

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289232

研究課題名(和文) 超高密度磁気記録のためのエネルギーアシスト垂直媒体の開発と磁化反転制御

研究課題名(英文) Development of the energy assisted magnetic recording media for high areal density and control of the magnetization switching

研究代表者

高橋 有紀子 (Takahashi, Yukiko)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性スピントロニクス材料研究拠点・主席研究員

研究者番号：50421392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では4 Tbit/in<sup>2</sup>を超える超高密度ハードディスクドライブに適応可能な高い異方性(Ku)を持つFePt記録媒体の実現とエネルギーアシストによる磁化反転制御を目指した。成膜中にC濃度を制御することにより、平均粒子径が6.2 nm、アスペクト比が1.9、磁化反転磁界が約4 TのFePt-C媒体の作製に成功した。また、反転磁界が4 Tを超えるFePt-C媒体に対して円偏光を用いることにより磁化反転磁界を0.2 Tにまで低減することに成功した。円偏光照射による磁化反転は、磁気円二色性による積算的な反転であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work was the development of the FePt media with areal density larger than 4 Tbit/in<sup>2</sup> and the control of the magnetization switching by the energy assistance. We controlled the microstructure of FePt-C granular media based on the microstructure observation. By the compositionally graded deposition method, in which C composition was gradually changed in order to avoid the second layer formation, we obtained the FePt-C granular media with small average grain size of 6.2 nm, high aspect ratio of 1.9 and high switching field of about 4 T. By the exposure of the circularly polarized light to the FePt-C granular media with the high switching field, the switching field was substantially decreased by 0.2 T. By the analysis of the magnetization change, the switching was found to be accumulative due to the dichroism.

研究分野：磁気記録

キーワード：FePt媒体 エネルギーアシスト磁化反転

## 1. 研究開始当初の背景

クラウドコンピューティングやデジタル家電製品の普及により、膨大なデータが一般家庭やデータセンターで保存されるようになり、テラビット(Tbit)級のデータストレージデバイスの要求が高まっている。ハードディスクドライブ(HDD)は、大容量・高信頼性・安価であるために、PC、ホームエレクトロニクス、データセンターでの重要なデータストレージの担い手となっている。現在のHDDの記録密度は1 Tbit/in<sup>2</sup>程度であるが、さらに小さい体積に多くのデータを保存するために4 Tbit/in<sup>2</sup>以上の高密度化が期待されている。現行HDDの磁気記録媒体は約8 nmのCoCrPt強磁性微粒子がSiO<sub>2</sub>非磁性マトリックス中に均一に分散した構造を取っている。4 Tbit/in<sup>2</sup>を実現するには、強磁性微粒子のサイズを4 nmまで低減する必要がある。しかし、CoCrPtは異方性( $K_u$ )が小さいため、サイズの低減にともない粒子の異方性エネルギー( $K_u V$ :  $V$ は粒子の体積)が熱エネルギー( $k_B T$ :  $k_B$ はボルツマン定数、 $T$ は温度)と同程度になり、確率的な磁化反転のため磁気情報を保存できなくなる。この熱擾乱の問題を克服するためにCoCrPtよりも一桁 $K_u$ の高いL1<sub>0</sub>の規則構造を持つFePtが超高密度記録媒体材料として注目されている。L1<sub>0</sub>-FePtを使うことにより媒体の熱安定性は克服できるが、FePt粒子の磁化反転磁界( $H_s$ )が書き込みヘッドの磁界(15 kOe)を遙かに上回り、従来の垂直磁気記録方式では書き込みができなくなる。書き込みの問題を克服するために、書き込み時に近接場光で媒体を昇温して $H_s$ を下げる熱アシスト磁気記録(Heat Assisted Magnetic Recording, HAMR)、高周波磁界を照射することにより磁化反転のためのエネルギー障壁を下げる高周波磁場アシスト磁気記録(Microwave Assisted Magnetic Recording, MAMR)、さらに超短パルス円偏光照射による光誘起磁化反転(All Optical Switching, AOS)による新記録方式が提案されている。

4 Tbit/in<sup>2</sup>の実現には、平均粒子径が4 nm・粒子分散が10%以下・アスペクト比1.5以上の柱状粒子の微細組織と $4 \times 10^7$  erg/cc以上の $K_u$ ・反転磁化分布(SFD)15%以下の磁気特性を両立するL1<sub>0</sub>-FePt媒体が必要となる。FePtはL1<sub>0</sub>規則構造を得るための熱処理温度が高く、熱処理後に規則化と同時に粒子合体が起こってしまうことが長年の問題であったが、我々はFePtと相分離

傾向の強い炭素(C)を用いて、2011年に世界に先駆けて媒体に適用可能なFePt-Cグラニューラ薄膜の開発に成功し、当時HAMRの記録密度で最高の550 Gbit/in<sup>2</sup>を実現した。現在では、同様な組織のFePt-C媒体で1 Tbit/in<sup>2</sup>がメーカーによりデモされている。4 Tbit/in<sup>2</sup>の実現には媒体組織の更なる微細化・均質化が必要である。

新規磁気記録技術の中で最も実用に近いのはHAMRである。しかし、FePtのキュリー点( $T_c$ )が約750 Kと高いためナノ秒の短い熱照射でも媒体の熱耐性が問題となっており、書き込み動作温度の低減が求められている。一方でMAMRは、近年CoPtなどの $K_u$ の小さい( $1 \times 10^6$  emu/cc程度、CoCrPtの1/5)材料に対する高周波磁場の照射が $H_s$ の低減に有効であることが実験的に示された。しかしFePt媒体に必要な高周波磁場の周波数は100 GHzを超えるとされており、FePtに対するMAMRの有効性については明らかでない。以上のように、4 Tbit/in<sup>2</sup>の記録密度を実現するためのエネルギーアシスト磁気記録技術は書き込み問題を解決するための新規技術であるが、いずれも問題を抱えている。

最も新しい記録技術として、超短パルス円偏光により磁場を用いずに磁化反転を起こす光誘起磁化反転(AOS)が提案されている。書き込み時に磁場が不要である点が書き込み問題に直面しているFePt媒体にとって魅力的であるが、本技術はフェリ磁性体であるGaFeCoやTbCoで実証されているのみであり、FePtへの有効性について検討する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では4 Tbit/in<sup>2</sup>を超える超高密度ハードディスクドライブに適応可能な高い異方性( $K_u$ )を持つFePt記録媒体の実現とエネルギーアシストによる磁化反転制御を目指す。このために、平均粒子径4 nm・粒子分散10%以下・アスペクト比1.5以上の微細組織と、 $4 \times 10^7$  erg/cc以上の垂直異方性・磁化反転分布15%以下の磁気特性を両立するL1<sub>0</sub>-FePt垂直媒体を開発する。同時に顕在化する書き込みの問題に対して、熱・高周波磁場・光を用いたエネルギーアシストによる磁化反転制御を行う。

## 3. 研究の方法

4 Tbit/in<sup>2</sup>を超えるHDDの実現のために、微粒子・狭分散・高アスペクト比・高 $K_u$ ・低SFDを満たすL1<sub>0</sub>-FePtグラニューラ媒体の開発を行う。そのために、薄膜成長の初期に形成される核の密度を制御することにより薄膜作製条件の最適化を行う。同時に、

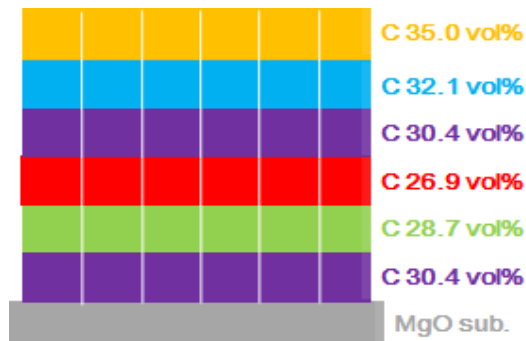


Fig. 1 Schematic view of the film stack of FePt-C granular film.

$L1_0$ -FePt グラニューラー媒体に、熱、高周波磁場および光によるエネルギーアシストにより磁化反転制御を行い、書き込みの磁場が 15 kOe 以下になるようなアシスト条件と見出す。

#### 4. 研究成果

##### FePt の微細構造制御

**柱状構造の形成**: FePt 粒子が 2 層構造になってしまった膜の微細構造を見ると、膜厚が 6 nm 以上で C が FePt 粒子表面を覆ってしまっていることがわかる。このことは C 濃度を適当に調整することにより FePt 粒子表面への C の析出を防ぐことができる可能性を示している。そこで我々は、成膜中の C 濃度を変化させるプロセスを試みた。Fig. 1 に作成した薄膜の模式図を示す。C 濃度は 2nm 毎に変化させており、全体で 6 層(12 nm)積層している。第 1 層の C 濃度は 30.4 vol% と高く、第 3 層の 26.9 vol% まで徐々に減少させる。第 3 層以上では 35.0 vol% まで徐々に増やす。第 1 層の高 C 濃度は、粒子サイズの低減を目的としており、できるだけ小さい初期核を形成させるためである。第 3 層まで C 濃度を徐々に減少させるのは、C の FePt 粒子表面への偏析を避けるためである。第 4 層以降の C 濃度の増加は柱状成長を促進させるためである。Fig. 2 に(a) 面内の TEM 像、(b)断面の STEM-HAADF 像、(c)磁化曲線、(d)断面

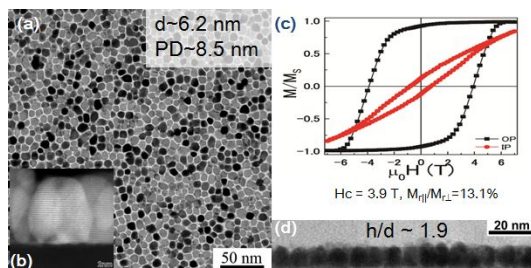


Fig. 2 (a) in-plane TEM image, (b) cross sectional HAADF-STEM image, (c) magnetization curves and (d) cross sectional bright field TEM image of FePt-C granular film processed by the compositionally graded deposition method.

の TEM 像を示す。PD が約 8.5 nm(平均粒子径は約 6.2 nm)、 $h/d \sim 1.9$  の高アスペクト比の柱状粒子が形成されている。(b)の高分解能像では、粒子の直径が成膜中の C 濃度に対応していることがわかる。すなわち C 濃度が高いときには直径が小さく、C 濃度が低いときには直径が大きく変化していることがわかる。このように成膜中の C 濃度を適切に制御することにより高アスペクト比を持つ柱状粒子の形成が可能であることがわかる。磁化曲線は強い垂直異方性を示しており、垂直保磁力は約 3.9 T と非常に高い。一方で、面内の磁化曲線にはヒステリシスが存在しており、これは第 2 層の FePt 粒子に起因していることがわかっており。今後は、柱状構造を保ちつつ第 2 層の FePt 粒子の出現を完全に抑えるプロセスの開発が望まれる。

**粒子サイズの低減**: FePt 粒子サイズの低減には、成膜温度を下げ初期核を増やすと同時に C 濃度を増やして初期核の合体を妨ぐ方法が有効である。そこで我々は通常 600 °C である基板温度を 560 °C に下げ、膜中の C 濃度を平均 32.2 vol%~39.7 vol% と変化させた。Fig. 3 に FePt-C 媒体の面内 TEM 像と磁化曲線を示す。いずれの膜も粒子分離性の良い微細組織となっており、強い垂直異方性を示す。C 濃度の増加とともに、平均粒子径が 6.6 nm から 4.8 nm へ減少するものの、面内磁化曲線のヒステリシスは増加し、垂直保磁力が減少する。垂直保磁力の減少は FePt 粒子の規則度の低下によるものと考えられる。今回作成した薄膜の中で粒子サイズが一番小さいのは、FePt-C<sub>39.7</sub> の 4.8nm(PD ~ 5.9 nm)であった。

##### エネルギーアシスト磁化反転

**高周波磁場アシスト磁気記録(MAMR)**: 前にも示したように FePt グラニューラー媒体は  $10^7$  erg/cc もの非常に大きな異方性を持ち 100 GHz を超える高周波磁界を必要とする点で現実的ではない。そこで共鳴周波数の小さいセミハード層を FePt 粒子の上に積層した交換結合媒体において、セミハード層の磁化反転トルクを利用することにより MAMR の FePt 媒体に対する有効性を検討した。5 T 程度の保磁力を示す FePt-C グラニューラー媒体の上に 10 nm のセミハードな磁気特性を持つ FePt 連続膜を積層した FePt-C/FePt 交換結合媒体では、保磁力を 1.5 T にまで低減することができる。これに約 0.04 T の高周波磁場を印加することにより、反転磁界が約 0.05 T 低減した。



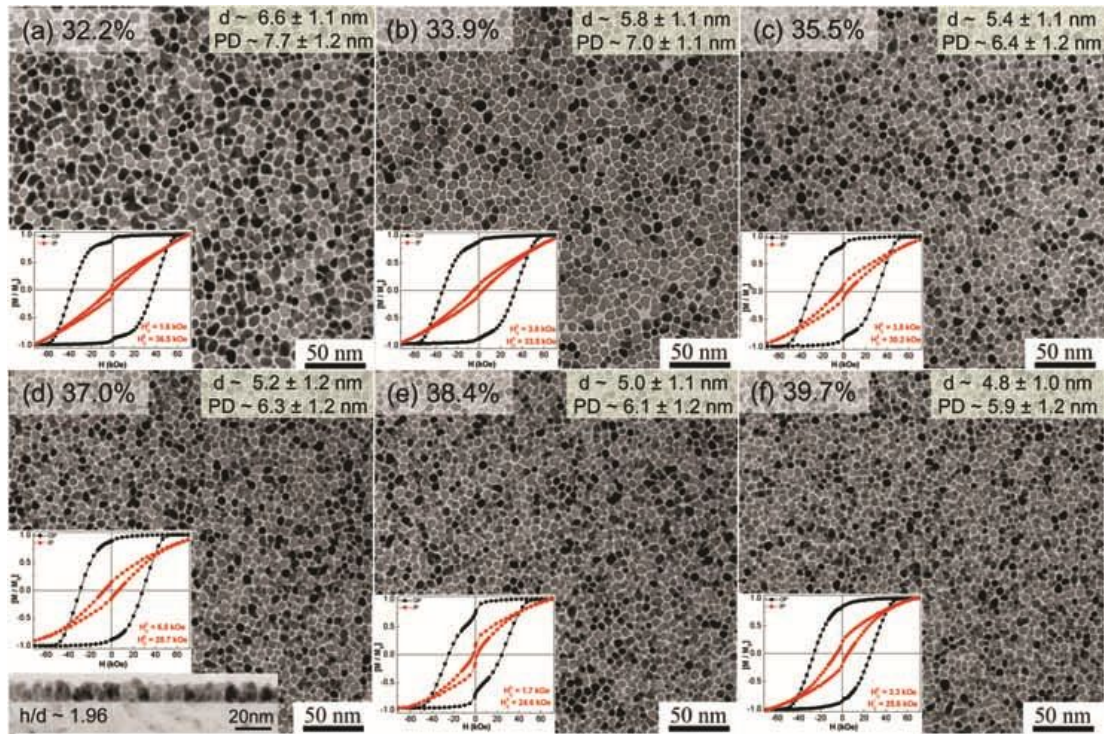


Fig. 3 in-plane TEM images and magnetization curves with FePt-C granular films with C composition of (a)32.2%, (b)33.9%, (c)35.5%, (d)37.0%, (e) 38.4 % and (f) 39.7 %.

**円偏光誘起磁化反転(AOS)**：ここでは保磁力が約4 TのFePt-Cグラニューラ媒体に円偏光を照射することによる磁化反転の定量評価を行った。その結果、円偏光誘起磁化反転はシングルパルスで起こるのではなく複数パルスの照射によって磁化反転割合が徐々に増加し、飽和することがわかった。このことから、円偏光誘起磁化反転の起源として磁気円二色性が挙げられる。FePt-Cグラニューラ媒体では、最大の磁化反転割合が50%程度であった。完全な磁化反転を実現するために、0.2 Tの外部磁界を印加したところ、円偏光の照射によって完全な磁化反転が実現することが明らかとなった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

1. Structure Optimization of FePtC Nanogranular Films for Heat-Assisted Magnetic Recording Media  
H. Pandey, J. Wang, T. Shiroyama, B. S. D. Ch. S. Varaprasad, H. Sepehri-Amin, Y. K. Takahashi, A. Perumal, K. Hono  
*IEEE Trans. Magn.* **52**, 3200108 (2016). 査読有
2. Magnetization reversal of FePt based exchange coupled composite media  
J. Wang, H. Sepehri-Amin, Y.K. Takahashi, S. Okamoto, S. Kasai, J.Y. Kim, T. Schrefl,

K. Hono,

*Acta Mater.* **111**, 47-55 (2016). 査読有

3. Influence of MgO underlayers on the structure and magnetic properties of FePt-C nanogranular films for heat-assisted magnetic recording media  
T. Shiroyama, B. S. D. Ch. S. Varaprasad, Y. K. Takahashi and K. Hono  
*AIP Advances* **6**, 105105 (2016). 査読有
4. Accumulative Magnetic Switching of Ultrahigh-Density Recording Media by Circularly Polarized Light  
Y.K. Takahashi, R. Medapalli, S. Kasai, J. Wang, K. Ishioka, S.H. Wee, O. Hellwig, K. Hono, and E.E. Fullerton  
*Phys. Rev. Applied* **6**, 054004 (2016). 査読有
5. FePt系グラニューラ媒体に関する最近の進展  
高橋有紀子、宝野和博  
まぐね **11**, 317-324 (2016) 査読無
6. Columnar structure in FePt-C granular media for heat-assisted magnetic recording  
B.S.D.Ch.S. Varaprasad, J. Wang, T. Shiroyama, Y.K. Takahashi and K. Hono  
*IEEE Trans. Magn* **51**, 3200904 (2015). 査読有
7. Effect of MgO underlayer on the texture and magnetic property of FePt-C granular film.  
J. Wang, S. Hata, Y.K. Takahashi, H. Sepehri-Amin, B.S.D.Ch.S. Varaprasad, T. Shiroyama, T. Schrefl, K. Hono.  
*Acta Mater* **91**, 41-49 (2015). 査読有

〔学会発表〕(計 21 件)

1. Growth mechanism of columnar grains in FePt-C granular films for HAMR media processed by compositionally graded sputtering.  
H. Pandey, A. Perumal, J. Wang, H. Sepheri-amin, Y.K. Takahashi and K. Hono, 13<sup>th</sup> Joint MMM-Intermag 12<sup>th</sup> Jan. 2016 San Diego(USA)
2. Accumulative magnetic switching of FePt granular media by circularly polarized light (invited)  
Y.K. Takahashi, R. Madapalli, S. Kasai, J. Wang, K. Ishioka, S.H. Wee, O. Hellwig, K. Hono and E.E. Fullerton  
MMM, 31<sup>st</sup> Oct. 2016, San Diego(USA)
3. Accumulative magnetic switching of FePt granular media by circularly polarized light  
Y.K. Takahashi, R. Madapalli, S. Kasai, J. Wang, K. Ishioka, S.H. Wee, O. Hellwig, K. Hono and E.E. Fullerton  
日本磁気学会学術講演会 2016年9月5日 金沢大学(石川県金沢市)
4. FePt 系グラニューラー媒体の最近の進展(招待)  
高橋有紀子  
IDEMA ヘッド・ディスク部会 2016年11月8日 東京虎ノ門 IDEMA 事務所
5. Development of FePt Based HAMR Media (invited)  
J. Wang, H. Sepheri-Amin, Y.K. Takahashi, and K. Hono  
SRC winter review 2016年12月12日 東京都飯田橋レインボービル
6. Effect of CrB insertion on the (001) texture of MgO seed layer and magnetic properties of FePt-C HAMR media  
J. Wang, H. Sepheri-Amin, Y.K. Takahashi and K. Hono  
日本磁気学会学術講演会 2016年9月5日 金沢大学(石川県金沢市)
7. Effect of CrB insertion on the (001) texture of MgO seed layer and magnetic properties of FePt-C HAMR media  
J. Wang, H. Sepheri-Amin, Y.K. Takahashi, K. Yakushiji, H. Kubota and K. Hono  
MMM, 31<sup>st</sup> Oct. 2016 USA
8. Effect of substrate surface roughness on the texture and magnetic property of FePt-C granular film  
J. Wang, Y. K. Takahashi, H. Sepheri-Amin and K. Hono  
MMM, 31<sup>st</sup> Oct. 2016 NewOrleans(USA)
9. Effect of CrB insertion on the (001) texture of MgO seed layer and magnetic properties of FePt-C HAMR media  
J. Wang, H. Sepheri-Amin, Y.K. Takahashi, K. Yakushiji, H. Kubota and K. Hono  
MMM, 31<sup>st</sup> Oct. 2016 NewOrleans(USA)
10. FePt-C の微細構造に対する多結晶 MgO 下地の影響  
城山泰祐, B. Varaprasad, 高橋有紀子, 宝野和博  
日本金属学会春季講演大会 2015年3月18日 東京大学駒場キャンパス(東京都目黒区)
11. FePt-C グラニューラー薄膜における Ag 添加による保磁力増大メカニズム  
B. Varaprasad, 高橋有紀子, J. wang, 城山泰祐, 伊奈, 中村哲也, 上野若菜, 新田清文, 宇留賀朋哉, 宝野和博  
日本金属学会 2015年春季講演大会 2015年3月18日 東京大学駒場キャンパス(東京都目黒区)
12. Effect of MgO underlayer misorientation on the texture and magnetic properties of FePt-C granular film  
J. Wang, S. Hata, B. Varaprasad, Y.K. Takahashi and K. Hono  
日本金属学会春季講演大会 2015年3月18日 東京大学(東京都目黒区)
13. Switching field distribution of FePt-C/FePt exchange coupled perpendicular media  
J. Wang, Y.K. Takahashi, J.Y. Kim and K. Hono  
第39回日本磁気学会学術講演会 2015年9月10日 名古屋大学(愛知県名古屋市)
14. Microstructure and magnetic properties of L10 ordered FePt-C nanogranular films  
H. Pandey, A. Perumal, J. Wang, Y.K. Takahashi and K. Hono  
第39回日本磁気学会学術講演 2015年9月10日 名古屋大学(愛知県名古屋市)
15. Concentration gradient layer deposition for the columnar growth of FePt-C granular film for Heat Assisted Magnetic Recording media.  
B. Varaprasad, T. Shiroyama, J. Wang, Y.K. Takahashi and K. Hono  
Intermag, 11st May 2015, Peking (China)
16. Switching field distribution of FePt-C/FePt exchange coupled granular/continuous perpendicular media  
J. Wang, Y.K. Takahashi, K. Hono and J.Y. Kim  
Intermag 11st May 2015, Peking (China)
17. 磁気記録におけるスピントロニクス  
高橋有紀子  
応用物理学会九州支部セミナー(招待講演)2015年12月5日 琉球大学(沖縄県)
18. Microstructure and magnetic properties of FePt-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> granular films.  
T. Shiroyama, b. varaprasad, Y.K. Takahashi and K. Hono  
Intermag 2014  
8<sup>th</sup> May 2014, Dresden (Germany)
19. 多結晶 MgO 下地層による fePt-C の微細構造制御  
城山泰祐, B. Varaprasad, 高橋有紀子, 宝野和博

第 38 回日本磁気学会学術講演会  
2014 年 9 月 2 日、慶應義塾大学日吉キャンパス(東京都港区)

20. The influence of MgO seed layer on the microstructure and magnetic properties of FePt-C HAMR media  
T. Shiroyama, B. Varaprasad, Y.K. Takahashi and K. Hono  
MMM2014, 3<sup>rd</sup> Nov. 2014 Hawaii(USA)
21. Effect of MgO seed layer misorientation on the texture and magnetic properties of FePt-C granular media  
J. Wang, S. Hata, B. Varaprasad, Y.K. Takahashi and K. Hono  
第 38 回日本磁気学会学術講演会 2014 年 9 月 2 日 慶應義塾大学日吉キャンパス(東京都港区)

〔図書〕(計 1 件)

1. Ultra-high density magnetic recording storage materials and media designs  
Kazuhiro Hono and Yukiko K. Takahashi,  
Pan Stanford Publishing, 2016 年 3 月 31 日、  
527 ページ 245-278

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：高配向 FePt 媒体における MgO 下地制御層及び高配向 FePt 媒体  
発明者：ジャンワン/ヒマンシュパンディ/高橋有紀子/宝野和博  
権利者：物質・材料研究機構  
種類：特許  
番号：特願 2016-042851  
出願年月日：2016 年 3 月 4 日  
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 有紀子 (TAKAHASHI YUKIKO)  
物質・材料研究機構・磁性スピントロニクス材料研究拠点・主席研究員  
研究者番号：50421392

(2) 研究分担者

宝野 和博 (HONO KAZUHIRO)  
物質・材料研究機構・磁性スピントロニクス材料研究拠点・拠点長  
研究者番号：60229151

(3) 研究分担者

葛西 伸哉 (KASAI SHINYA)  
物質・材料研究機構・磁性スピントロニクス材料研究拠点・主任研究員  
研究者番号：20378855