

報告番号	※ 甲 第 10616 号
------	---------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 イオン照射によるMn系及びCr系規則合金膜の磁性制御とビットパターン媒体への応用

氏 名 大島 大輝

## 論 文 内 容 の 要 旨

磁気記録媒体の記録密度は年々向上し続けているが、今後もいっそうの高密度化が求められている。現在の微粒子媒体においては、高密度化するためには微粒子径を小さくし、ビット境界の遷移ノイズをできるだけ小さくする必要がある。ノイズ低減のための微粒子径の微細化は磁化方位の熱安定性を低下させ、記録情報が保てないという問題を引き起こす。熱安定性の確保には材料の磁気異方性の向上が求められるが、磁気異方性の向上は記録に必要な磁界の増大を招くため、無制限に上げることはできない。このS/Nの確保、熱安定性の確保、記録磁界の増大抑制という磁気記録のトリレンマを克服するためには新しい技術の導入が必要となる。その次世代の技術として、ビットパターン媒体やエネルギーアシスト磁気記録などが候補に挙げられており、これらを用いることで現在直面している記録密度の限界を打破すべく、研究開発が世界的に行われている。また、将来的には複数の技術を組み合わせることでさらなる高密度化が図られると考えられる。次世代技術の1つであるビットパターン媒体においては、微細加工によりビットを定義することで遷移ノイズを低減かつ記録情報の熱安定性を確保することが可能となる。ビットパターン媒体では、低コスト、高歩留りの媒体作製方法の開発が大きな課題であるが、一般的な物理エッチングを伴う作製方法では平坦化プロセスなど工程数が多く、実用化は容易ではない。一方、イオンを照射することで媒体の磁気特性を局所的に変化させることで磁気的なパターンニングを行う手法が提案されているが、一般的な磁性材料を非磁性化させることは簡単ではない。イオン照射によりビットパターン媒体の作製を行うためには、大きな垂直磁気異方性を持つとともに、イオン照射により非磁性化が可能な材料の開発が求められる。そのような材料としてCr系およびMn系規則合金であるCrPt<sub>3</sub>、MnAl、MnGaが挙げられる。これらの薄膜は大きな垂直磁気異方性を示すことが報告されており、また、規則構造のときには強磁性、それ以外の構造のときには非磁性を示し、その結晶構造により磁性の有無が決まるという興味深い特性を持っている。そのため、これら規則合金に対しイオンを照射し、構造を変化させることでその磁性を制御できる可能性がある。筆者の所属する研究グループは、これまでに、L<sub>12</sub>規則相のCrPt<sub>3</sub>に対し低ドーズの30 keVのKr<sup>+</sup>イオンを照射すると、CrPt<sub>3</sub>がL<sub>12</sub>規則相からA1不規則相へと変化し、非磁性化すること、また、その性質を利用して、イオン照射により磁気パターンが作製できることを報告している。本研究では、さらに微細なパターンを作製し、その磁気特性の評価を行うとともに、イオン照射により作製した媒体の限界記録密度の推定を行った。次に、CrPt<sub>3</sub>よりも低温プロセスで成膜できるMnAl、MnGa規則合金膜に対しイオン照射を照射することで、MnAl及びMnGa膜の非磁性化を試みた。さらに、イオン照射により磁気パターンの作製を行い、その磁気特性を評価した。また、CrPt<sub>3</sub>及びMnGa膜においてはXMCD実験を行い、イオン照射前後でのCrPt<sub>3</sub>、MnGaの電子構造の変化を調べた。

以上により、これらの合金を用いた超高密度イオン照射型ビットパターン媒体の実現可能性について詳細な検討を行った。

第1章では、現在の磁気記録媒体における高密度化の課題、および次世代技術について述べた後、エネルギーアシスト記録、ビットパターン媒体などについて紹介した。次にビットパターンの作製方法、イオン照射による磁気特性制御の現状について述べ、本研究で扱うCr系およびMn系強磁性合金について解説した。最後に、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、スパッタ法およびMBE法を利用したCrPt<sub>3</sub>、MnAl、MnGa膜の成膜方法、電子線描画によるレジストパターンの形成とKr<sup>+</sup>イオン照射による磁気パターン形成などについて述べた。また、作製した試料の磁気特性、表面および磁区構造、結晶構造、断面構造、電子構造の評価法についての詳しく解説した。

第3章では、Cr系規則合金であるL1<sub>2</sub>-CrPt<sub>3</sub>に関する実験結果を示した。まず初めに、筆者の所属する研究グループで過去に行われたイオン照射実験の結果を紹介した。過去の研究から、L1<sub>2</sub>-CrPt<sub>3</sub>膜に対し30 keVのKr<sup>+</sup>イオンを照射すると、CrPt<sub>3</sub>はL1<sub>2</sub>規則相からA1不規則相へと変化し、非磁性化することが明らかにされているが、本研究では、そのときの電子構造の変化を調べるためにXMCD測定を行った。イオン照射前後でMCDスペクトルの形状に変化は見られず、軌道磁気モーメントとスピン磁気モーメントの比もイオン照射により変化しないことから、CrPt<sub>3</sub>は局所的にイオン照射前と同じ電子構造を保っていると考えられる。次に、過去の研究よりも微細なビットパターン膜を作製し、その磁気特性の評価を磁気力顕微鏡により行った。最小でピッチサイズ80 nmのビットパターンまで作製でき、作製したパターンは平坦で、明瞭な磁気コントラストを示した。これ以下のサイズは、マスクに使用した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が、マスク形成が可能であれば、さらに微細な構造の作製が可能であると考えられる。パターンの磁気特性を測定したところ、ビットサイズが小さくなるとともに平均反転磁界が増加する傾向にあることから、イオン照射によるダメージの影響は少なく、ビット間の磁氣的結合も小さいと考えられる。反転磁界分布は、ビットサイズが小さくなるとともに減少して未加工膜自体の分布に近づくような傾向が見られ、ビットサイズが65 nmのときには反転磁界分布が約30%まで低下した。未加工膜の特性を改善することにより、この値を下げるということが可能であると考えられる。最後に、パターン断面を透過電子顕微鏡による暗視野像を観察することで、イオン照射により形成された強磁性-非磁性 (L1<sub>2</sub>-A1) 遷移幅を評価した。その結果、遷移幅は平均で約5 nmと狭いことがわかった。TRIMコードを用いたシミュレーションを行ったところ、照射イオンを5 keV Xe<sup>+</sup>イオンとすることで、遷移幅を約1 nm程度まで狭められるという結果を得た。1 nmの遷移幅は5 Tb/in<sup>2</sup>以上という超高記録密度を達成しうる値であり、イオン照射により超高密度ビットパターン媒体が作製できる可能性が示された。

第4章では、Mn系規則合金であるL1<sub>0</sub>-MnAl、L1<sub>0</sub>-MnGaに対する実験結果を示した。膜構成はCr (2 nm) / MnAl or MnGa (15 nm) / Cr (20 nm) / MgO (001) sub.とし、マグネトロンスパッタにより成膜した。MnAl膜及びMnGa膜はともに大きな垂直磁気異方性を示したが、MnGa膜は平坦 (表面平均粗さ ~0.2 nm) であるのに対し、MnAl膜は表面の凹凸が大きくなる (表面平均粗さ ~2.5 nm) 結果となった。作製した薄膜に対し、30 keVのKr<sup>+</sup>イオンを照射したところ、CrPt<sub>3</sub>の場合と同様、低ドーズのイオン照射による非磁性化が確認された。構造解析の結果、MnGa膜はL1<sub>0</sub>規則相からA1不規則相へと相変化することにより、MnAl膜はL1<sub>0</sub>規則相からA1不規則相もしくはアモルファス構造へと変化することにより、非磁性化していることがわかった。これらの合金膜は、MnAl膜及びMnGa膜は  $1 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>の照射量で完全に非磁性化されたが、それらの磁気特性の照射量依存性には違いが見られた。この違いは、イオン照射による磁壁のピンギングの効果や、局所的な構造変化の仕方の違いを反映していると考えられる。MnGa膜においてはXMCD測定を行い、イオン照射に伴う電子状態の変化を調べた。磁化方向に依存するMCDスペクトル形状の異方性がイオン照射前後で変化しないという結果から、L1<sub>0</sub>規則相とA1不規則相は明瞭に分離し、その境界はシャープであることが期待される。次に、イオン照射によるパターンニングを試みた。作製したビットパターン構造においては、ビットの部分では強磁性を保っているのに対し、イオンが照射されたスペースの部分では非磁性となっていることが確認された。このとき、ビットとスペースの間に段差はなく、磁気パターンに対応するような表面形状となっていないことから、イオン照射により、表面形状を変化させることなく磁氣的にパターンニングができることが示された。特に、

MnGa膜においては、ピッチサイズが最小で80 nm (ビットサイズ: 40 nm) のパターンまで作製でき、CrPt<sub>3</sub>と同様、微細なパターンニングが可能である。また、MnGaビットパターン膜の磁化反転過程を測定し、平均反転磁界および反転磁界分布を見積もったところ、ビットサイズが小さくなるとともに平均反転磁界は上昇する傾向を示した。これはCrPt<sub>3</sub>の場合と同様であり、イオン照射による磁気特性へのダメージは少なく、ビット間の磁氣的結合が小さいことを示していると考えられる。また、反転磁界分布もビットサイズが小さくなるとともに増加する傾向を示した。この要因には、MnGa膜の結晶配向分散による異方性分散、ビット間の静磁結合、ドット形状や位置のばらつきなどが考えられるが、これらを改善することにより反転磁界分布を下げることも期待される。以上により、MnGa膜も超高密度ビットパターン媒体への応用の可能性が期待され、MnAl膜においても、表面平坦性の改善ができれば、同様にビットパターン媒体へ応用される可能性がある。

第5章では、本研究の総括を行った。本研究では、Cr系およびMn系規則合金膜を利用したイオン照射型ビットパターン媒体の実現可能性について論じ、CrPt<sub>3</sub>、MnAl、及びMnGaはイオン照射型ビットパターン媒体の材料として非常に有望であることを示した。しかし、ビットパターン媒体に求められるのは、ピッチサイズ25 nmに相当する1 Tb/in<sup>2</sup>もしくはそれ以上の記録密度であり、これは本研究で作製できた最小サイズである80 nmよりも小さく、さらに微細な構造の作製と評価が必要である。それに伴い未加工膜の特性の改善も必要であることも述べた。イオン照射型に限らず、ビットパターン媒体の実現のためにはクリアしなければならない課題はまだ多く、今後の研究の発展が期待される。