

平成 21 年 6 月 30 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007年度～2008年度
 課題番号：19760243
 研究課題名（和文） 超高密度磁気記録用パターン媒体作製の基盤技術に関する開発
 研究課題名（英文） Development of fundamental technology on fabrication of patterned media for next generation magnetic recording
 研究代表者 近藤 祐治
 秋田県産業技術総合研究センター 高度技術研究所 研究員
 研究者番号：70390903

研究成果の概要：

次世代の磁気記録装置として期待されているナノメートルサイズの磁性ドットを周期的に配列したパターン媒体作製の基盤技術を構築することを目指した。電子線露光と低エネルギーイオンによるエッチングを用いることによって、世界で初めて良好な磁気特性を有する 1 Tbit/in² 相当の磁性ドット規則配列パターンを作製することができた。また、1 Tbit/in² 以上の記録密度を実現するためのパターン媒体設計指針として、ドット間を磁気的に繋げることによって、熱安定性に優れ、かつ記録しやすい媒体を実現できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成19年度	2,500,000	0	2,500,000
平成20年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,200,000	210,000	3,410,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子デバイス・電子機器

キーワード：磁気記録媒体，パターン媒体，低エネルギーイオンエッチング，顕微磁気円二色性，静磁気相互作用，ドット間交換結合

1. 研究開始当初の背景

ハードディスクドライブ等の磁気記録装置は、現状で年率 60% 程度の伸び率で記録密度が向上している。現行で用いられているグラニュー型媒体では、数 100 個の結晶粒子（粒子 1 個の大きさは直径 7 nm 程度）の固まりを 1 ビットとして記録しているため、信号品質を維持しながら面記録密度を高めるためには、グラニュー型媒体の結晶粒子サイズを微細化する必要がある。しかし、結晶粒サイズが小さくなると熱安定性が確保できなくなるために垂直磁気異方性を高める必要が生じ、磁気記録ヘッドへの要求を高めってしまうというトリレンマがある。そこで、

1 Tbit/in² 以上の面記録密度を達成する技術の一つとして、磁性ドットを周期的に 2 次元配列して、一つのドットに 1 ビットを記録するパターン媒体が提案され、現在多くの研究者によって研究がなされている。1 Tbit/in² の面記録密度を達成するドット周期は 25 nm に相当し、作製手法は半導体プロセスを凌駕するため、未だ 25 nm 周期で整然と 2 次元配列した磁性ドットアレイを作製した例はない。現在考えられている作製手法としては、自己組織化したポリマーをマスクにして磁性体をドライエッチングする方法（東芝）や陽極酸化によって生成したポーラスアルミナに磁性体を埋め込む方法（山形富士通）、ナノイ

ンブリントリソグラフィなどがある。前者2つの方法は磁性ドットの配列に関して任意性に乏しい。また、前者2機関では媒体製造が主目的の開発型研究であり、磁気記録ヘッドとの整合性を考慮してパターン媒体の設計指針指立を目指した基礎的研究は国内外でも数少ない。

2. 研究の目的

パターン媒体は磁性ドットを人工的に2次元周期配列させて、一つのドットに1ビットを記録する媒体である。このパターン媒体では1ビットを構成するドット体積が稼げることから熱安定性に優れており、磁気記録ヘッドへの負担が少なく、1 Tbit/in²の面記録密度も達成可能であると期待されている。しかし、現状では1 Tbit/in²に相当する25 nm周期の磁性ドットアレイを作製した例はない。そこで、本研究では25 nm周期の磁性ドットアレイを作製するための基盤技術を確立することと、マグネティクス計算により提案されているパターン媒体の設計指針を実験的に検証することを目的とした。

3. 研究の方法

25 nm周期のパターニング手法として、課題申請当時はドット位置の任意性が高く、かつ解像性も高い光ナノインブリントリソグラフィを想定していたが、研究開始直後、高解像度電子線レジストであるカリックスアレンを使った電子線描画によって25 nm周期のレジストパターンができることがわかったため、本研究ではパターニングには電子線描画法を用いることとした。電子線描画後に、いかに磁氣的ダメージを与えずに磁性膜へパターン転写するかが重要である。そこで、磁性ドット作製プロセスとして、イオンミリングを用いた低ダメージプロセスを開発した。磁性膜には高い垂直磁気異方性エネルギーを有し、煩雑な成膜プロセスを必要としないCo₈₀Pt₂₀合金膜を用いた。

また、磁性ドットアレイの磁気特性評価には、大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL39XU に設置された顕微磁気円二色性 (micro-XMCD) を用いた。この micro-XMCD では約 2.5 μm の X 線スポットを使うため、スルーポットの低い電子線リソグラフィによって作製されたごく一部分にのみパターンニングされた磁性ドットアレイであっても、高感度で磁気評価できる特徴を有している。磁性ドットの形状評価には SEM 観察や AFM 観察を、磁性ドットの磁化反転イメージ観察には高分解能かつ高感度である真空中磁気力顕微鏡(MFM)を用いた。

4. 研究成果

(1) 低ダメージエッチングプロセスの開発

我々はこれまで 30 keV の Ga イオンを用いて集束イオンビーム (FIB) 加工により CoPt ドットアレイの作製を行い、XMCD 測定を行ってきたが、ドットサイズが小さくなるにつれて単位体積あたりの磁気モーメントの大きさが減少することがわかった。その原因は FIB によるエッチング時に Ga イオンがドット外周部に打ち込まれ、その部分の磁気モーメントが消失したと推察した。イオンの打ち込まれる領域はイオンのエネルギーに依存するために、イオン打ち込みによるダメージを軽減するためにはイオンエネルギーを小さくすることが有効である。そこで、エッチングプロセスに用いるイオンエネルギーを決定するために、モンテカルロシミュレーションにより磁性膜内部へのイオンの打ち込み幅を求めた。無限小幅のイオンビームが Co-Pt 膜面垂直方向から入射すると仮定して、膜内部でのイオンの散乱過程を計算し、個々のイオンエネルギーがゼロとなり膜内部で停止した座標を求め、膜面方向に対するイオン分布の半値全幅をイオン打ち込み幅として求めた。入射イオン種には一般的にエッチングに用いられる Ar イオンを仮定した。イオン打ち込み幅のイオンエネルギー依存性を Fig. 1 に示す。この結果から本研究ではイオン打ち込み幅の目標値を 1 nm 以下として、エッチングに用いるイオンエネルギーを 200 eV とした。

電子線描画と 200 eV の低エネルギーイオンエッチングを用いて磁性ドットアレイを作製した。作製プロセスは以下の通りである。

1. マグネトロンスパッタ法により Co-Pt 膜を成膜
2. Co-Pt 膜上に電子線レジストをスピコート塗布
3. 電子線描画および現像によりレジストをパターニング
4. レジストをマスクとしてイオンエッチングによりパターン転写

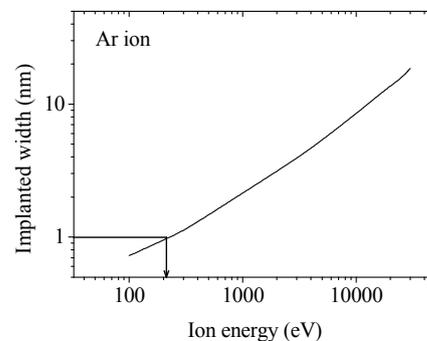


Fig. 1 Ar ion energy dependence of implanted width evaluated by Monte-Carlo simulation.

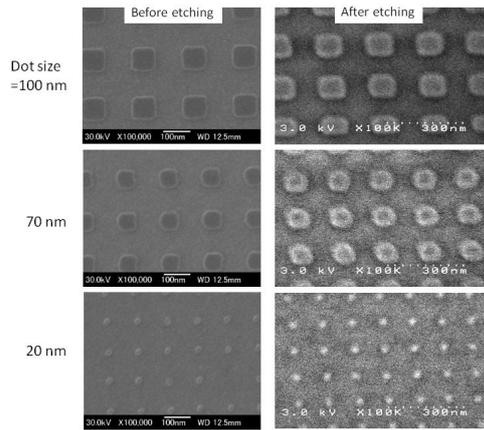


Fig.2 SEM images of electron resist dots and Co-Pt magnetic dots before and after ion etching, respectively.

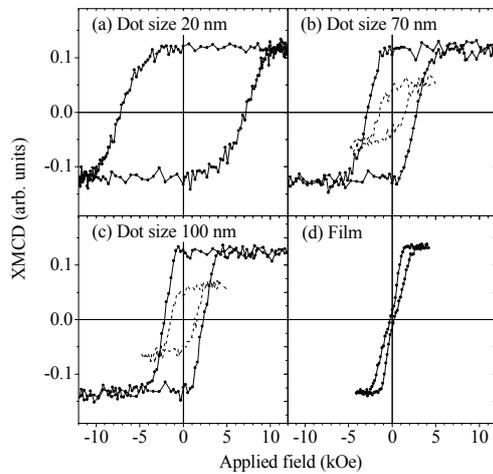


Fig. 3 XMCD hysteresis curves of magnetic dot arrays with various dot size (a-c) and continuous film (d). The solid lines and dashed lines are the magnetization curves of dot arrays fabricated by ion etching using Ar ion (200 eV) and Ga ion (30 keV), respectively.

電子線レジストにはネガ型であるカリックスアレンを用いた。電子線の加速電圧、ビーム電流はそれぞれ 30 kV, 500 pA とした。Ar イオンの加速電圧は 200 V, ビーム電流は 60 mA, イオン入射角は斜視角 70° とした。作製したドット径は 20, 70, 100 nm とし、ドットドット間距離は静磁気相互作用を無視できるように全ての試料で 100 nm と十分離れた。Fig. 2 にイオンエッチング前後の電子顕微鏡(SEM)観察像を示す。ほぼ目標通りのドットアレイが形成出来ていることがわかる。これらの Co-Pt ドットアレイの XMCD ヒステリシス測定した結果を Fig. 3 に示す。また、(c)および(d)には 30 keV-Ga イオンエッチングで作製した 70 nm, 100 nm ドット径の Co-Pt ドットアレイの XMCD ヒステリシス曲

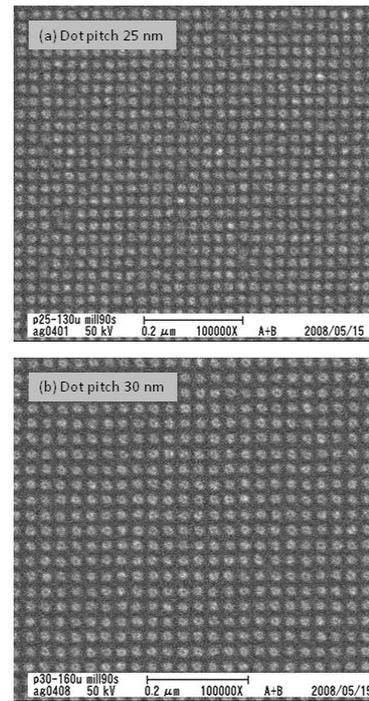


Fig.4 SEM images of Co-Pt magnetic dot arrays with dot pitch of 25 nm (a) and 30 nm (b), respectively.

線を点線で示す。用いた X 線エネルギーは Pt L_3 吸収端に相当する 11.566 keV とした。また、Fig.3 の縦軸は Pt の吸収強度で規格化しているため、単位体積あたりの Pt 磁気モーメントを表している。ドット試料と加工前の Co-Pt 連続膜で XMCD 強度を比較すると、30 keV-Ga イオンでエッチングした磁性ドットでは XMCD 強度が減少しているが、200 eV の低エネルギーでエッチングしたものでは XMCD 強度に変化がなかった。このことは低エネルギーイオンでは加工ダメージを与えにくく、磁化の減少を抑制できたと言える。

(2) 1 Tbit/in² 級磁性ドットアレイの作製

(1) で示した作製プロセスでは磁氣的ダメージをほとんど引き起こすことなく 20 nm 径の磁性ドットを作製可能であることがわかった。そこで、上述の作製プロセスを用いて、1 Tbit/in² 級の Co-Pt 磁性ドットアレイの作製を行った。膜構成は Co-Pt(7 nm)/Ru(6 nm)/Pt(3 nm)/glass 基板とした。電子線描画に用いた電子線の加速電圧は 50 kV, ビーム電流は 50 pA とした。用いた電子線レジスト、イオンエッチング条件は(1)で示したものと同一である。Fig. 4 にイオンエッチング後の 25 nm ピッチ, 30 nm ピッチの Co-Pt 磁性ドットアレイの SEM 観察像を示す。どちらも規則正しく配列しており、きれいにエッチングできていることがわかる。また、SEM 像の画像解析から平均ドット径 $\langle d \rangle$ および分散 σ は

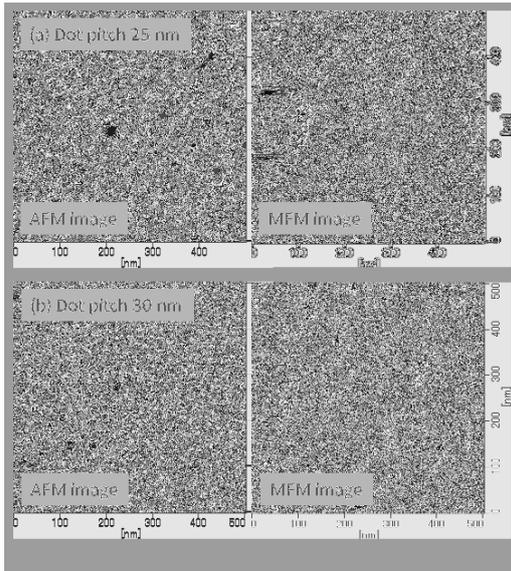


Fig.5 AFM and MFM images of Co-Pt magnetic dot arrays with dot pitch of 25 nm (a) and 30 nm (b), respectively.

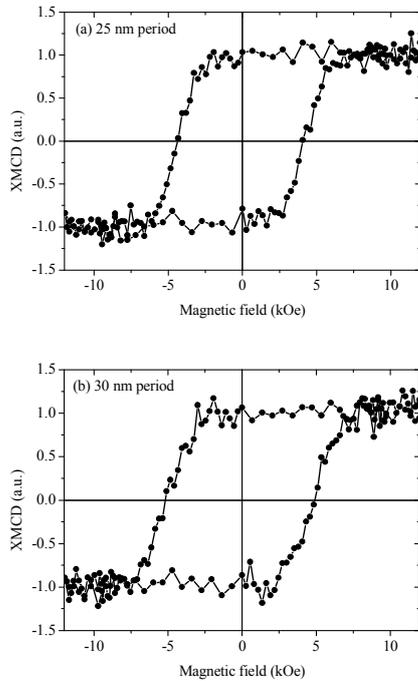


Fig. 6 XMCD hysteresis curves at Pt L_3 edge of CoPt dot arrays with (a) 25 and (b) 30 nm period for out-of-plane component.

ドット周期 25 および 30 nm に対して、それぞれ $\langle d \rangle = 17.3, 18.9$ nm, $\sigma = 1.17, 1.10$ nm であった。次にこれらの磁性ドットアレイの原子間力顕微鏡 (AFM) および MFM 観察を行った。Fig. 5 にその観察像を示す。試料への着磁は ac 消磁状態とした。また、AFM および MFM 観察像は Fig. 4 の SEM 像とは 45 度回転した配置で観察されていることに注意が

必要である。30 nm ピッチドットアレイでは、白黒のドットがランダムに配列しており、磁氣的にほぼ孤立していると考えられる。一方、25 nm ピッチの磁性ドットアレイでは 45 度の方向に白黒の磁区が繋がっているように見える。この原因として、磁区方向が電子線描画時の電子線走査方向と関係があることから、パターン形成精度と関係したドット間交換結合が残っている可能性がある。また、これらの磁性ドットの XMCD ヒステリシス曲線を Fig. 6 に示す。その結果、抗磁力 (H_c) はドット周期 25 および 30 nm に対して、それぞれ $H_c = 4.4$ kOe, 5.3 kOe であった。ドット周期 25 nm の方が H_c が低い理由はパターンニング時のドット間交換結合の影響が考えられる。

(3) パターン媒体設計指針の検討

① ドットドット間距離における静磁気相互作用の影響

パターン媒体においては、熱磁気安定性を確保するためには磁性ドットの体積を大きくした方が有利であるが、記録密度を上げるためにはドットピッチを狭くしなければならない。つまり、ドット径とドットドット間距離はパターン媒体設計上、非常に重要なパラメータとなる。そこで、20 nm 径のドットをドット周期を 40~100 nm と変化させ、そのときの XMCD ヒステリシス曲線からドットのスイッチング磁界分散幅 (σH_{sw}) を算出した。磁性膜構成は Co-Pt (13 nm)/Au (6 nm)/Ti (5 nm)/Si 基板とした。電子線描画およびイオンエッチング条件は (2) で示したものと同一とした。Fig. 7 に XMCD ヒステリシス曲線を示す。ここで、Fig. 7 の縦軸は Fig. 3 同様、Pt の蛍光強度で規格化しているため、Pt 原子あたりの磁気モーメントに相当する。飽和磁化 (M_s) および保磁力 (H_c) の大きさはドットピッチに関係なく一定であり、狭ピッチにしても磁氣的ダメージがほとんどないことが確認できた。次に H_c 付近で XMCD ヒステリシス曲線の微分係数を求め、その微分係数をガウス関数フィッティングすることで標準偏差 σ を算出し、これを σH_{sw} とした。Fig. 8 に σH_{sw} のドットピッチ依存性を黒丸で示す。一方、 σH_{sw} の要因の一つである静磁気相互作用の影響を見積もるために、周囲のドット表面および裏面の磁荷が中心のドットに及ぼす減磁界を計算した。その結果を Fig. 8 に破線で示す。この結果から、実験で求めた σH_{sw} は静磁気相互作用の影響と比べて圧倒的に大きいことがわかった。そこで、この破線で示した結果に 1.2 kOe を足したところ (実線)、実験から求めた σH_{sw} と良く一致することがわかった。つまり、今回の試料において、静磁気相互作用の影響の他にそれ以外の要因による σH_{sw} が 1.2 kOe あると考え

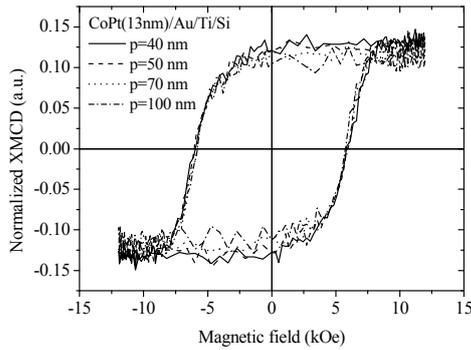


Fig. 7. ESMH curves of CoPt dot arrays with a dot diameter of 25 nm and periods of 40 ~ 100 nm.

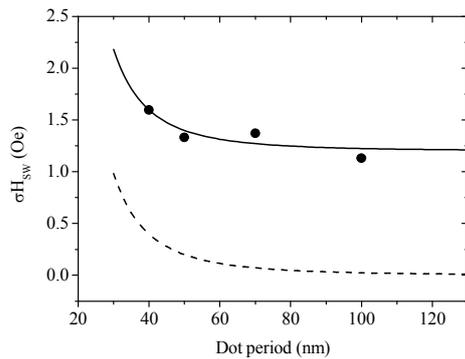


Fig. 8. Dot period dependences of switching field distribution width (σH_{sw}). The solid circles are σH_{sw} estimated from ESMH curved in Fig. 2. The dashed line is the simulation result of the σH_{sw} caused by magnetostatic interaction. The solid line added 1.2 kOe to the dashed line.

られる。その要因として、材料の磁気異方性エネルギー分散、加工精度に起因するドットサイズ分散や形状分散などが挙げられる。また、Fig.8からは40 nm以下のドットピッチになると、静磁気相互作用の影響も無視できなくなることがわかる。つまり、熱安定性の低下と記録磁界の増加を招くことになる。そこで、1 Tbit/in²以上のパターン媒体を実現するためには、上述の材料物性や加工精度に起因する σH_{sw} の他に静磁気相互作用の影響を低減することが必須である。

② ドット間交換結合によるスイッチング磁界分散の低減

パターン媒体は1 Tbit/in²以上の面記録密度を実現できる次世代磁気記録システムの一つとして期待されているが、(3)の①で示したように、記録密度が高くなると、静磁気相互作用のために σH_{sw} が大きくなり、BPMを使ったとしても記録性能と熱安定性の両立が困難になると考えられる。 σH_{sw} を低減する手法の一つとして、ドット間交換結合の導入により2 Tbit/in²の面記録密度が実

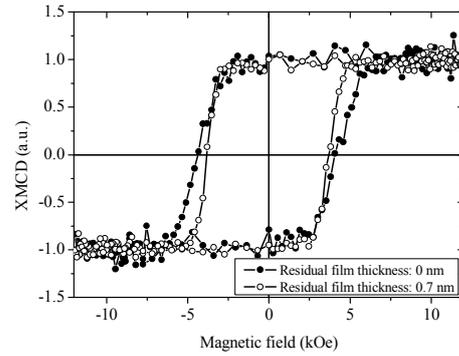


Fig. 9 XMCD hysteresis curves at Pt L_3 edge of CoPt dot arrays with period of 25 nm with residual film thickness of 0 and 0.7 nm for out-of-plane component.

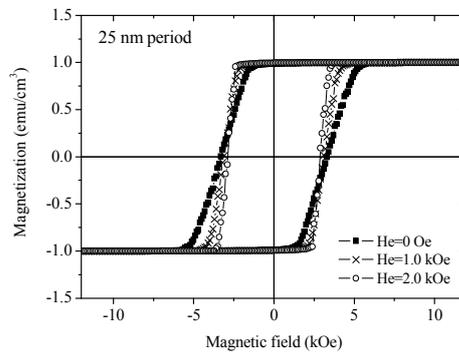


Fig. 10 Magnetization curves obtained by micromagnetic simulation for Co-Pt dot array with various exchange coupling strength.

現できることをシミュレーションにより示してきた。そこで、交換結合を有するCo-Ptドットアレイの作製と磁気特性の検討を実験的に行った。膜構成はCo-Pt(7 nm)/Ru(6 nm)/Pt(3 nm)/glass基板とした。磁性ドットアレイの作製は上述と同様に電子線描画と低エネルギーArイオンミリングを用いて行った。パターンサイズはドット径17 nm、ドットピッチ25 nmとした。交換結合の強さは、ミリング時間を変えてドット間の残膜厚を変化させることで制御し、残膜厚を0, 0.7 nmと変化させた試料を作製した。Fig. 9に25 nmピッチCo-PtドットアレイのXMCDヒステリシス曲線を示す。図中の黒丸および白丸はそれぞれ残膜厚0, 0.7 nmのドットアレイに対応する。磁化曲線から求めた σH_{sw} はそれぞれ1.1, 0.64 kOeとなり、残膜がある方が σH_{sw} は小さかった。また、残膜がある場合にはドット反転開始磁界をほとんど変化させずに飽和磁界を低減できることがわかった。さらにマイクロマグネティック計算により、交換結合の強さを变化させた場合の磁化曲線を求めた。その結果をFig. 10に示す。交換結合が強いほど σH_{sw} は小さくなり Fig. 9の実験

結果と同様な結果が得られた。以上の結果より、ドット間交換結合はミリング時間により制御でき、熱安定性と記録性能を両立できることがわかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

1. “Micro-XMCD of CoPt Dots Prepared by Using Ga Ions”

Y. Kondo, T. Chiba, J. Ariake, M. Suzuki, M. Takagaki, N. Kawamura, N. Honda
IEICE Tech. Rep., MR2007-1 (2007) 1-5. (査読無)

2. “Element - specific hard X-ray micro - magnetometry of magnetic modifications in Co-Pt dots fabricated by ion etching”

Y. Kondo, T. Chiba, J. Ariake, K. Taguchi, M. Suzuki, M. Takagaki, N. Kawamura, B. M. Zulfakri, S. Hosaka, N. Honda
J. Magn. Magn. Mater., 320 (2008) 3157-3160. (査読有)

3. “Fabrication of Co-Pt Array with 1 Tbit/in² for Bit Patterned Media”

Y. Kondo, T. Chiba, J. Ariake, K. Taguchi, M. Suzuki, N. Kawamura, B. M. Zulfakri, S. Hosaka, T. Hasegawa, S. Ishio, N. Honda
IEICE Tech. Rep., MR2008-19 (2008) 1-6. (査読無)

[学会発表] (計9件)

1. 「Ga イオンを用いて作製した CoPt ドットの micro-XMCD による磁気特性評価」

近藤祐治, 千葉隆, 有明順, 鈴木基寛, 高垣昌史, 河村直己, 本多直樹
電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会, 2007年6月7日, 仙台市.

2. “Element - specific hard X-ray micro - magnetometry of magnetic modifications in Co-Pt dots by Ga ion”

Y. Kondo, T. Chiba, J. Ariake, M. Suzuki, M. Takagaki, N. Kawamura, N. Honda
The Eighth Perpendicular Magnetic Recording Conference (PMRC2007), October, 17, 2007, Tokyo.

3. 「次世代磁気記録用パターン媒体における顕微磁気円二色性を用いた微小磁気測定」

近藤祐治, 鈴木基寛, 有明順, 千葉隆, 高垣昌史, 河村直己, 本多直樹
第12回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2008年1月14日, 草津市.

4. 「電子線描画と Ar イオンミリングにより

作製した Co-Pt 磁気ドットの磁気特性評価」

近藤祐治, 千葉隆, B. M. Zulfakri, 有明順, 田口香, 鈴木基寛, 河村直己, 保坂純男, 本多直樹

2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月27日, 船橋市.

5. 「ビットパターン媒体用 1 Tbit/in² 級 Co-Pt ドットアレイの作製」

近藤祐治, 千葉隆, 有明順, 田口香, 鈴木基寛, 河村直己, B. M. Zulfakri, 保坂純男, 長谷川崇, 石尾俊二, 本多直樹
電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会, 2008年10月9日, 秋田市.

6. 「磁気記録媒体の微細加工」(依頼講演)

近藤祐治
電子情報通信学会東北支部「専門講習会」, 2008年12月19日, 秋田市.

7. 「ビットパターン媒体用 1 Tbit/in² 級 Co-Pt ドットアレイの作製と磁気特性評価」

近藤祐治, 有明順, 千葉隆, 田口香, 鈴木基寛, 河村直己, 長谷川崇, 石尾俊二, 本多直樹
2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009年3月30日, つくば市.

8. “Exchange coupled magnetic dot arrays for next generation bit patterned media”

Y. Kondo, J. Ariake, T. Chiba, K. Taguchi, M. Suzuki, N. Kawamura, N. Honda, IEEE International Magnetism Conference (Intermag 2009), May 6, 2009, Sacramento.

9. “Fabrication and process issues of bit patterned media for 1 Tbit/in² regime”

J. Ariake, Y. Kondo, T. Hasegawa, S. Ishio, N. Honda, IEEE International Magnetism Conference (Intermag 2009), May 6, 2009, Sacramento.

6. 研究組織

(1)研究代表者 近藤 祐治

秋田県産業技術総合研究センター 高度技術研究所 研究員
研究者番号：70390903

(2)研究協力者 千葉 隆

秋田県産業技術総合研究センター 高度技術研究所 主任研究員
研究者番号：70370236