

パターンメディア用 E B マスタリング装置のブランキングレス描画技術

宮崎 武司・林 國人・小林 一彦・久芳 幸夫・森田 久幸・二田 英之・大井 英之
株式会社クレステック、東京都八王子市大和田町 1-9-2 (〒192-0045)

Continuous R-Theta Stage Movement 100% Duty Cycle E-Beam Lithography to Fabricate Patterned Media

T.Miyazaki, K.Hayashi, K.Kobayashi, Y.Kuba, H.Morita, H.Nita, and H.Ohyi
Crestec Corporation, 1-9-2 Owada-machi, Hachioji-shi, Tokyo 192-0045, Japan

To fabricate master molds of high-density patterned media, we have developed a high-resolution and high-throughput r-theta stage electron beam mastering system. We accomplished the fabrication of discrete track media groove patterns with 45-nm track pitch, and also a dense bit array with both track and bit pitch of 35nm for bit patterned media under the conditions of a bit rate of 1.32 MHz/bit at 50-kV acceleration voltage. The high resolution and high throughput are derived from using a continuous stage movement blankingless beam shift lithography (BLSL) capability. BLSL is enabled by differentiated capabilities, such as an electron optical column that achieves a large beam current at a small beam diameter, and a friction-driven slider stage that provides a highly accurate positioning capability and a dynamic focus correction feature. The BLSL capability, working in conjunction with a flyback lithography (CSFL), is very effective for fabricating data and various kinds of servo pattern elements with a single pathway mode and ultra-fast flyback frequency of 20 MHz/bit.

Key words: electron beam mastering, flyback e-beam lithography, blankingless beam shift lithography, single pathway pattern writing, friction drive slider stage.

1. はじめに

次世代HDD技術として開発が進展しているディスクリットトラックメディア (DTM) によって 1.5 Tbits/inch² の記録密度が期待でき、ビットパターンメディア (BPM) においては、セルフアセンブリ (SA) 技術との組合せによって、10 Tbits/inch² の可能性があることが最近の学会で発表されている。^{(1) ~ (3)}

DTMは、垂直磁気記録のトラック間に溝を形成したものであり、BPMは超微小ビットの形成を、多量微小粒子から単一の大粒子に変換することによって超常磁性効果による情報の乱れを回避させ、面記録密度を大幅に増加させるメディア技術である。^{(2), (3)}

これらの技術開発によって、500 Gbits/inch² から 1 Tbit/inch² の小型高記録密度のHDDを2010年までにR&Dレベルで実現することを目指している。直動・回転 (r-θ) ステージ電子ビームマスタリング (EBR) 装置技術が、これらのDTMおよびBPMのマスターテンプレートを作成・生産するために、唯一の解を与えるものと期待されている。

しかし、従来のEBRのトラックピッチやビットピッチは、70 nm の解像度が限界であった。^{(4) ~ (8)}

本研究開発の目的は、極微細性を犠牲にせずに、高精度と高速性を両立させた EBR を開発し、70nm 以下

の解像度を持った、パターンメディアの原盤を作製することにある。⁽⁹⁾

特に BPM が持つ要求仕様を満足させるためには、LSI の微細化のロードマップを 10 年間も前倒した、非常に挑戦的な技術を必要としている。それらに対処するため、三種類の差別化されたハードウェア基盤技術の開発を行い、それらを最大限に生かした、100% ビームオン即ち、ブランキングレスによる新しい描画技術を開発したので報告する。

2. EBR機の基盤技術および新描画技術の概要

2.1 電子線鏡筒 (EOC)

Fig.1(a)-(c) に示すように、電子放出エミッタ直下に静電型プリコンデンサレンズを導入することによって、放射状に広がった電子軌道をレンズ作用によって平行ビーム軌道にすることができる。その結果、角電流密度を従来比で 10 倍に増大させることができた。⁽¹⁰⁾

仮想電子源の大きさを変えずに、ビーム電流を増加させたために、64 nm ビーム径の時に 400 nA、4 nm の時に 5 nA のビーム電流が得られた。これは、高解像度と高スループットを両立させるための必須技術である。

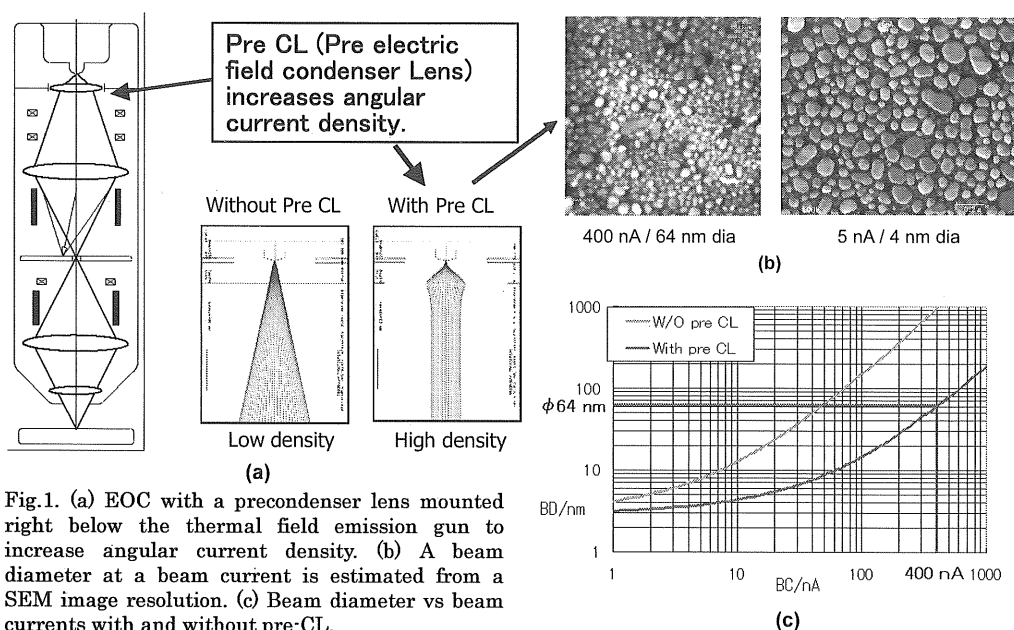


Fig.1. (a) EOC with a precondenser lens mounted right below the thermal field emission gun to increase angular current density. (b) A beam diameter at a beam current is estimated from a SEM image resolution. (c) Beam diameter vs beam currents with and without pre-CL.

2.2 摩擦駆動スライダーステージ

超高位置決め分解能と精度を持つ半径方向駆動スライダーステージは、高精度を維持しながら、連続的ステージ移動描画を実現できるため、スループットを最大化することができる。本ステージが持つ 0.28 nm の測定分解能と 2 nm (σ) の位置精度は、摩擦駆動方式を開発することによって実現できた。⁽¹¹⁾

これによって、 1 Tbit/inch^2 の記録密度を達成するために必要な、 25 nm のトラックピッチの加工をスライダーステージの連続移動によって可能にしている。この卓越した位置決め性能は、データ及びサーボパターンの連続且つ同時描画を可能にする基盤技術となっている。

2.3 高速応答ダイナミックフォーカスレンズ

超高分解能パターン描画を、記録領域全域に均一に行うためには、連続駆動されるマスター基板の全ての位置で、その表面上に、電子ビームのジャストフォーカスを保持しなければならない。そのために、磁界型対物レンズ主面上に、高速応答性を持つ電界型ダイナミックフォーカスレンズ (DFL) を設置した。この DFL によって、2つの物理現象によって引き起こされるデフォーカス状態を補正し、常に正焦点を維持しながら描画を実行できるようになった。

1 番目のデフォーカス現象は、基板の面振れによる高さ変動である。ハイトセンサによってリアルタイムで高さ測定を行い、定位置からの偏差量を算出して、DFL の駆動系にフィードバックして正焦点補正ができた。

2 番目の現象は、対物レンズ (OL) ボアの下面から基板表面までの間の Z 方向漏れ磁束密度の変動によ

って、ビーム焦点位置が Z 方向に変化するために、デフォーカスを引き起こすものである。この現象は、スライダーステージの移動に伴って、回転ステージ用モーターからの漏れ磁場を遮蔽する高透磁率材料が移動することにより、電子ビーム軌道近傍の磁束密度が変化することによって引き起こされることが判明した。これは、ビーム照射部や回転ステージ回転軸部は磁気シールドが不可能なために、両開口部間で磁路を形成する漏れ磁束が存在するために起こる現象であることが、実験で確認された。しかも、その主成分は Z 方向を向いている。そこで、R ステージ移動によって起こる磁束密度変化を計測し、それによって引き起こされるデフォーカス量の実験式を導き、ステージ位置に対応した補正量を DFL に与えることによって正焦点に自動補正することを試みた。

Fig.2(a) にステージ位置と Z 方向磁束密度変化の測定結果を示す。Fig.2(b) にステージ位置と電子ビームデフォーカス量の測定結果を示す。3 回の測定で再現性が高い現象であることが確認できた。以上の結果から、デフォーカス量の実験式を求め、(b) の実験値上に式から得られたカーブをオーバーラップさせたものを Fig.2(c) に示す。このようにして、ステージ移動に伴う、デフォーカス量の完全な補正が全描画領域でできるようになった。

2.4 ブランキングレス描画技術

前 3 節で示したハードウェアの要素を基盤技術にして、パターンメディアのデータおよびサーボパターンを高解像度・高精度・高速度で描画する 2 つの新ブランキングレス描画法を開発した。⁽¹²⁾

第 1 の方法は、「ステージ連続駆動フライバック描画

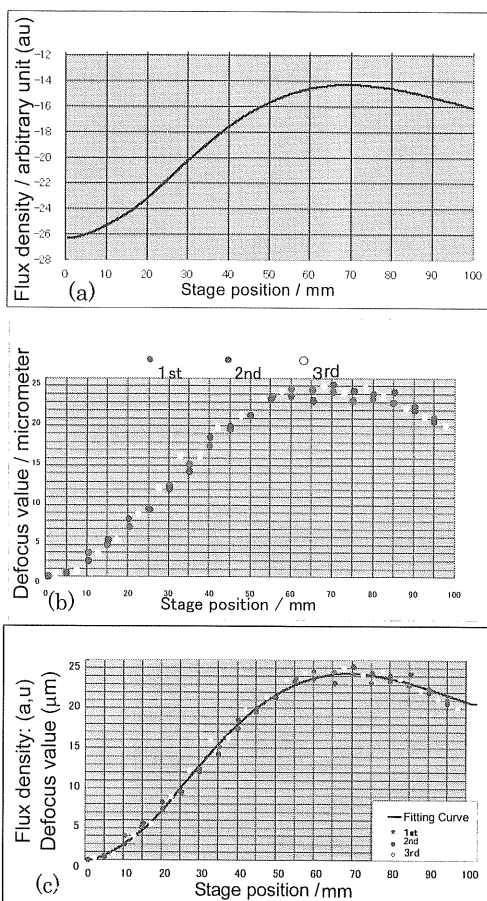


Fig.2. Relationship among the z-direction magnetic flux density, defocus value, and stage position. (a) Z direction magnetic flux density vs stage position. (b) Defocus value vs stage position. (c) Fitting curve vs defocus value.

技術 (CSFL)」と称し、BPMのビットアレイを効率よく描画する方法で、次のようなプロセスで行われる。

- (1) 100%ビーム・オンの状態で、回転ステージと等速度で電子ビームを回転方向にスキャンさせれば、ステージとビームは相対速度ゼロとなり、一点に静止した状態ができる。その結果、基板上のレジストにビットピッチ分移動する間に、適正ドーズで微小ビットを形成することができる。
- (2) ビットピッチ分移動したところで、ビームは急速度で原点に戻る動作を行う。この動作をフライバックと称する。この時、ビームの原点位置は、次のビット位置と一致している。
- (1)と(2)のプロセスを繰り返すことによって、円周上に整列させたビットアレイを描画することができる。

ビット間は、ビームが高速移動するために、描画されない。電子ビームは±(回転方向)と±(半径方向)に偏向走査させることができるので、シングルパス、且つブランキングレスの状態でも種類のサーボパターン要素を描画できる。

第2の方法は、「ステージ連続運動ブランキングレスビームシフト描画技術(BLSL)」と称するもので、ステージが1回転する間に、複数トラック分のパターンを、ビームを半径方向に高速でスキャンすることによってブランキングレスでドットパターンを描画する技術である。回転および半径の両方向にビームを偏向することによって2トラック分のグループを基板が1回転する間に描画することも可能である。

一方、ブランキング機能のみによって、BPMのビットアレイパターンを高解像度で、高速に描画することは、ビット形状の歪や位置精度の劣化を伴うため困難である。それは、偏向器より高電圧のオン・オフによるリンキングの発生、ストップング絞りのチャージアップや熱変動、偏向器より低いブランキング電極の応答性などに原因があるからである。

結果的にブランキングは、相対的に長距離にわたってパターン描画がない領域に対してのみ使用することが効率的描画法である。

3. 実験結果および考察

3.1 DTMマスターテンプレート用グループ描画

前章で示した新機能を有するEBR実験機によって、DTMマスターテンプレート用狭トラックピッチグループ描画を試みた。Fig.3(a), (b)および(c)に示されているように、トラックピッチ(TP)が80, 60および45 nmを持つグループパターンで、ビーム電流は3 nA、線ドーズ量は、0.21, 0.35および0.36 nC/cmがそれぞれ使われた。加速電圧(Vacc)は50 kV、レジストは厚さ75 nmのZEP520であった。すべてのパターンは、シングルパス描画を使用し、20, 15および9.6 nmの狭グループ幅がそれぞれ得られた。現状では、45 nm TP以下では解像が困難であった。この場合、ビーム径は3.5 nmであるため、グループ幅の微細化については、ビーム電流強度やビーム径ではなく、主に電子ビームレジストの解像度が律速条件になっているものと推測される。それ故に、より狭トラックピッチおよび狭グループの描画を行うためには、より高解像度のレジストが要求される。

3.2 BPMマスター用ビットアレイ描画

50 nmと35 nmのトラックおよびビットピッチを持つBPMビットアレイのSEMイメージをFig.4(a),(b)に示す。35 nmピッチパターンは、本実験機の現状での最高解像度であり、CSFL機能で描画した結果である。描画条件は、Vaccが50 kV、ビーム電流3 nA、

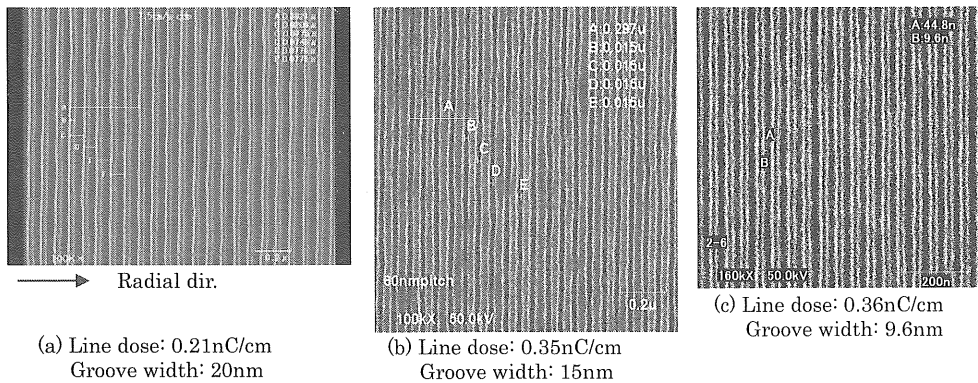


Fig.3 Results of DTM groove writes to evaluate resolutions: (a) 80nm pitch, (b) 60nm pitch and (c) 45nm pitch. Common write conditions: V_{acc} of 50kV, Beam current of 3nA, 75nm thick ZEP520 resist, and write mode of CLV.

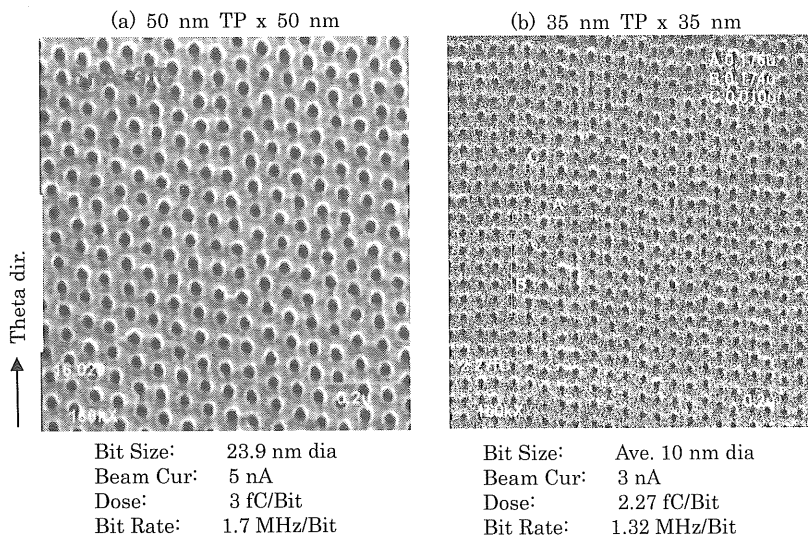


Fig.4 Results of BPM bit array writes using the CSFL capability.

(a) High-throughput fabrication for 50nm period with bit rate of 1.7 MHz.

(b) High-resolution pattern write for 35 nm period with bit rate of 1.32 MHz.

Common write conditions were V_{acc} of 50 kV, 75 nm thick PMMA resist and write mode of CLV.

ビットレートは 1.32 MHz/bit、レジストは 75 nm 厚の PMMA で、ビット当りのドーズは、2.27 fC/bit であった。これは、500 Gbits/inch² の記録密度に相当する。

現在、1 Tbit/inch² の記録密度に相当するビットアレイ描画の条件出しのための実験を継続している。概ね対応策の見通しが立った状況にある。

3.3 データおよびサーボパターンの一括描画

CSFL と BLSL を使って、データおよびサーボパターン要素の同時一括描画した結果の SEM イメージを Fig.5(a) - (d) に示す。これらは、シングルパスで (a) グループとビット、(b) 相互に直交するグループ、(c) 異ドーズ量を持つ異線長ビット群、および (d) 1 回転当

り 2 トラック上に、一定ドーズ量で加工された異線長ビットを示している。Fig.5(a)-(c) は CSFL で、Fig.5(d) は BLSL で描画されたものである。

3.4 2.5 インチディスク全面連続描画

Fig.6 は 2.5 インチディスクへ、ピッチ 70 nm、ビット径 30 nm の BPM ビットアレイを全面描画した例である。描画速度は、1.78 MHz/bit で、内径 10 mm から外径 68.9 mm 全域に約 7,457 億個のビットを均一に形成できた。全描画時間は 116H かかっているが描き始めの (No.1) のビット形状と描き終りの (No.10) のビット形状はほぼ同一で、生産機レベルの高安定性を示している

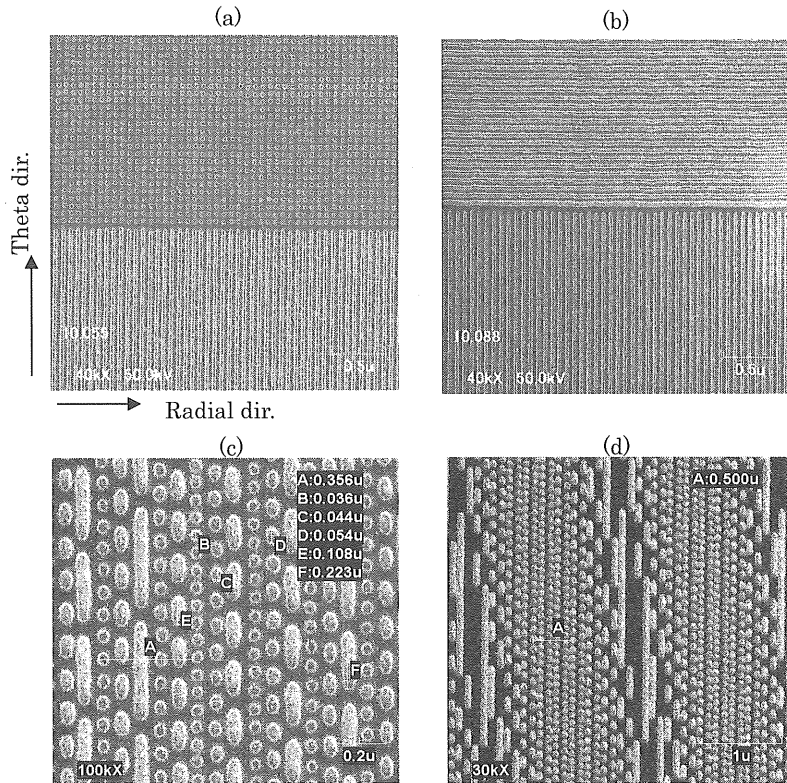


Fig.5 Data and servo pattern element writes using the CSFL and BLSL functions. (a) Groove and dot, (b) Groove and right angled groove, (c) Different-length pits with various doses, (d) Simultaneous pit writes in dual tracks per revolution.

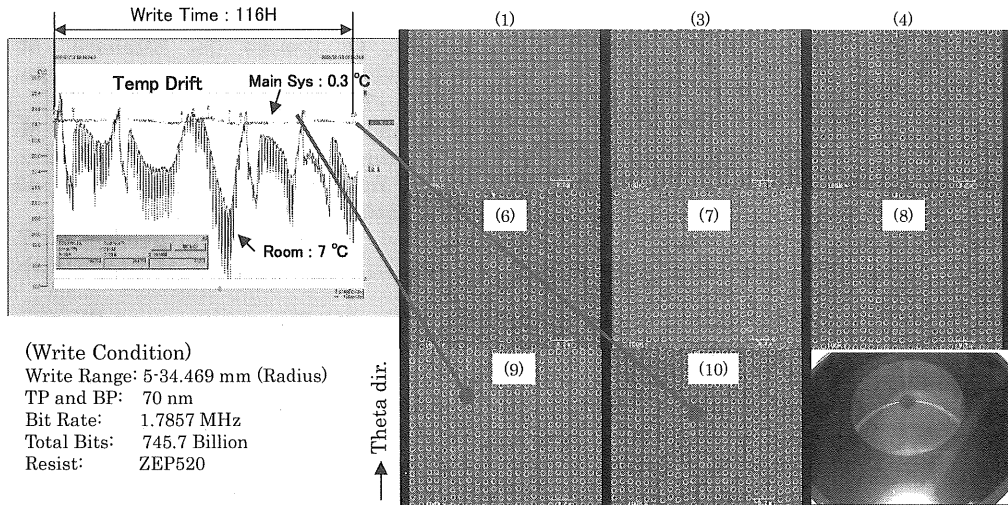


Fig.6 Evaluation results for continuous long-period lithography with TP and BP of 70 nm for full patterned area between 5 and 34.469 mm radii for a write time of 116 hours with a good pattern uniformity.

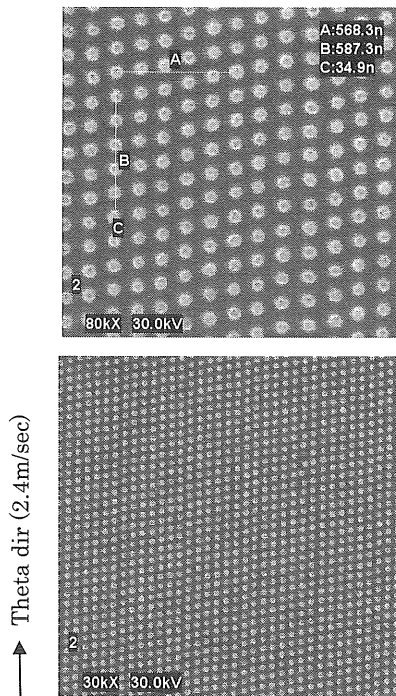


Fig.7 High-throughput performances by using the CSFL capability having the ultra-fast flyback frequency of 20MHz/bit to fabricate a BPM bit array with pitches of 120nm and bit sizes of 35nm under the conditions of beam current of 100nA, a line velocity of 2,400mm/sec and a maximum stage rotation speed of 1,082rpm.

ことが確認できた。

電子照射系、加工室、ステージを含むメインシステムは、パーマロイボックスで囲いサーマルコントローラで、 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内の温度変動に安定化されている。本実験は、クリーンルームの温度変動が $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$ あり、劣悪ともいえる環境の中で行われたものである。

このことは、温度変動が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度の生産現場であれば、実際にDTMやBPMのマスターテンプレート製品を高安定で加工するのに十分な装置性能を所有していることを示唆している。

3.5 高ビットレートCSFL描画

更に高スループットを目指して20MHz/bitフライバック周波数による120nmピッチ、35nmビット径のBPMビットアレイ描画を行った。ビーム電流は100nA、線速度2,400mm/secおよび1,082rpmの最速回転速度による加工であったために、2.5インチ全域を1日以内に均一に描画することが確認できた。

Fig.7に描画結果のSEM像を示す。

4. まとめ

新しい2種類のブランキングレス描画技術である、「ステージ連続駆動フライバック描画」、「ステージ連続駆動ブランキングレスビームシフト描画」を使って、DTMやBPMのグループ、ビットアレイおよびサーボパターンをシングルパスで、高解像度、高スループット及び、高安定度で描画できることを確認した。本開発により、 $1\text{Tbit}/\text{in}^2$ の記録密度を持つBPMパターンを高TATで描画する生産機の見通しが立った。

謝辞：本研究開発は、株式会社リコーとの共同開発によって行われたものであり、関係者の皆様に謝意を表します。

引用文献

- (1) T.R.Albrecht, EIPBN (2008) (unpublished).
- (2) Y. Soeno, M. Moriya, K. Ito, K. Hattori, A. Kaizu, T. Aoyama, M. Matsuzaki, and H. Sakai: IEEE Trans. Magn. 39 (2003) 1967.
- (3) S. Y. Chou, M. S. Wei, P. R. Krauss, and P. B. Fisher: J. Appl. Phys. 76 (1994) 6673.
- (4) Y. Kojima, H. Kitahara, O. Kasono, M. Katsumura, and Y. Wada: Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) 2137.
- (5) Y. Wada, M. Katsumura, Y. Kojima, H. Kitahara, and T. Iida: Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 1653.
- (6) O. Kasono, M. Sato, T. Sugimoto, Y. Kojima, and M. Katsumura: Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) 5078.
- (7) 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.
- (8) H. Kitahara, Y. Kojima, M. Kobayashi, M. Katsumura, Y. Wada, T. Iida, K. Kuriyama, and F. Yokogawa: Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) 1401.
- (9) H. Ohyi, K. Hayashi, K. Kobayashi, T. Miyazaki, Y. Kuba, and H. Morita, EIPBN (2007)
- (10) S. Fujita, H. Shimoyama, J. of Electron Microscopy 54(5): 413-427(2005)
- (11) H. Miyata, H. Endo, S. Fujita, H. Watanabe, T. Obara, N. Murayama, and O. Mizuta, Ricoh Technical Report No.29, 63-67 (2003) (In Japanese).
- (12) T. Miyazaki, K. Hayashi, K. Kobayashi, Y. Kuba, H. Ohyi, T. Obara, O. Mizuta, N. Murayama, N. Tanaka, Y. Kawamura and H. Uemoto, J. Vac. Sci. Technol. B 26(6), Nov/Dec 2008, 2611-2618.

2009年2月16日受理