

次世代超高密度ディスク媒体用電子ビーム記録装置

Electron Beam Recorder for Next-Generation Superhigh-Density Disk Media

北原 弘昭, 小島 良明, 小林 正規, 和田 泰光

Hiroaki Kitahara, Yoshiaki Kojima, Masaki Kobayashi, Yasumitsu Wada

勝村 昌広, 飯田 哲哉, 栗山 和巳, 横川 文彦

Masahiro Katsumura, Tetsuya Iida, Kazumi Kuriyama, Fumihiko Yokogawa

要 旨 電子ビームマスタリングは、Blu-ray Disc のさらに次の世代を担う超高密度光ディスクや、パターンド磁気ディスクを実現するために不可欠な技術として期待されている。これらの次世代高密度ディスク媒体を実現するため、我々は高解像度電子ビーム記録装置を開発した。本装置を用いた記録実験で、DVD 換算容量 510GB 相当の超高密度パターンの描画を達成した。さらに、100GB 容量全面記録スタンプを作製し、良好な記録安定性を確認した。本技術は、パイオニア F A から販売される市販用電子ビーム記録装置に適用される。

Summary Electron beam mastering is expected to be a key technology indispensable to realize the next-generation optical disc for post Blu-ray discs and patterned magnetic disk media. We developed a high-resolution electron beam recorder (EBR) to realize such next-generation high-density disk media. From experimental results, a superhigh-density patterning of capacity equivalent to 510 GB was achieved using the EBR. The recording stability was proven by fabricating 100-GB-capacity stampers with good pattern size uniformity. This technology is introduced into the commercial EBRs of Pioneer FA corporation.

キーワード : 電子ビーム, マスタリング, 高密度, ディスク媒体, パターンドメディア

keyword : electron beam, mastering, high-density, disk media, patterned media

1. まえがき

次世代光ディスクシステムである Blu-ray Disc(BD)は、既に市場への導入が開始され、今後、ハイビジョン映像記録などの幅広い用途で普及拡大が期待されている。その一方で、ポスト BD を担う超高密度光ディスクの研究も本格化しつつあり、近接場光を利用したものなど、いくつかの有望な技術が提案されている^(1,2)。次々世代光ディスクに必要な記録容量は、12cm ディスク1層当たり 150 ~ 500GB となることが予想される。この記録密度を達成するために必要な最小ピットサイズは 40-70nm に相当し、このような非常に微細なパターンを実現するためのマスタリング技術としては、電子ビームマスタリングが本命と考えられている。

また、最近では、高密度磁気ディスクの分野においても電子ビームマスタリングへの期待が高まってい

る。次世代超高密度ハードディスク実現のため、高トラック密度において S/N 比を改善する効果のあるディスクリットトラックメディア⁽³⁾や、さらには、超常磁性限界を超えて 1Tbit/in² 以上の安定記録を実現する可能性のあるナノパターンドメディア⁽⁴⁾といった技術の研究が盛んに進められている。これらは、磁性体を記録トラックまたは、記録ビットごとに物理的に孤立させた磁気記録媒体であり、その製作には、非常に微細なパターンのマスタリング工程を必要とする。そのため、これらのディスク媒体を実現するためのキーテクノロジーとして、電子ビームマスタリングに対する期待は大きい。

我々は、1993年に最初の電子ビーム記録装置(EBR: Electron Beam Recorder)を開発して以来、高密度ディスクマスタリングの研究を進め、その成果を発表して

きた⁽⁵⁻⁸⁾。そして、その有効性が認められ、EBRの需要が高まったことから、2004年からは、パイオニアFAよりEBRの販売を開始し、好評を得ている。今回、我々は、ポストBD用超高密度光ディスクやパターンド磁気ディスク媒体のマスタリングの要求に応えるため、高解像度型EBRの市販プロトタイプ機を開発した⁽⁹⁾。本報告では、このEBR装置の構成と特徴を説明し、本装置を用いた記録実験の結果から、DVD換算容量510GB相当の超高密度パターンや、100GB容量全面記録スタンプの記録安定性などを紹介する。

2. 高解像度電子ビーム記録装置の構成と特徴

電子ビーム記録装置EBRの構成を図1に示す。EBRは、電子ビームを発生し集束する電子カラム、描画基板を載置して精度良く回転させる回転ステージ、それを半径方向に移動させる直動ステージ、電子ビームの調整に用いる試料台ステージなどから構成されている。なお、ステージシステムは真空チャンバ内に構成されており、装置全体は、外乱振動を低減するために除振台上に設置されている。また、生産用装置としての使用を考慮して、短時間で描画基板の交換を行うためのロードロックシステムを備えており、記録工程および、基板交換は、コンピュータ制御による自動化を実現している。

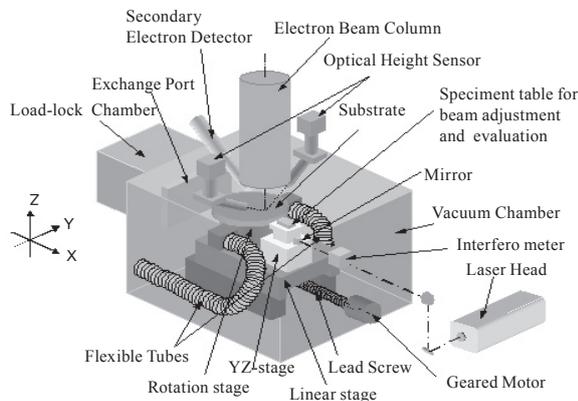


Fig.1 Schematic picture of electron beam recorder.

図1 電子ビーム記録装置の構成

2.1 電子カラム

電子カラムは、図2に示すような2レンズ構成の光学系となっている。電子源にはTFE（Thermal Field Emission）型カソードを採用しており、安定で高輝度

な電子ビームを得ることが出来る。また、描画基板内における電子散乱による記録解像度の低下を防ぐため、50kVの高加速電圧を採用している。ビーム集束特性の測定値を図3に示す。高密度記録に対応するため、ビームの微小化が図られており、最小で27nm（FWHM）のビーム径がビーム電流13nAで得られている。

電子ビームの変調すなわち、ビームブランキングは、コンデンサレンズの集束点にブランキング電極を配置した共役ブランキング方式となっている。この方式では、コンデンサレンズの収差により、ブランキング動作時にビームスポット位置が変位するため、記録されるピット形状に歪みを生じる可能性がある^(6,10)。この問題を防止するために、コンデンサレンズ用非点収差補正器を導入し、さらに、ブランキングドライバの過渡特性の改善を図った。これにより、図4に示すような、形状歪みのないピット描画を実現している。

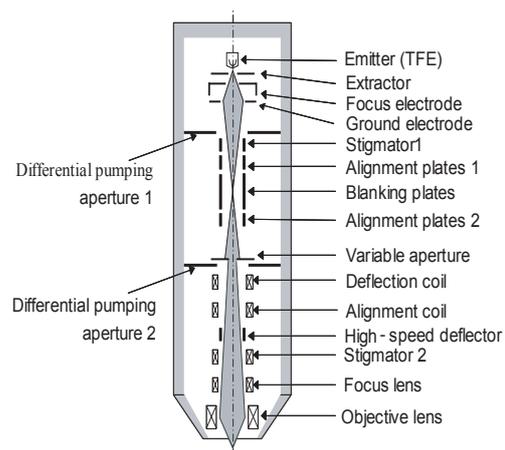


図2 電子ビームカラムの構成

Fig.2 Schematic diagram of electron beam column.

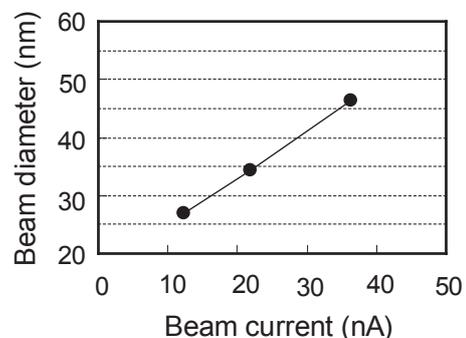


Fig.3 Experimental beam convergence characteristic.

図3 ビーム集束特性の測定値

同時に、ブランキングスピードの高速化も達成されており、立ち上がり、立ち下がり時間は5ns以下となっている。

ビームの高速偏向には、周波数帯域50MHzの静電偏向器を搭載した。これにより、図5に示すようなウォブル記録をはじめ、同心円パターンや疑似デュアルビーム記録、そのほか様々なサーボパターンの描画に応用が可能である。

2.2 ステージシステム

EBRのステージシステムは、直動ステージ(Xステージ)と回転ステージ(θ ステージ)の組み合わせであることから、一般にX- θ ステージと呼ばれている。Xステージは、クロスローラガイドと送りネジより構成されており、減速器付きのDCモータで駆動される。Xステージは連続送りで動作し、その位置は分解能0.3nmのレーザ測長器で測定され、クローズドループ制御される。また、送り制御の残留位置決め誤

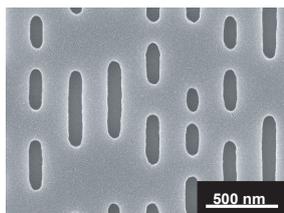


Fig.4 Pit pattern image of 25 GB equivalent capacity

(track pitch: 320 nm, minimum pit length: 149 nm).

図4 25GB相当のピット写真

(トラックピッチ:320nm, 最短ピット長:149nm)

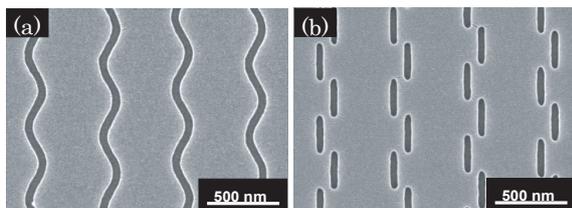


Fig.5 Application examples of high-speed beam deflector.

(a) Wobbled tracks (track pitch: 500 nm, wobbling spatial period: 500 nm, wobbling amplitude: 100 nm p-p).

(b) Offset pits (track pitch: 500 nm, pit length: 250 nm, pit offset: 100 nm).

図5 高速ビーム偏向器の使用例

(a) ウォブルトラック(トラックピッチ:500nm, ウォブル周期:500nm, ウォブル振幅:100nmp-p)
(b) オフセットピット(トラックピッチ:500nm, ピット長:250nm, オフセット量:100nm)

差は、ビーム偏向により記録位置補正し、高い記録位置精度を得ている。 θ ステージには、高い回転精度を得るために、空気軸受け型ダイレクトドライブモータを採用している。空気軸受けから放出される空気が真空チャンバ内に漏れ出すのを防ぐため、回転軸の真空シールには磁性流体シールを用いている。これにより、回転ジッタ $1.0 \times 10^{-5}\%$ (P-P)、真空度 2.0×10^{-4} Pa が達成されている。また、最高回転数は2400rpmであり、高速記録にも対応可能である。さらに、非同期回転振れ(NRRO)を分解能0.6nmのレーザ測長器で測定し、ビーム偏向により記録位置補正する機能を搭載しているため、回転振れによるトラックピッチ精度の劣化を防ぐことができる。

2.3 ダイナミックフォーカス制御システム

原盤全面にわたる安定な記録を実現するために、本EBRにはダイナミックフォーカス制御システムが搭載されている。ダイナミックフォーカス制御システムは、描画基板の高さを光学式ハイトセンサで測定し、その高さ変動に応じて電子カラム内のダイナミックフォーカスレンズの焦点距離を制御し、ビームぼけを抑制するシステムである。図6にダイナミックフォーカス制御の効果を示す。これは、試料面の高さ変動に対するビーム径の変化を実測した結果である。フォーカス制御を動作させない場合、ビームの焦点深度は $10 \mu\text{m}$ 以下であるのに対し、フォーカス制御を動作させると、 $\pm 200 \mu\text{m}$ の高さ変動量にわたってビーム径の増大を防ぐ可能であることが実証されている。

2.4 ビーム調整及び評価システム

電子ビーム記録におけるフォーカス制御は、あくまでもオープンループ補正である。従って、描画開始前に行う初期ビーム集束調整の誤差は、描画ごとのパターンサイズ誤差の原因となる。特に、非常に微細なパターンの描画においては、初期ビーム集束調整の精度は、記録の再現性に関わる重要なファクターであ

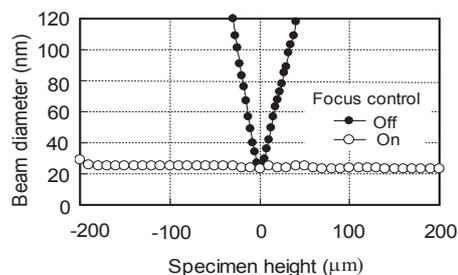


Fig.6 Efficacy of dynamic focus control system.

図6 ダイナミックフォーカス制御の効果

る。このために、我々は、定量的な特性評価が可能なビーム特性評価系を開発し、EBRに搭載した。ビームの集束調整と評価には、YZステージ上に搭載した試料台を用いる。試料台には、ビーム集束調整に用いる電子顕微鏡用標準試料などの各種調整用試料や、電流検出のためのファラデーカップなどが配置されている。描画前の初期ビーム集束調整では、ハイトセンサとZステージを使って電子顕微鏡用標準試料を描画基板と同一高さに位置決めし、その2次電子像を観察してフォーカスおよび、非点収差の調整を行う。ここで、調整のバラツキを最小限に抑えるためには、精密かつ定量的なビーム収束特性の測定手段が必要である。このために、我々は、**図7**に示すような、シリコンナイフエッジ試料とファラデーカップを用いたビーム径測定を採用している。シリコンナイフエッジ試料は、シリコンウェハをエッチングして作製した、傾斜断面を持つ微小方形開口試料である。この採用により、ナイフエッジ試料の高さをハイトセンサで測定し、描画基板と高さを正確に一致させてビーム径を測定することが可能になった。さらに、極めてシャープでラフネスの小さいエッジが得られるため、測定値のバラツキも低減することができた。ビーム収束特性の測定精度が改善したことより、調整誤差を最小限に抑えられ、再現性の良い記録が可能である。

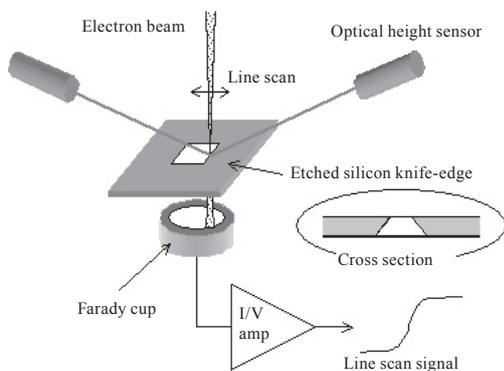


Fig.7 Measurement method of beam diameter using silicon knife-edge.

図7 シリコンナイフエッジを用いたビーム径測定方法

2.5 自動ロードロックシステム

描画基板の装填および、搬出は、ロードロックシステムによって自動的に行われる。ロードロックシステムは、ロードロックチャンバおよび、搬送機構から構成されており、約20分で基板装填または、搬出を行うことがで

きる。なお、描画基板のシリコンウェハは、静電チャック方式でターンテーブルに直接固定される。そのため、良好な面精度が得られるうえ、回転アンバランスによる精度劣化を防ぐことが可能である。

3. 記録性能評価

3.1 記録解像度

高分解能EBRの記録解像度を評価するため、超高密度パターンの描画実験を行った。実験条件は**表1**に示す。加速電圧50kV、ビーム径27nm、ビーム電流13nAの条件で描画し、レジストにはZEP-520A(日本ゼオン社)、基板にはシリコンウェハを使用した。**図8(a)-(c)**は、超高密度光ディスクパターンの描画例を示す。トラックピッチ70-90nm、最短ピット長39-44nmであり、DVD換算の記録容量(記録密度)は、それぞれ、351, 434, 510GB(240, 300, 350Gbit/in²)に相当する。これより、本EBRにより、300Gbit/in²を超える超高密度光ディスクパターンの描画が、通常のシリコン基板プロセスで可能であることが実証できた。

一方、**図9(a)-(d)**は、パターンド磁気ディスクのためのパターン描画例を示す。**図9(a), (b)**は、それぞれ、トラックピッチ90nm, 70nmのグループパターンである。これより、本EBRが、トラック密度360kTPIのディスクリードトラック媒体のマスタリングに適用できる可能性が示された。さらに、**図9(c), (d)**は、パターンドメディア作製の可能性を示すドットパターンの描画例である。最高で、トラック方向、半径方向ともに70nm間隔のドットパターンの形成に成功している。

3.2 記録安定性

記録安定性評価のために、12cmディスク全面にわたって連続描画した100GB容量の原盤作製を行った。レジスト原盤の記録条件は**表II**に示す通りであり、トラックピッチは160nm、最短ピット長は87nm、変調方式は8/16変調である。**図10**は、レジスト原盤から電鍍工程を経て作製したニッケルスタンプのピット写真で、記録開始直後の最内周部(R22mm)と終了直前の最外周部(R58mm)のパターンを比較して示している。これらの写真から、記録開始時と終了時でパターンに目立った変化は見られないことが分かる。さらに、定量的な評価として、スタンプの各半径位置における平均ピットサイズを測定し、その均一性を評価した。別々に記録した2枚のマスタスタン

パについて、各半径位置における7Tマーク(基準長203nm)の平均ピット幅および、3Tマーク(基準長87nm)の平均ピット長を測定した結果を図11に示す。これより、1枚のスタンプ内の平均ピットサイズ安定性は2nm以下であり、また、2枚のスタンプ間の平均ピットサイズ再現性も2nm以下であることが分かる。この結果より、本EBRが良好な記録安定性と記録再現性を有することが実証できた。

表1 実験条件1

Table 1 Experimental conditions 1.

| | |
|---------------------------------|---------------|
| Beam energy (keV) | 50 |
| Beam diameter (nm) | 27 |
| Beam current (nA) | 13.0 |
| Resist | ZEP-520A |
| Substrate | Silicon wafer |
| Resist thickness (nm) | 70 |
| Recording linear velocity (m/s) | 0.22-0.35 |

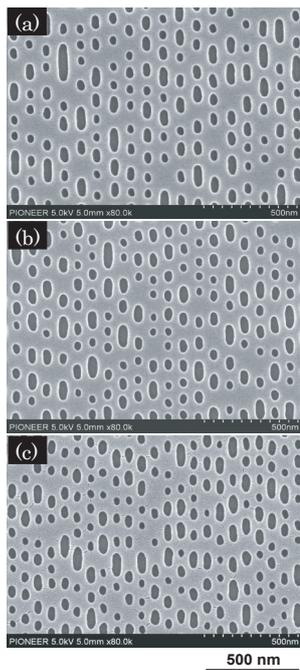


Fig.8 Superhigh-density patterns for next-generation optical disk.

(a) 351 GB (density: 240 Gbit/in², track pitch: 90 nm, minimum pit length: 44 nm, modulation: 8/16). (b) 434 GB (density: 300 Gbit/in², track pitch: 80 nm, minimum pit length: 40 nm, modulation: 8/16). (c) 510 GB (density: 350 Gbit/in², track pitch: 70 nm, minimum pit length: 39 nm, modulation: 8/16).

図8 超高密度光ディスク用パターンの描画例

(a) 351GB相当(トラックピッチ:90nm, 最短ピット長:44nm)
 (b) 434GB相当(トラックピッチ:80nm, 最短ピット長:40nm)
 (c) 510GB相当(トラックピッチ:70nm 最短ピット長:39nm)

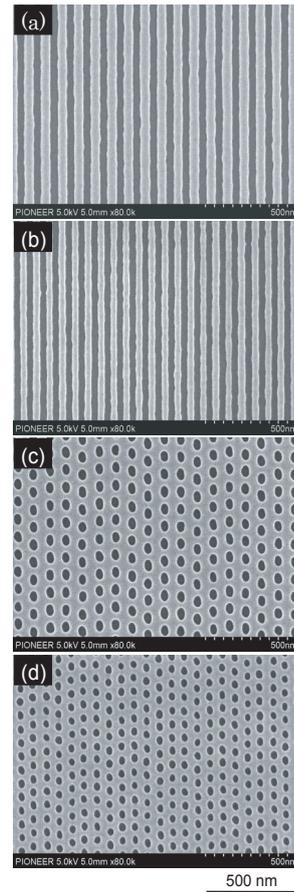


Fig.9 Superhigh-density patterns for next-generation magnetic disk.

(a) Line and space pattern of 90 nm pitch. (b) Line and space pattern of 70 nm pitch. (c) Dot pattern of 90 nm period. (d) Dot pattern of 70 nm period.

図9 超高密度磁気ディスク用パターンの描画例

(a)90nmピッチ溝パターン, (b)70nmピッチ溝パターン(c)90nmピッチドットパターン, (d)70nmピッチドットパターン

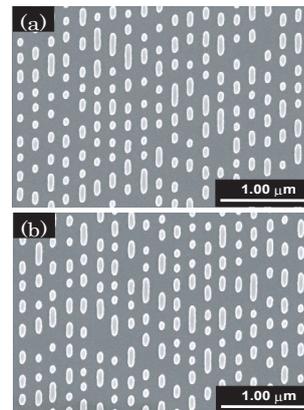


Fig.10 Pit pattern images of 100 GB stamper.

(a) Start position (22 mm radius). (b) End position (58 mm radius).

図10 100GB全面スタンプのSEM写真

(a) 描画開始部(半径22mm部), (b) 描画終了部(半径58mm部)

3.3 記録精度

記録位置精度の評価として、トラックピッチ精度の測定を行った。トラックピッチ 500nm のグルーブパターンを描画し、作製したマスタスタンプのトラックピッチを深紫外レーザー顕微鏡で測定した。測定結果を図 12 に示す。トラックピッチむらの標準偏差は 1.86nm であり、良好な記録位置精度が達成されている。

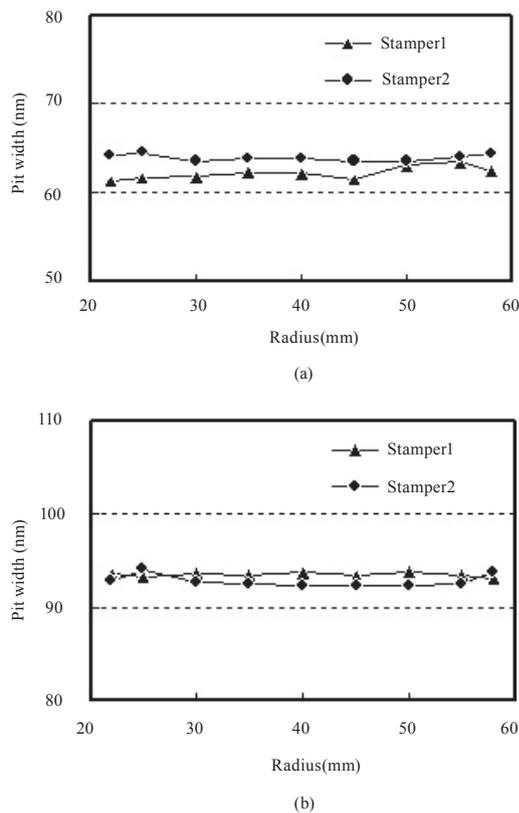


Fig.11 Pit size uniformity of 100 GB stamper.
(a) Pit widths of 7T marks. (b) Pit lengths of 3T marks.

図 11 100GB 全面スタンプのピットサイズ均一性

(a) 7 T マークのピット幅, (b) 3 T マークのピット長

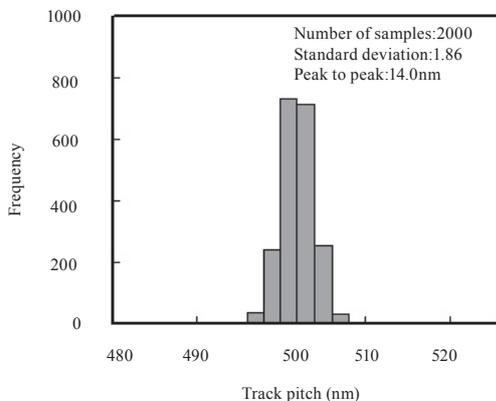


Fig.12 Deviation of track pitch.

図 12 トラックピッチむら精度

4. まとめ

ポスト B D 用高密度光ディスク媒体および、パターン磁気ディスク媒体のマスタリングに対応するため、高解像度型 E B R を開発した。電子ビームの集束特性とブランキング特性を改善することで、従来よりも微細なパターンの描画に対応可能とした。さらに、ダイナミックフォーカス制御システムと、定量的なビーム特性評価系を搭載し、安定で再現性の良い記録が実現した。本 E B R を用いた記録実験で、DVD 換算容量 510GB 相当の超高密度光ディスクパターンの記録を達成した。また、100GB 容量全面記録スタンプを作製し、良好な記録安定性を確認した。本技術は、パイオニア F A から販売される市販 E B R 装置に適用される。E B R は、次世代超高密度光ディスクやパターン磁気ディスク技術の開発の鍵となる装置として期待が大きい。今後、1Tbit/in² 級の記録密度を目指して、さらなる高解像度化、高精度化の開発を進めてゆく予定である。

参考文献

- (1) M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Kondo, A. Nakaoki, N. Ide, M. Furuki, M. Takeda, Y. Akiyama, T. Shimoura and M. Yamamoto: Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) 3537.
- (2) J. Tominaga, T. Nakano and N. Atoda: Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 2078.
- (3) Y. Soeno, M. Moriya, K. Ito, K. Hattori, A. Kaizu, T. Aoyama, M. Matsuzaki and H. Sakai: IEEE Trans. Magn. 39 (2003) 1967.
- (4) S. Y. Chou, M. S. Wei, P. R. Krauss and P. B. Fisher: J. Appl. Phys. 76 (1994) 6673.
- (5) Y. Kojima, H. Kitahara, O. Kasono, M. Katsumura and Y. Wada: Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) 2137.
- (6) Y. Wada, M. katsumura, Y. Kojima, H. Kitahara and T. Iida: Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 1653.
- (7) O. Kasono, M. Sato, T. Sugimoto, Y. Kojima and M. Kastumura: Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) 5078.
- (8) M. Katsumura, M. Sato, K. Hashimoto, Y. Hosoda, O. Kasono, H. Kitahara, M. Kobayashi, T. Iida and K. Kuriyama: Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) 3578.
- (9) H. Kitahara, Y. Kojima, M. Kobayashi, M. Katsumura, Y. Wada, T. Iida, K. Kuriyama and F. Yokogawa: Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) 1401.
- (10) M. Gesley and W. DeVore: J. Vac. Sci. & Technol. B 9 (1991) 2977.