA3 (2000)
- (5) 谷井清, 榎原俊昭, 坪井騰, 沖野芳弘: 秋季応用物理学学会学術講演会, 29a-ZE-8 (1986)
- (6) O. Kasono, M. Sato, T. Sugimoto, Y. Kojima and M. Katsumura: Jpn. J. Appl. Phys. Vol.43 p. 5078 (2004)
- (7) M. Katsumura, H. Nishiwaki, T. Mitsuhata, M. Okano, T. Iida, A. Kouchiyama and H. Inoue: Jpn. J. Appl. Phys. Vol.41 p.1698 (2002)
- (8) Y. Tosaka and S. Nakajima: Tech. Dig. CS MANTECH 5d (2002)
- (9) 市川幸美, 佐々木敏明, 堤井信力: 「プラズマ半導体プロセス工学」, 内田老鶴圃, 2003