

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20686025

研究課題名(和文) 垂直磁化ナノドットのマイクロ波アシスト磁化反転と不揮発メモリへの応用

研究課題名(英文) Microwave-assisted magnetization reversal of perpendicularly magnetized nanoscale magnetic dot and its applications to nonvolatile memories

研究代表者

能崎 幸雄 (NOZAKI YUKIO)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：30304760

研究成果の概要(和文):

本研究では、磁気異方性エネルギーの大きな垂直磁化膜のマイクロ波アシスト磁化反転の実現を目指した。まず、マイクロ波伝送線路を適切な設計で微細加工することにより、垂直磁化膜のマイクロ波アシスト磁化反転に必要なマイクロ波磁場を発生させることに成功した。次に、垂直磁気異方性を有する Co/Pd 多層膜を作製し、マイクロ波磁場をインパルス印加した前後で強磁性共鳴スペクトルを測定することにより、マイクロ波アシスト磁化反転の有無を調べた。その結果、Co/Pd 多層膜の固有周波数よりも 10%低いマイクロ波磁場により、磁化反転が容易化されることを確かめた。

研究成果の概要(英文):

The purpose of this research project is to realize a microwave-assisted magnetization reversal in perpendicularly magnetized films with a large magnetic anisotropy. The results are summarized as follows: (1) The geometrical design of coplanar waveguide producing a microwave field was optimized to be able to realize the microwave-assisted magnetization reversal. (2) It was experimentally confirmed that the magnetization reversal of Co/Pd multilayer with a perpendicular magnetic anisotropy was encouraged by the application of microwave field with a frequency of 10% lower than the intrinsic ferromagnetic resonance frequency.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	20,000,000	6,000,000	26,000,000

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：強磁性共鳴、マイクロ波アシスト記録、垂直磁気記録、垂直磁気異方性

1. 研究開始当初の背景

磁性ランダムアクセスメモリ(MRAM)は、DRAMの大容量・高速性とフラッシュメモリの不揮発性を併せ持つ次世代万能メモリと

して期待されており、国内外で国家プロジェクトとして戦略的研究開発が行われている。2006年に米 Freescale社が量産を開始した第1世代 MRAM は、チップ内配線パターン

の電流磁界を用いた書き込み(磁化スイッチング)方式を採用している。MRAMでは、記憶セル(強磁性体ドット)の体積減少に伴い、磁化の熱擾乱による誤動作が発生しやすくなる。これを防ぐためには、記憶セルに強固な磁気異方性を持たせる必要があるが、同時にスイッチング磁界(磁化反転磁界)の増加を引き起こし、書き込みに必要な配線電流が増大する。印加可能な配線電流に限界があるため、セル幅が100 nm以下になると配線電流磁界では磁化スイッチングが困難になることが予測されている。これを解決する手段として、スピン偏極電流による磁化スイッチング方式が提案・検証され、Gbit/in²級の記録密度を有する第2世代MRAMが現実味を帯びてきた。さらに、DRAMに匹敵する数10 Gbit/in²超の記録密度を実現する第3世代MRAM(セル幅が50 nm以下)では、ハードディスク技術発展の歴史と同様に垂直磁化膜を利用した記憶セルが主流になると考えられている。このため、結晶磁気異方性によって強固に安定化された記憶セルのスピン方位を低消費電力で高速に反転できる新しい方法が求められている。

2. 研究の目的

垂直磁化膜の強磁性共鳴特性が、接合機能層(結晶配向制御に用いる下地膜、垂直磁気異方性の変調に用いるソフト面内磁化膜など)の材料・膜厚に対してどのように変化するかを詳しく調べ、マイクロ波アシスト磁化反転に適した垂直磁化膜の条件を明らかにする。次に、垂直磁化ドットのマイクロ波アシスト磁化反転特性を実験的に調べると同時に、マイクロマグネティクス的手法を用いた計算機解析を行うことにより、スイッチング磁界低減と高速磁化スイッチングを両立するための条件を明らかにする。さらに、数nm~数10nmの微粒子が自己組織的に形成されるグラニュー膜の結晶配向を制御することにより、電子線リソグラフィーを用いた微細加工法では作製が困難な粒径50 nm以下の垂直磁化ドットを作製し、そのマイクロ波アシスト磁化反転特性を詳しく調べる。これにより、第3世代MRAMの書き込み方式としての適性を明らかにする。

3. 研究の方法

次世代HDDでは、磁気異方性エネルギーの大きな垂直磁化膜が媒体に用いられる。垂直磁化膜の場合、面内磁化膜とは反磁界の磁化歳差運動への寄与が異なるため、マイクロ波アシスト磁化反転特性が大きく異なると考えられる。ここでは、垂直磁気異方性を持つCo/Pd多層膜に対するマイクロ波アシスト磁化反転実験について概説する。

Fig. 1にガラス基板上にスパッタ成膜した

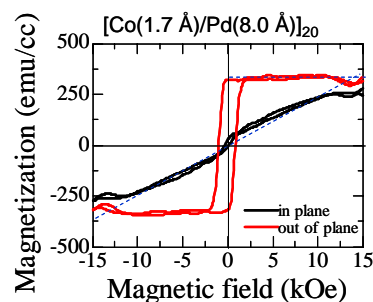


Fig.1 Magnetization curves of Co/Pd multilayer.

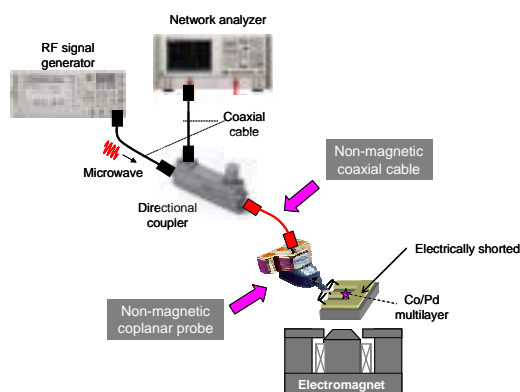


Fig.2 Schematic configuration of experimental setup.

[Co(0.17 nm) / Pd(0.8 nm)]₂₀の磁化曲線を示す。黒線と赤線は、それぞれ面内及び膜厚方向の磁化曲線であり、明確な垂直磁気異方性が確認できる。膜厚方向の保磁力は1.2 kOe、面内方向の飽和磁化から見積もった異方性磁界は18 kOeである。面内方向の磁化曲線の+2.5~-2.5kOeの間に見られる磁化曲線の傾きの増加は、わずかな面内磁気異方性の存在を示唆している。Co/Pd多層膜の垂直磁気異方性は、CoとPdの積層界面におけるd殻電子のHybridizationにより発現すると考えられている。したがって、積層界面の凹凸は膜厚方向を向く磁化容易軸の分散を引き起こし、これが面内磁気異方性を形成する。今回作製したCo/Pd多層膜において見られた面内磁気異方性は、積層界面の凹凸による異方性分散を反映したものと考えられる。

このようなCo/Pd多層膜をリフトオフ法により100×10 μm²の長方形に成型し、その上にマイクロ波磁界印加に用いる短絡型コプレーナ線路を作製した。コプレーナ線路の中心導体の線幅および長さは、それぞれ1 μmおよび100 μmである。垂直磁化膜の強磁性共鳴には、コプレーナ線路が発生するマイクロ波磁界のうち、面内成分が寄与する。したがって、100×10 μm²のCo/Pd多層膜のうち、Co

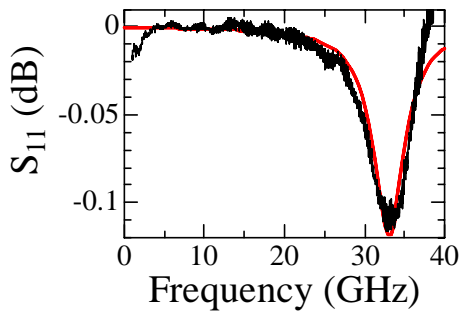


Fig.3 Normalized frequency dependence of S_{11} parameter measured at the remanent state of Co/Pd multilayer.

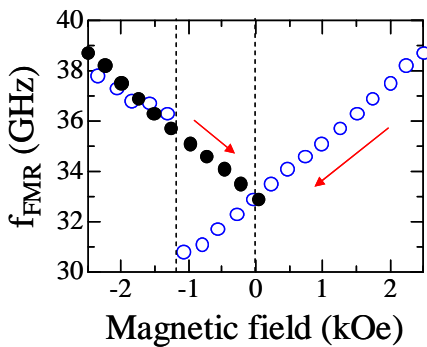


Fig.4 Variation of FMR frequency of Co/Pd multilayer during magnetization reversal process.

プレーナ線路の中心導体直下の $100 \times 1 \mu\text{m}^2$ の部分が強磁性共鳴を起こすと考えられる。

Fig.2 に垂直磁化膜のマイクロ波アシスト磁化反転に用いた実験装置の概略を示す。最大 0.6 T の垂直磁界を発生する電磁石上に試料を固定したのち、コプレーナマイクロ波プローブを用いてマイクロ波発生器およびベクトルネットワークアナライザに接続した。マイクロ波アシスト磁化反転に用いるマイクロ波磁界は、信号発生器からインパルス状のマイクロ波を試料に印加することにより発生する。マイクロ波磁界印加後の磁化反転の有無は、ベクトルネットワークアナライザを用いて Co/Pd 多層膜の FMR スペクトルを測定することにより調べた。信号発生器の最大出力は 20 dBm 、最高周波数は 40 GHz である。詳細は省略するが、信号発生器の大出力マイクロ波がネットワークアナライザにダメージを与えないように、適当な減衰器を取り付けた。また、今回用いた垂直磁界発生装置は、モノポール型電磁石のため漏洩磁界が大きい。したがって、電磁石の磁界発生領域に近い部分の高周波部品には非磁性のものを用いた。特に、コプレーナプローブと方向性結合器を接続した非磁性同軸ケーブルは、本研

究で特注したものである。

短絡型コプレーナ線路にマイクロ波を印加するため、マイクロ波のほとんどが短絡部で反射される。同軸ケーブルとマイクロ波機器との接合部などでもマイクロ波の反射が生じるが、前者に比べて無視できると考えられる。その結果、入射マイクロ波と反射マイクロ波の干渉により、短絡部を腹とする電流の定常波が発生する。基板の誘電率を考慮して定常波の波長を計算すると、 30 GHz の周波数のとき約 4 mm となる。 $100 \times 10 \mu\text{m}^2$ の Co/Pd 多層膜は、コプレーナ線路の短絡部の直近に存在するため、多層膜が受けるマイクロ波磁界強度は線路方向でほとんど一定であると考えられる。

ネットワークアナライザを用いてコプレーナ線路の S_{11} パラメータ（反射係数）を測定することにより、Co/Pd 多層膜の FMR によるマイクロ波吸収スペクトルを測定することができる。ただし、マイクロ波吸収の大きさは 0.01 dB 以下のため、FMR 以外の信号を normalize する必要がある。一般には、マイクロ波磁界を磁化に直交する方向に印加し

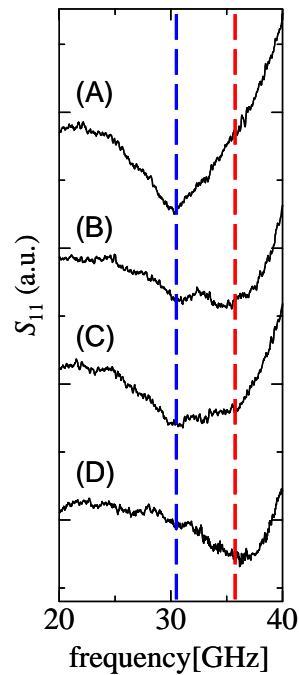


Fig.5 Frequency variations in S_{11} measured after application of microwave impulse with a power of 20 dBm and frequency of 28 GHz . The length of the impulse was fixed at $100 \mu\text{s}$. A dc magnetic field of -1 kOe was simultaneously applied with the microwaves. Dotted and dashed lines represent FMR frequencies for unswitched and switched states, respectively.

て強磁性共鳴を起こした状態と、磁化と平行にマイクロ波磁界を印加することにより強磁性共鳴を起こさない状態の差分をとることにより、FMR 以外の信号成分を取り除く。このためには、コプレーナ線路の中心導体線と平行、および垂直方向に直流磁界を印加する必要がある。しかし、残念ながら今回測定に用いたプローバ装置の場合、磁界印加方向を変えることができない。そこで本実験では、Co/Pd 多層膜の保磁力よりも十分に大きな磁界 5 kOe を印加した状態を基準に S_{11} パラメータの周波数依存性を Normalize した。この測定では、測定磁界の FMR スペクトルが下凸ピーク、参照磁界 5 kOe の FMR スペクトルが上凸ピークとして同時に観察される。

Fig.3 は、残留磁化状態で測定した Co/Pd 多層膜の FMR スペクトルである。赤の実線は、ローレンツ分布曲線であり実験結果をよく説明できていることがわかる。なお、高周波側におけるローレンツ分布からのずれは、参照磁界 5 kOe の FMR スペクトルが出現することによるものである。線幅から見積もった Co/Pd 多層膜のダンピング定数 α は 0.06 ~ 0.08 であり、マイクロ波アシスト磁化反転に必要な条件 $\alpha < 0.2$ を満足していることがわかった。

Fig.4 の白プロットは、+2.5 kOe から -2.5 kOe に磁界を掃引しながら測定した Co/Pd 多層膜の FMR 周波数である。Co/Pd 多層膜の保磁力と一致する -1.2 kOe で FMR 周波数が不連続に増加した。これは、Co/Pd 多層膜の磁化が反転し、磁化と磁界の相対方向が反平行から平行に変化したためである。黒プロットは、磁化スイッチング後に直流磁界をゼロに戻しながら測定した FMR 周波数である。このように、保磁力以下では、磁化と磁界の相対方向の違いにより FMR 周波数の異なる 2 つの状態が安定に存在する。したがって、保磁力以下の任意の直流磁界下で FMR 周波数を測定することにより、Co/Pd 多層膜の磁化反転を検出することができる。本研究では、この方法を用いて Co/Pd 多層膜のマイクロ波アシスト磁化反転を検出した。

4 . 研究成果

Co/Pd 多層膜の保磁力よりも 200 Oe 小さな -1 kOe の直流磁界を印加しながらマイクロ波インパルスを加え、その後 -1 kOe で FMR 周波数を測定することにより磁化反転の有無を調べた。-1 kOe の外部磁場下では、磁化反転が起こると FMR 周波数が 31 から 35GHz に増加する。Fig.5 は、マイクロ波 (20dBm, 28GHz) 印加後の FMR スペクトルの一例である。磁化反転による FMR 周波数の増加が (D) で見られた。しかし、複数回実験を行った結果、(D) のような明確なピークシフトはほとんど見られず、(B) や (C) のようにピーク

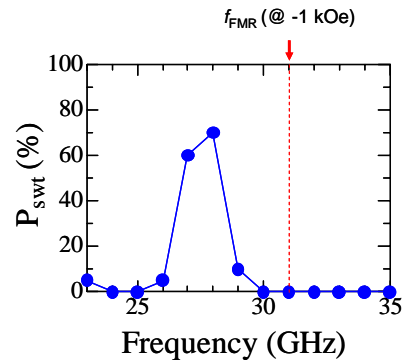


Fig.6 The probability that complete or partial magnetization switching appears as a function of the frequency of the microwave field.

が反転、未反転の 2 つに分離したり、線幅が広がったりといった多磁区構造形成を示唆する結果が多数を占めた。今回の実験では、 $100 \times 10 \mu\text{m}^2$ の Co/Pd 多層膜のうちコプレーナ線路の中心導体線直下の部分のみが大きなマイクロ波磁場を受ける。マイクロ波磁場の印加に伴う多磁区構造の形成は、このようなマイクロ波磁場の不均一印加、もしくは Co/Pd 多層膜の磁気異方性分散が原因と考えられる。Fig.6 に、マイクロ波の印加により磁化反転、もしくは多磁区構造が形成される確率の周波数依存性を示す。マイクロ波アシスト磁化反転を示唆する周波数依存型の磁化反転が見られ、-1 kOe における Co/Pd 多層膜の FMR 周波数 (31 GHz) よりも 3 GHz ほど低い周波数が磁化反転に適していることがわかった。この結果は、結晶粒間の交換結合を考慮したマイクロマグネティクス計算の結果と一致する。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 23 件)

1. Y. Nozaki (他 5 名), "Micromagnetic study on microwave-assisted magnetic recording in perpendicular medium with intergrain exchange coupling", Journal of Applied Physics, 査読有, in press.
2. Y.Nozaki (他 3 名), "Microwave-assisted magnetization reversal in a Co/Pd multilayer with perpendicular magnetic anisotropy.", Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 95, No. 8, 2009, pp.082505-1 - 082505-3.
3. B. Purnama, M. Koga, Y. Nozaki, and K. Matsuyama, "Stochastic simulation of thermally assisted magnetization reversal in sub-100 nm dots with perpendicular anisotropy.", J. Magn. Magn. Mater., 査読有, Vol. 321, No. 9, 2009, pp. 1325-1330.
4. 立石健太郎, 白石壮馬, 能崎幸雄, 松山

- 公秀, 「サブミクロン幅 NiFe 薄膜パターンのマイクロ波アシスト磁化反転」, J.Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 33, No. 3, 2009, pp.208 – 211.
5. B. Purnama, T. Tanaka, Y. Nozaki, and K. Matsuyama, “Material dependence of the thermally assisted magnetization reversal properties in microstructured Co/Pd multilayers.”, Applied Physics Express, 査読有, Vol. 2, No. 3, 2009, pp. 033001-1 - 033001-3.
 6. Y. Nozaki (他 2 名), “Experiments on microwave-assisted magnetization reversal in a submicron-scale Permalloy single element with a zero-field resonance frequency of 6.3 GHz.”, Applied Physics Express, 査読有, Vol. 2, No. 3, 2009, pp. 033002-1 - 033002-3.
 7. Y. Nozaki (他 3 名), “Numerical study on microwave-assisted magnetization reversal of magnetic particles several tens of nanometers wide with perpendicular anisotropy.”, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 105, No. 7, 2009, pp. 07B901-1 - 07B901-3.
 8. Y. Nozaki (他 4 名), “Bistable control of ferromagnetic resonance frequencies in ferromagnetic trilayered dots.”, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 105, No. 1, 2009, pp. 013911-1 - 013911-5.
 9. Y. Nozaki (他 4 名), “Influence of interlayer magnetostatic coupling on the ferromagnetic resonance properties of lithographically patterned ferromagnetic trilayers.”, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 92, 2008, pp.161903-1 - 161903-3.
- [学会発表](計 53 件, うち招待講演 10 件)
1. 能崎幸雄ら, 「微細加工したコプレーナ線路を用いたマイクロ波アシスト磁化反転実験(Invited)」, 電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会, 2011 年 3 月 11 日, 名古屋大学
 2. 能崎幸雄ら, 「ナノスケール強磁性薄膜の強磁性共鳴測定」, 4 大学ナノ・マイクロファブ리케이션コンソーシアム拠点形成シンポジウム, 2011 年 3 月 4 日, 川崎市, 神奈川県
 3. 能崎幸雄, 「次世代磁気記録の課題」, 第 10 回 K L L 産学連携セミナー, 2011 年 2 月 25 日, 慶應義塾大学
 4. 能崎幸雄, 「マイクロ波を用いた新しい磁気記録(Invited)」, 第 140 回スピニクス研究会, 2011 年 2 月 24 日, 東北大学
 5. Y. Nozaki et al., “Micromagnetic Study on Microwave-Assisted Magnetic Recording in Perpendicular Medium with Intergrain Exchnage Coupling.(Invited)”, The 2 nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 15th July 2010, Sendai, Japan.
 6. Y. Nozaki et al., “Experimental study on optimum frequency for microwave-assisted magnetization reversal in perpendicularly magnetized Co/Pd multilayer.”, 11th Joint MMM-Intermag Conference, 19th January, 2010, Washington DC, USA.
 7. 能崎幸雄ら, 「マイクロコプレーナ線路を用いたマイクロ波アシスト記録実験(Invited)」, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ(MR)研究会, 2009 年 10 月 8 日, 福岡市
 8. 能崎幸雄ら, 「ベクトルネットワークアナライザ FMR 分光法による垂直磁化膜パターンの磁化反転検出」, 第 56 回応用物理学会, 2009 年 3 月 30 日, 筑波大学
 9. 能崎幸雄ら, 「コプレーナ線路上に作製した強磁性薄膜パターンのマイクロ波アシスト磁化反転(Invited)」, 電子情報通信学会, 2009 年 3 月 20 日, 愛媛大学
 10. 能崎幸雄ら, 「ベクトルネットワークアナライザ FMR 分光法による NiFe 薄膜パターンのマイクロ波アシスト磁化反転検出(Invited)」, 日本磁気学会第 165 回研究会, 2009 年 3 月 13 日, 中央大学
 11. 能崎幸雄ら, 「マイクロ波磁界を用いた垂直磁化膜パターンのスイッチング磁界低減(Invited)」, 第 24 回スピニクス専門研究会, 2009 年 1 月 16 日, 名古屋大学
 12. Y. Nozaki et al., “Experimental and numerical study on microwave-assisted recording of perpendicular medium.(Invited)”, Intl. symposium at the 33rd Annual Conference on Magnetism, 15th September, 2009, Nagasaki, Japan.
 13. Y. Nozaki et al., “Detection of magnetization reversal in patterned magnetic thin films with perpendicular anisotropy by means of vector network analyzer FMR spectroscopy.”, The International Conference on Magnetism, 30th July, 2009, Karlsruhe, Germany.
 14. Y. Nozaki, “Experimental study on microwave-assisted recording of perpendicular medium using microwave field generated by coplanar waveguide.(Invited)”, International Disc Forum 2009, 22nd July, 2009, Tokyo, Japan.
 15. Y. Nozaki et al., “Experimental study on microwave-assisted magnetization reversal in patterned ferromagnetic thin films.(Invited)”, IEEE Intermag, 7th May,

- 2009, Sacramento, CA, USA.
16. 能崎幸雄, 「マイクロ波磁界を用いた低消費電力磁気記録」, イノベーションジャパン新技術説明会, 2008年9月17日, 東京国際フォーラム
 17. 能崎幸雄ら, 「On-chip FMR 検出を用いた強磁性薄膜パターンのマイクロ波アシスト磁化反転実験」, 第69回応用物理学学会, 2008年9月3日, 中部大学
 18. 能崎幸雄, 「ナノ磁性体のスピンマニピュレーション」, 公開講座・先端サマーセミナー, 2008年8月7日, 福岡市
 19. 能崎幸雄ら, 「強磁性薄膜パターンのマイクロ波アシスト磁化反転実験 (Invited)」, 電気学会マグネティクス研究会, 2008年8月4日, 仙台市
 20. 能崎幸雄ら, 「マイクロ波磁界を用いた低電力磁化スイッチング」, 第9回九州磁気セミナー, 2008年5月22日, 平戸市
 21. Y. Nozaki et al., "Numerical study on microwave-assisted magnetization reversal of several tens nm wide magnetic particle with perpendicular anisotropy.", 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 13th November, 2008, Austin, Texas, USA.
 22. Y. Nozaki et al., "Optimum conditions for microwave-assisted magnetization reversal of 30-nm-thick Permalloy film with lateral size of $2 \times 0.2 \mu\text{m}^2$ fabricated on 0.2- μm -wide coplanar waveguide.", 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 12th November, 2008, Austin, Texas, USA.
 23. Y. Nozaki et al., "Bistable control of ferromagnetic resonance frequencies in ferromagnetic trilayered dots.", IEEE Intermag, 7th May, 2008, Madrid, Spain.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計2件)

名称: 磁性多層膜ドットを用いた高周波デバイス

発明者: 能崎幸雄, 松山公秀

権利者: 九州大学

種類: 特許

番号: 第4189502

取得年月日: 2008年9月26日

国内外の別: 国内

名称: 磁気連想メモリ及び磁気連想メモリからの情報読み出し方法

発明者: 松山公秀, 能崎幸雄

権利者: 九州大学

種類: 特許

番号: 第4426876

取得年月日: 2009年12月18日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

能崎 幸雄 (NOZAKI YUKIO)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号: 30304760

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし