

## 規則合金膜へのイオン照射による磁気特性制御とビットパターン構造の作製

大島 大輝<sup>†</sup> 谷本 昌大<sup>†</sup> 加藤 剛志<sup>†</sup> 岩田 聡<sup>†</sup> 綱島 滋<sup>‡</sup><sup>†</sup>名古屋大学工学部 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町<sup>‡</sup>名古屋産業科学研究所 〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄 2-10-19E-mail: <sup>†</sup>{d\_osima, tanimoto, takeshik, iwata}@nuee.nagoya-u.ac.jp, <sup>‡</sup>s.tsuna@amail.plala.or.jp

あらまし 我々はこれまでに、 $L_{12}$ -CrPt<sub>3</sub> 規則合金膜に 30 keV の Kr<sup>+</sup> イオン照射を行うことでその磁気特性が容易に制御できること、および CrPt<sub>3</sub> を用いて高密度イオン照射型ビットパターン膜が作製できることを示してきた。本報告では、これらをまとめるとともに、 $L_{12}$ -CrPt<sub>3</sub> の最大の課題である生成温度の高さ (850 °C) を解決するために、比較的低温で作製できる Mn 系規則合金について検討した結果を述べる。これらの合金膜にイオン照射したところ、CrPt<sub>3</sub> と同様、低ドーズ量での非磁性化を確認し、Mn 系材料においても高密度なパターンが作製できるものと考えられる。

キーワード ビットパターン媒体, イオン照射, CrPt<sub>3</sub>, MnAl, MnGa

## Control of magnetism of ordered alloys by ion irradiation and fabrication of ion beam patterned structures

Daiki OSHIMA<sup>†</sup> Masahiro TANIMOTO<sup>†</sup> Takeshi KATO<sup>†</sup> Satoshi IWATA<sup>†</sup>  
and Shigeru TSUNASHIMA<sup>†</sup><sup>†</sup> School of Engineering, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603 Japan<sup>‡</sup> Nagoya Industrial Science Research Institution 2-10-19 Sakae, Naka-ku, Nagoya, Aichi 460-0008 JapanE-mail: <sup>†</sup>{d\_osima, tanimoto, takeshik, iwata}@nuee.nagoya-u.ac.jp, <sup>‡</sup>s.tsuna@amail.plala.or.jp

**Abstract** We have reported that low dose ion irradiation of 30 keV Kr<sup>+</sup> alters magnetic properties of  $L_{12}$ -CrPt<sub>3</sub> ordered alloy films and that high-density ion irradiated bit patterned film is fabricated by using the CrPt<sub>3</sub>. In this report, we summarize these results and discuss Mn based ordered alloys as alternative materials since the Mn based alloys are synthesized at relatively low temperatures compared to  $L_{12}$ -CrPt<sub>3</sub> (850 °C). We confirmed that the ion irradiation is effective to control the magnetic properties of the Mn based alloys. This suggests the possibility of the high-density bit patterned films using the Mn based alloys.

**Keyword** Bit patterned media, Ion irradiation, CrPt<sub>3</sub>, MnAl, MnGa

## 1. はじめに

ハードディスクドライブ (HDD) の記録媒体に現在使用されている微粒子媒体では、記録密度の限界は 1 Tbit/in<sup>2</sup> 程度と言われている。その限界を超えるものの 1 つとして注目されているのがビットパターン媒体 (BPM) である。BPM は一般に媒体を物理的にエッチングしビットを定義することで作製されるが[1], この方法では媒体表面の平坦性が悪化し、磁気ヘッドの安定浮上の妨げになるため、平坦化プロセスが必要となる。それに対し、イオンを局所的に照射し、表面をエッチングすることなく磁気的にパターンするイオン照射型の BPM が提案されている[2]。媒体の一部を物理

的に除去せずに済むため、表面平坦性に優れた媒体を作製することが可能であり、さらに、プロセス数を少なくできるため、より安価に作製できることが期待できる。これまで、Co/Pt [2-5] や Co/Pd [6,7] 多層膜にイオンを照射し磁気特性の制御を試みた報告があるが、イオン照射のみでは非磁性化が容易ではなく、ビット間の磁氣的結合が切れないという問題がある[7]。

CrPt<sub>3</sub> 合金は  $L_{12}$  規則相のときに強磁性となり、A1 不規則相のときに非磁性となる特徴を持つ。また、CrPt<sub>3</sub> 規則合金膜は大きな垂直磁気異方性を示す[8]。これまで我々は、この  $L_{12}$ -CrPt<sub>3</sub> 規則合金膜に Kr<sup>+</sup> イオン照射を行うことでその磁気特性が容易に制御できる

こと、および CrPt<sub>3</sub> を用い高密度イオン照射型ビットパターン膜が作製できることを示してきた[9,10]. 本報告ではこれらをまとめるとともに L1<sub>2</sub>-CrPt<sub>3</sub> の最大の課題である生成温度の高さ (850 °C) を避けるために検討している Mn 系材料の実験結果を述べる. これまで Mn 系材料として MnBi [11], MnBiCu [11], MnAl, MnGa を検討したが, これらは全て 300 ~ 400 °C の温度で作製できる. 今回はその中で MnAl, MnGa について得られた最近の結果を紹介する. MnAl [12] と MnGa [13] は L1<sub>0</sub> 規則相のときに強磁性となり不規則相のときに非磁性となるという CrPt<sub>3</sub> と似た特徴を示す. このため, CrPt<sub>3</sub> と同様に Kr<sup>+</sup>イオンを照射することで容易に磁気特性の制御ができるものと期待される.

## 2. 実験方法

熱酸化膜付き Si 基板上にマグネトロンスパッタ法により Cr と Pt を交互製膜した Cr/Pt 多層膜 (20 nm) を真空中において 850 °C で 15 min 熱処理することで L1<sub>2</sub>-CrPt<sub>3</sub> 合金膜を作製した. その後, イオン注入装置を用い, Kr<sup>+</sup>イオンを照射した. ビットパターンは, 電子ビーム (EB) 露光により形成した ZEP520A レジストパターンをマスクとして 30 keV の Kr<sup>+</sup>イオンを一様に照射し, 最後にレジストを剥離することで作製した.

イオン照射/非照射の境界観察するために, 分子線エピタキシー (MBE) 法により MgO (001)基板上に L1<sub>2</sub>-CrPt<sub>3</sub> (001)配向膜 (20 nm) を作製した. MgO (001)基板を 650 °C に加熱し Cr と Pt を同時蒸着し, 蒸着後その場で 850 °C で 5min 熱処理を行った. その後, ライン状のレジストパターンマスクを作製し, 上述のようにマスクを通して 30 keV の Kr<sup>+</sup>イオンを一様に照射した. そこから断面観察用の試料を集束イオンビーム (FIB) により切り出し, 透過電子顕微鏡 (TEM) を用いてパターン断面を観察した.

MnAl や MnGa については, 基板に MgO (001)を用い, RF マグネトロンスパッタにより Cr (3 nm) / MnAl or MnGa (15 nm) / Cr (20 nm) / MgO sub. を作製した. 下地の Cr は 600 °C の加熱基板上に堆積させた. その後, MnAl は温度  $T_s$  (200 ~ 600 °C) の加熱基板上で堆積させた. MnGa については室温で堆積させた後, 温度  $T_a$  (300 ~ 500 °C) で熱処理した. 成膜後, CrPt<sub>3</sub> の場合と同様に, イオン注入装置を用い 30 keV の Kr<sup>+</sup>イオンを照射した.

磁気特性は交番磁界型磁力計 (AGM), 結晶構造は X 線回折 (XRD) により測定した. パターン膜の表面構造は原子間力顕微鏡 (AFM), 磁区構造は磁気力顕微鏡 (MFM) により観察した.

## 3. 実験結果

### 3.1 イオン照射による CrPt<sub>3</sub> 膜の磁性制御

熱酸化膜付き Si 基板上に成膜した L1<sub>2</sub>-CrPt<sub>3</sub> 合金膜の飽和磁化  $M_s$  は 230 emu/cc, 保磁力  $H_c$  は約 10 kOe であった. トルク磁力計により, 垂直磁気異方性定数  $K_u$  は  $5 \times 10^6$  erg/cc と見積もられ, 高い垂直磁気異方性を示している. 図 1 は L1<sub>2</sub>-CrPt<sub>3</sub> 規則合金膜に対し 30 keV の Kr<sup>+</sup>イオンを照射したときの  $M_s$ ,  $H_c$  の照射量依存性を示したものである[9].  $5 \times 10^{12}$  ions/cm<sup>2</sup> の照射量から  $M_s$ ,  $H_c$  とも徐々に減少し,  $2 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> の照射量で  $M_s$ ,  $H_c$  が消失し完全に非磁性化されていることがわかる. AFM により, この程度の照射量では表面はほとんど削られていないことがわかっており, イオン照射によりパターン構造を作製した際, 表面平坦性に優れた媒体を作製できることを示している. 図 2 に Kr<sup>+</sup>イオン  $2 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射前後の X 線回折プロファイルを示す[10]. 図 2 (a), (c) は膜法線方向の構造, 図 2 (b), (d) は膜面内方向のプロファイルである. 図 2 (a) に示すように熱酸化膜付き Si 基板上に作製した CrPt<sub>3</sub> は (111) 方向に強く配向している. これは図 2 (c) に示すようにイオン照射後においても変化していないことがわかる. 図 2 (b) に示すようにイオン照射前 (熱処理後) では, L1<sub>2</sub> 規則相の生成を示す 110, 211 規則格子線が明瞭に観察されている. 110 規則格子線と 220 基本線から規則度は 0.9 と見積もられ, ほぼ完全に規則化した CrPt<sub>3</sub> が得られていることがわかる.  $2 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> の Kr<sup>+</sup>イオン照射後では, 図 2 (d) に示すように, 220 基本線が残っているものの, 110, 211 規則格子線は消失しており, 不規則化していることがわかる. これは, イオン照射により L1<sub>2</sub> 規則相から A1 不規則相へと変化したことを示しており, イオン照射による磁化消失はこの相変化が原因であるとことを示している.

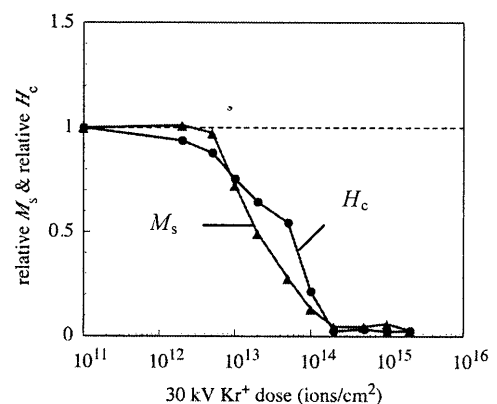


図 1 CrPt<sub>3</sub> 合金膜の飽和磁化  $M_s$  と保磁力  $H_c$  の 30 keV Kr<sup>+</sup>イオン照射量依存性[9]

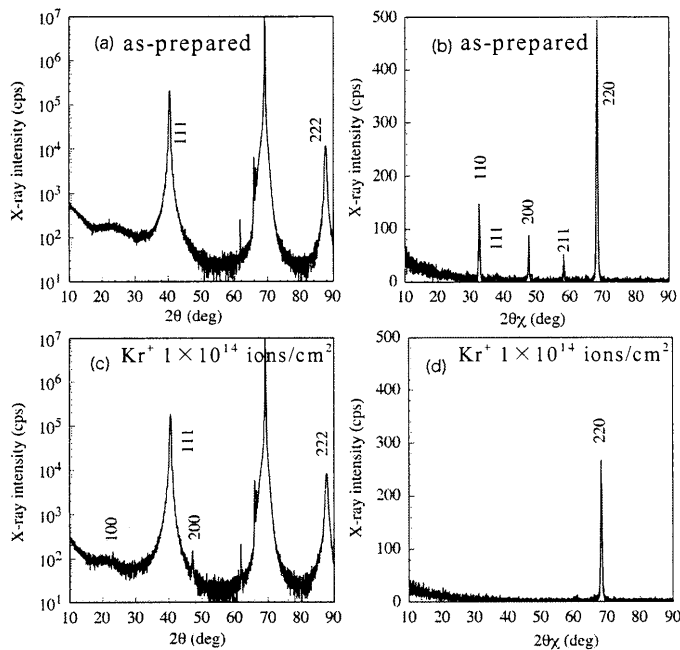


図2 30 keV  $\text{Kr}^+$ イオン  $2 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射前後の XRD 回折プロファイル. (a), (b)は照射前, (c), (d)は照射後のプロファイルを示す. (a), (c)は膜面直方向, (b), (d)は膜面内方向のプロファイルを示す. [10]

### 3.2 イオン照射型 $\text{CrPt}_3$ パターン膜

$\text{L}_{12}$ - $\text{CrPt}_3$  膜上に EB 露光により形成したレジストパターンマスクを通して 30 keV の  $\text{Kr}^+$ イオンを  $2 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射し, ビットパターン膜を作製した. 図3に 100 nm ピッチのビットパターン膜の MFM 像を示す [14]. 図3に示すように, ビット領域 (非照射領域) において明瞭な磁気コントラストが確認され, それ以外の領域 (照射領域) ではコントラストが消失していることが確認できる. ビットサイズが小さいためビット内では単磁区構造となっている. AFM により, ビットの構造に対応するような凹凸は見られず, 非常に平坦な表面構造が得られていることを確認している. このように, イオン照射により膜表面を削ることなく磁気的に微細なパターンニングができていることを確認しているが, これ以下のサイズについては EB 露光によるレジストパターンが形成できなかったために作製できていない. ナノインプリントなどの適用により, より微細なビットパターンが作製できるものと考えている.

イオン照射型パターン媒体でどこまで微細なパターンを作製できるかを検討するうえで, 現在用いている MFM では解像度が足りず評価できないことが予想される.  $\text{CrPt}_3$  は結晶構造により磁性が変化するため, ある領域の結晶構造を特定することによりその領域の

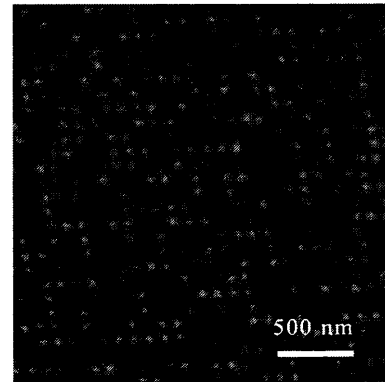


図3 30 keV  $\text{Kr}^+$ イオン照射により作製した 100 nm ピッチの  $\text{CrPt}_3$  ビットパターン膜の MFM 像 [14]

磁性が確認できると考えられる. そこで MFM よりも高い解像度で解析が可能な TEM を用いてパターン膜のビット端の観察を試みた. 図4は  $\text{CrPt}_3$  (001)配向膜を用いて 400 nm ピッチのラインパターンを作製し, FIB によりサンプルを切り出し, 断面を観察した結果である [15]. 図4(a)は明視野像であり, 下から,  $\text{MgO}$  基板,  $\text{CrPt}_3$  合金膜, レジスト (点線内), さらにその上から FIB で切り出すときの保護として堆積させた Al および C が確認できる. この図の上部からイオンが入射しているため, レジストマスクで覆われていない箇所の  $\text{CrPt}_3$  にイオンが照射されている. 前述したようにイオン照射, 非照射の領域の  $\text{CrPt}_3$  の膜厚に差はなく非常に平坦なパターンができていていることがわかる. 図4(b)は  $\text{CrPt}_3$  合金膜付近に電子線を当てて得られた制限視野回折図形である. このとき, 不必要な回折スポットを減らすため試料はわずかに傾けてある. 一番明るく輝いているスポットが  $\text{MgO}$  基板のものであり, それらとなりに  $\text{CrPt}_3$  200 や 400 のスポットが存在している.  $\text{MgO}$  のスポットの間に  $\text{L}_{12}$  規則相に由来する  $\text{CrPt}_3$  100 および 300 が見られる. それ以外に多く見られるスポットは多結晶 Al のものと考えられる. 図4(c)は,  $\text{CrPt}_3$  100 スポットを含むように対物絞り (図4(b)中の破線で示す) を入れて結像した暗視野像である.  $\text{CrPt}_3$  100 スポットは  $\text{L}_{12}$  規則相となっている領域からしか得られないので, 暗視野像においては  $\text{L}_{12}$  規則相の領域のみ観察されると考えられる. 対物絞りがそれほど小さくなく (図4(b)),  $\text{CrPt}_3$  100 以外のスポットも若干含んでいるため全体的に明るくなっているが, 図4(c)を見ると,  $\text{CrPt}_3$  合金膜中において, レジストで保護された  $\text{L}_{12}$  規則相の領域が明るくなっており, 反対にイオンが照射されて Al 不規則相となっている

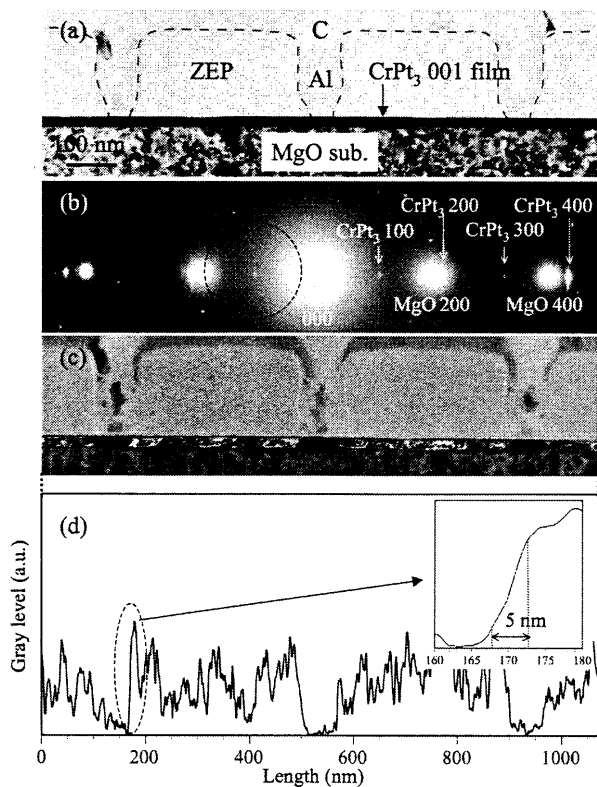


図4 400 nm ピッチ CrPt<sub>3</sub> ラインパターンの断面 TEM 像. (a) 明視野像, (b) 電子回折図形, (c) CrPt<sub>3</sub> 100 スポットに対物絞りをいれて結像した暗視野像. (d) 図(c)中の CrPt<sub>3</sub> 膜に沿ってとったラインプロファイル. [15]

領域が暗くなっていることがわかる. ここで, CrPt<sub>3</sub> 合金膜に沿ってラインプロファイルを図4(d)のようにとり, L<sub>12</sub>規則相から Al 不規則相への遷移幅を測定した. 様々な場所で遷移幅を見積もると, その平均値は約 5 nm であった. これより, ビット (強磁性, イオン非照射領域) とスペース (非磁性, イオン照射領域) 間の遷移幅は 5 nm と非常に小さいことがわかる. TRIM コードシミュレーション[16]によれば, 30 keV の Kr<sup>+</sup>イオンを CrPt<sub>3</sub> に注入した場合, 膜面内方向のイオンの広がり平均で 5 nm と計算される. これは TEM により求めた遷移幅と一致するものである. このことから, シミュレーションにより求めたイオンの広がりイオン照射によりできる遷移幅には関連があると示唆される. TRIM コードシミュレーションから, イオンを 30 keV Kr<sup>+</sup>から 5 keV Xe<sup>+</sup>にすることで, CrPt<sub>3</sub> 合金膜の厚さを薄くする必要があるものの, 遷移幅を約 1 nm 程度まで狭くすることができると計算された. この 1 nm という値は, ビットのアスペクト比を 1 とした場合, 5 Tbit/in<sup>2</sup> の記録密度を達成できる値であり, 本方式により超高密度で平坦なビットパターン媒体が

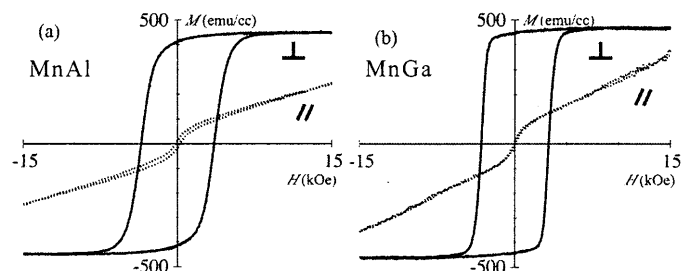


図5 (a) MnAl, (b) MnGa 規則合金膜の  $M$ - $H$  ループ. 実線は膜面直方向, 点線は膜面内方向のループを示す.

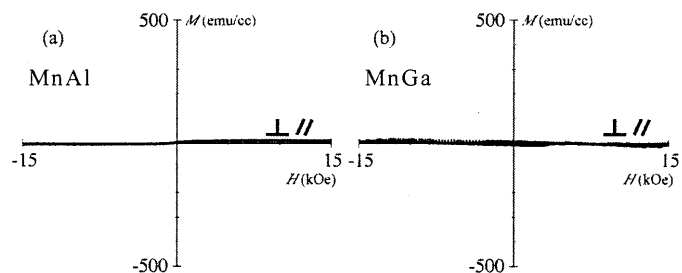


図6 (a) MnAl, (b) MnGa 合金膜の 30 keV Kr<sup>+</sup>イオン照射後の  $M$ - $H$  ループ. 実線は膜面直方向, 点線は膜面内方向のループを示す.

作製できるものと期待される.

### 3.3 MnAl, MnGa 膜へのイオン照射

最後に, CrPt<sub>3</sub> よりも低温で作製可能な MnAl および MnGa について検討した結果を示す. 図5(a)は  $T_s = 600$  °C で作製した MnAl 合金膜の  $M$ - $H$  ループ, 図5(b)は  $T_a = 400$  °C で作製した MnGa 合金膜の  $M$ - $H$  ループを示している. MnAl 合金膜は  $M_s = 450$  emu/cc,  $H_c = 3.5$  kOe, MnGa 合金膜は  $M_s = 450$  emu/cc,  $H_c = 3$  kOe をそれぞれ示し, 大きな垂直磁気異方性を持っていることがわかる. XRD により結晶構造を解析すると, 両者とも強磁性を示す L<sub>10</sub> 規則相となっており, 001 配向していることがわかった. これら 2 つの膜に対し, CrPt<sub>3</sub> と同様に 30 keV Kr<sup>+</sup>イオンを照射し, 磁気特性の制御を試みた. 図6に Kr<sup>+</sup>イオン  $1 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射後の (a) MnAl および (b) MnGa の  $M$ - $H$  ループを示す. 両者とも  $1 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> のイオン照射で完全に非磁性化していることがわかる. MnAl については,  $M_s$ ,  $H_c$  は照射量とともに徐々に減少し, 照射量が  $1 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> のとき完全に磁化が消失した. これは CrPt<sub>3</sub> と同様の結果である. しかし, MnGa に関しては,  $M_s$  は照射量とともに徐々に減少するが,  $H_c$  は  $1 \times 10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> まではほとんど変化せず, そこから急激に減少し,  $1 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> の照射量で  $M_s$ ,  $H_c$  ともにゼロとなった. この急峻な  $H_c$  の減少の理由はわかっていないが, これ

は BPM を作製する場合、非常にシャープなビット-スペース遷移領域が期待できることを意味する。この  $M_s$ ,  $H_c$  のイオン照射量依存性およびイオン照射による MnAl ビットパターン膜の作製などの詳細は講演時に述べる。

#### 4. まとめ

超高密度イオン照射型 BPM の作製を目指して、イオン照射による  $L1_2$ -CrPt<sub>3</sub> 規則合金膜の磁性制御とパターン構造の作製についてまとめた。CrPt<sub>3</sub> が 30 keV Kr<sup>+</sup>イオン照射により  $L1_2$  規則相から A1 不規則相に相変化することで、強磁性から非磁性へと変化し、照射量が  $2 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> のときに完全に非磁性化する。そこで、イオン照射を用いてビットパターン膜を作製したところ、100 nm ピッチのパターンまで作製できることを MFM により確認した。TEM によりビット境界を観察することで、遷移領域幅を見積もると、ビット-スペース遷移幅は平均で 5 nm と非常に狭いことがわかった。この遷移幅は入射イオンを 30 keV Kr<sup>+</sup> から 5 keV Xe<sup>+</sup> へと変更することによって、1 nm 程度まで狭くできる可能性がある。この 1 nm という値は 5 Tbit/in<sup>2</sup> の記録密度が達成できる値であり、CrPt<sub>3</sub> 合金膜を用いて非常に高密度なイオン照射型 BPM が得られる可能性がある。また、比較的低温で作製可能な MnAl や MnGa といった規則合金にも着目し、CrPt<sub>3</sub> と同様にイオン照射を行った。MnAl, MnGa とともに照射前は  $L1_0$  構造を持ち大きな垂直磁気異方性を示すが、 $1 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 程度の照射により磁化が消失することがわかった。これは CrPt<sub>3</sub> と同様の結果であり、これらの膜においてもイオン照射により微細な磁気パターンが作製できると期待される。Mn 系材料は CrPt<sub>3</sub> よりも低温で作製できることから、より実用的な材料と言える。

#### 謝 辞

実験を補助頂いた名古屋大学熊澤正幸氏に感謝致します。本研究の一部は JST 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) および (財) 立松財団の支援のもとに行われた。

#### 文 献

- [1] A. Kikitsu, Y. Kamata, M. Sakurai, and K. Naito, "Recent Progress of Patterned Media," IEEE Trans. Magn., vol. 43, pp. 3685-3688 (2007).
- [2] C. Chappert, H. Bernas, J. Ferré, V. Kottler, J.-P. Jamet, Y. Chen, E. Cambril, T. Devolder, F. Rousseaux, V. Mathet, and H. Launois, "Planar Patterned Magnetic Media Obtained by Ion Irradiation," Science, vol. 280, pp. 1919-1922 (1998).
- [3] B.D. Terris, L. Folks, D. Weller, J.E.E. Baglin, J. Kellock, H. Rothuizen, and P. Vettiger, "Ion-beam patterning of magnetic films using stencil masks," Appl. Phys. Lett., vol. 75, pp. 403-405 (1999).
- [4] J. Ferré, C. Chappert, H. Bernas, J.-P. Jamet, P. Meyer, O. Kaitasov, S. Lemerle, V. Mathet, F. Rousseaux, H. Launois, "Irradiation induced effects on magnetic properties of Pt/Co/Pt ultrathin films," J. Magn. Mater., vols. 198-199, pp. 191-193 (1999).
- [5] R. Hyndman, P. Warin, J. Gierak, J. Ferre, J. N. Chapman, J.-P. Jamet, V. Mathet, C. Chappert, "Modification of Co/Pt multilayers by gallium irradiation - Part 1: The effect on structural and magnetic properties," J. Appl. Phys., vol. 90, pp. 3843-3849 (2001).
- [6] E. Suharyadi, S. Natsume, T. Kato, S. Tsunashima, S. Iwata, "Microstructure and magnetic properties of the FIB irradiated Co/Pd multilayer films," IEEE Trans. Magn., vol. 41, pp. 3595-3597 (2005).
- [7] E. Suharyadi, T. Kato, S. Tsunashima, and S. Iwata, "Magnetic Properties of Patterned Co/Pd Nanostructures by E-Beam Lithography and Ga Ion Irradiation," IEEE Trans. Magn., vol. 42, pp. 2972-2974 (2006).
- [8] J. Cho, M. Park, H.-S. Kim, T. Kato, S. Iwata, and S. Tsunashima, "Large Kerr rotation in ordered CrPt<sub>3</sub> films," J. Appl. Phys., vol. 86, pp. 3149-3151 (1999).
- [9] T. Kato, S. Iwata, Y. Yamauchi, S. Tsunashima, K. Matsumoto, T. Morikawa, and K. Ozaki, "Planar patterned media fabricated by ion irradiation into CrPt<sub>3</sub> ordered alloy films," J. Appl. Phys., vol. 105, 07C117 (2009).
- [10] T. Kato, S. Iwata, Y. Yamauchi, and S. Tsunashima, "Modification of magnetic properties and structure of Kr<sup>+</sup> ion-irradiated CrPt<sub>3</sub> films for planar bit patterned media," J. Appl. Phys., vol. 106, 053908 (2009).
- [11] Q. Xu, R. Kanbara, T. Kato, S. Iwata, and S. Tsunashima, "Control of magnetic properties of MnBi and MnBiCu thin films by Kr<sup>+</sup> ion irradiation," J. Appl. Phys., vol. 111, 07B906-1-3 (2012).
- [12] G.Q. Di, S. Iwata, and S. Uchiyama, "Magnetic and magneto-optical properties of MnAl alloyed film," IEEE Trans. J. Magn. Jpn., vol. 5, pp. 892-897 (1990).
- [13] K. M. Krishnan, "Ferromagnetic  $\delta$ -Mn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub> thin films with perpendicular anisotropy," Appl. Phys. Lett., vol. 61, pp. 2365-2367 (1992).
- [14] E. Suharyadi, D. Oshima, T. Kato, and S. Iwata, "Switching field distribution of planar-patterned CrPt<sub>3</sub> nanodots fabricated by ion irradiation," J. Appl. Phys., vol. 109, 07B771 (2011).
- [15] D. Oshima, E. Suharyadi, T. Kato, and S. Iwata, "Observation of ferri-nonmagnetic boundary in CrPt<sub>3</sub> line-and-space patterned media using a dark-field transmission electron microscope," J. Magn. Mater., vol. 324, pp. 1617-1621 (2012).
- [16] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, W. Littmark, The Stopping and Range of Ions in Matter, Pergmon, New York, 1985.