

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：71301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560388

研究課題名(和文)フッ化物系高電気抵抗ナノグラニューラー薄膜の開発とデバイス応用

研究課題名(英文)Development and application of fluoride-based nanogranular films with ultra-high resistivity

研究代表者

大沼 繁弘(Ohnuma, Shigehiro)

公益財団法人電磁材料研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：50142633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高周波ナノグラニューラー軟磁性膜の高抵抗化に関するものである。新しい試みとして、CoPd基磁性合金をナノグラニューラー、フッ化物をマトリックスとした面内一軸異方性膜をタンデムスパッタ法で作製した。フッ化カルシウムをマトリックスとした膜は、従来膜の100倍以上の高い比抵抗を示し、これはフッ化カルシウム良好な結晶性に因ることを明らかにした。さらには、二倍以上の異方性磁界によって1.4倍以上の高い強磁性共鳴周波数を示す膜も得られた。この解明のため、ナノ組織の構造解析を行った結果、結晶配向など、一般的なナノ磁性体の軟磁性発現理論に反する結果を得て、異方性発現メカニズムに関する重要な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：This study is of the development of ultra-high resistive nanogranular soft magnetic films for GHz frequency region. The films, consisting of CoPd-alloy-based magnetic metals and fluoride matrices, were prepared by tandem-sputtering deposition as a novel method for the films. It was clarified that calcium fluoride behaves the best insulation matrix, attributing to its wide energy band gap and great crystallinity. Furthermore, some films exhibited higher ferromagnetic resonance frequency with great in-plane uniaxial anisotropy more than 1.4 times compared with conventional films owing to twice anisotropy field. This superior anisotropy being independent of the induced field was given only by substrate motion of the tandem sputtering. Nanostructure analyses demonstrated innovative orientations of the nanogranules as for the Random Anisotropy Model for soft nanomagnetic materials. These results brought some steps closer to realization of the practical materials for GHz applications.

研究分野：ナノグラニューラー膜

キーワード：ナノグラニューラー軟磁性膜 フッ化物 比抵抗 一軸異方性 異方性磁界 複素透磁率 強磁性共鳴  
高周波磁気応用

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 高周波磁気応用分野の現状

スマートフォンや公衆無線 LAN などの高速通信機器の発展により、数 100MHz~数 GHz 帯の電気信号の利用は今後一層拡大する趨勢にある。高周波機器に用いられる受動デバイスには、インダクタ、カプラ、およびバランなど、電磁誘導性デバイスにおいても、高周波誘電体を用いた磁気的空芯デバイスが用いられている。しかし、通信機器の小型化、薄型化、および内部構成の高密度化により、受動デバイスの小型化およびクロストーク抑制機能を高めるために磁性体を導入することが求められ、開発が進められている<sup>(1)</sup>。さらに、半導体 IC と受動デバイスとの一体化の動きも加速しており<sup>(2)</sup>、デバイスの薄膜積層化が望まれる。ところが、薄膜として利用できる従来の金属系軟磁性材料では、低比抵抗故に渦電流損失の増大が無視できなくなる一方、絶縁性の高いセラミックス系軟磁性フェライト材料に能力を発揮させるためには、磁気特性が劣るためにバルク材料として利用せざるを得ない背景があった。現在、シミュレーションを活用したデバイスの小型化や高効率化について、デバイス設計の側面からは多用な優れた検討がなされているが<sup>(3)</sup>、磁性体の低損失化という実用上不可欠な課題が解決されていないことが一因として、未だ磁性体を用いた薄膜積層型高周波磁気デバイスの実用化段階には至っていない。

### (2) ナノグラニューラー軟磁性膜の有用性と課題

筆者らは、金属系磁性薄膜の高抵抗化を目標に、磁性金属粒子が高抵抗の非金属絶縁相に高密度に分散した構造を持つナノグラニューラー薄膜の研究を行い、所望の膜の合成に成功してきた<sup>(4)</sup>。これらナノグラニューラー膜の比抵抗は、従来高抵抗材料として知られるアモルファス合金磁性膜 ( $10^0 \mu\Omega \cdot m$  程度) の 10 倍の領域 ( $\sim 10^1 \mu\Omega \cdot m$ ) で推移する<sup>(4)</sup>。しかし、この比抵抗でも、望目周波数が GHz 帯となってくると不十分な場合があり、これまでのデバイス設計と同様に、磁性膜の膜厚を薄くし、それらを絶縁膜との交互積層膜化やスリットパターン化する手法などの必要性<sup>(5)</sup>は十分に解消されていなかった。薄い膜厚は、デバイスの磁気回路の高リラクタンス化を招き、磁性体導入によるインピーダンス向上にあまり寄与しないため、結局のところ低損失を優先すると、空芯デバイスとの有意差が得られていなかった。

## 2. 研究の目的

### (1) 課題解決のための着眼点

以上の課題を解決するために、本研究では、膜厚を高めても渦電流発生を抑制できるように、単相膜でフェライト並みの高電気抵抗を有し、金属系磁性膜並の高飽和磁化も兼ね備える磁性薄膜材料を得ることに着眼した。

### (2) 軟磁性膜の設計指針

高飽和磁化と高比抵抗を兼ね備えるために、磁化が高く、かつ高周波特性を高めるために必要な異方性の高い CoPd 基磁性金属をナノグラニュー

ルとし、それがフッ化物から成る高絶縁性マトリックス相に分散するナノグラニューラー軟磁性膜を設計した。

### (3) 磁気デバイスへの応用

優れた高周波特性を示す膜を用いて、磁気デバイスを設計、試作、および評価することを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 試料の作製

従来の反応性スパッタ法(図 1(a))<sup>(4)</sup>においてフッ化物をマトリックス材料としたい場合、フッ素ガスを用いてマトリックス材料を化学合成しながら成膜すると、余剰フッ素ガスの浸食性により装置を著しく劣化させることとなる。そこで、ナノグラニューラー軟磁性膜としては初めての試みとして、図 1(b)に概念が示されるタンデムスパッタ法<sup>(6)</sup>を用いてフッ化物マトリックスを有する膜を作製した。独立したフッ化物ターゲットには、エネルギーバンドギャップが特に高いフッ化マグネシウム ( $MgF_2$ ) やフッ化カルシウム ( $CaF_2$ ) など、種々のフッ化物を用いた。合金ターゲットは、コバルト-パラジウム合金 (CoPd) もしくはコバルト-鉄-パラジウム合金 (CoFePd) とした。膜組成は CoFe (Co<sub>100</sub> を含む) ターゲット組成とそれに貼り付ける Pd チップ量、および合金とフッ化物ターゲットへの投入電力比で調整した。基板は鏡面研磨ガラスとし、298 K に水冷した。基板へは、場合により面内方向に直流磁界を印加した。作製した膜は、磁界中熱処理を施された。

### (2) 試料の評価

得られた試料を、膜厚測定、組成分析、X 線回折測定、X 線極点図解析、TEM および STEM 観察、静磁化特性評価、比抵抗測定、高周波複素透磁率測定、磁区観察、および磁気抵抗効果測定など、様々な側面から評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 高比抵抗化

図 2 のように、 $CaF_2$  が最も膜の比抵抗を高めることを見出し、酸化物や窒化物をマトリックスとした従来膜 ( $\sim 10^1 \mu\Omega \cdot m$ ) よりも 1 桁以上高い比抵抗領域でも軟磁性を示す膜を得ることに成功した。中では 4~6 桁高い試料も得られており、この比抵抗領域は最早 Mn-Zn フェライト ( $\sim 10^8 \mu\Omega \cdot m$ ) と同等である。

TEM によるナノ組織の観察(図 3)や X 線回折により、まず、 $CaF_2$  の結晶性が非常に良好であることがわかった。 $CaF_2$  は、固体において二番目にエネルギーバンドギャップが高い物質である。これが良好な結晶質としてナノグラニューラー構造に存在することができるので、このバンドギャップを維持できる。そのため、従来のアモルファス化する酸化物や窒化物マトリックスと比較して桁違いに高い比抵抗を発すると考えられる。なお、 $CaF_2$  はフッ化物の中でも水に難溶であり、高い工業的信頼性も示すであろう。なお、図 3 の膜は、熱処理されると非常に良好な面内一軸異方性を伴う軟磁性を示した。磁化は 0.58 T、異方性

磁界は 26 kA/m, 比抵抗は  $120 \mu\Omega\cdot\text{m}$  であった。

## (2) タンデムスパッタ法による二つの重要な特性改善

成膜方法をタンデムスパッタ法に変更したことにより、当初の目的には無かった二つの重要な特性改善を達成した。従来法では化学反応を伴うために、膜のロット内およびロット間のバラツキが大きかった。言い換えれば、同一基板内での特性バラツキが大きく、再現性にも乏しかった。タンデム法は化学反応を伴わないため、特性バラツキの要因が減少し、それは特性にも現れた。他方は、一軸異方性を付与するための磁石の有無に関係なく、膜に非常に高い異方性磁界を伴う明瞭な面内一軸異方性が付与されたことである。

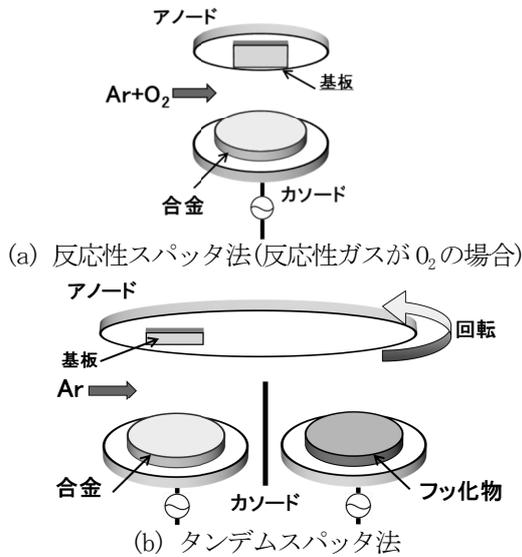


図1 ナノグラニューラー膜のスパッタ成膜概念

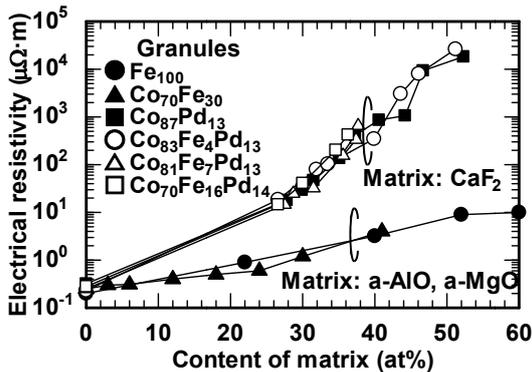


図2 ナノグラニューラー軟磁性膜の比抵抗のマトリックス量依存性(グラニューラー組成で分類)

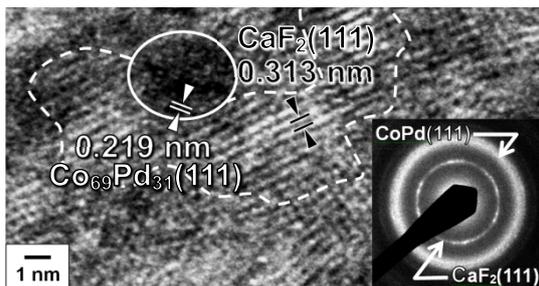
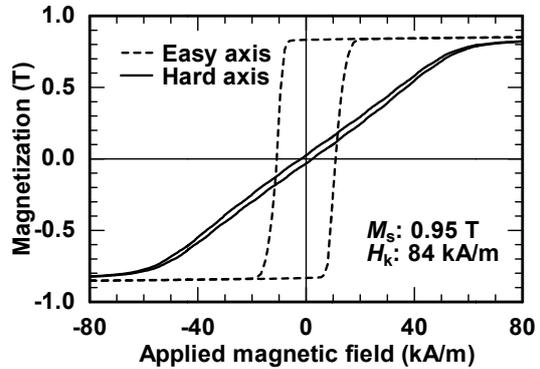


図3  $(\text{Co}_{0.69}\text{Pd}_{0.31})_{52}-(\text{Ca}_{0.33}\text{F}_{0.67})_{48}$  膜の断面 TEM 像

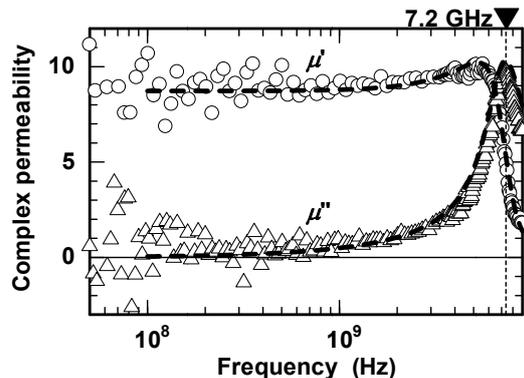
タンデムスパッタ法において、基板は、図1(b)の通り円周軌道上に配されたスパッタリングターゲット上もしくは下を公転し、グラニューラーターゲットとマトリックス用ターゲットを交互に通過する。この時、膜の磁化容易方向は、基板公転の遠心-向心方向に付与された。さらには、従来膜の異方性磁界の最高値が 32 kA/m 程度であったものが<sup>(4)</sup>、その 2.5 倍である 80 kA/m を超える試料が得られた(図4(a))。その結果、高周波複素透磁率の強磁性共鳴周波数は、従来(4~5 GHz)の 1.5 倍程度(7.2 GHz)にまで高められ、グラニューラー軟磁性膜での世界最高水準に到達した(図4(b))。つまり、望目周波数での比抵抗向上による渦電流損失低減のみならず、複素透磁率の虚数部による磁性損失も低減できる膜となった。平成 27 年度に入ってから最新のデータでは、これまでの知見を生かして強磁性共鳴周波数をさらに高めることに成功しており、ナノグラニューラー膜のみならず、軟磁性体としての世界最高水準にも達している。

## (3) ランダム異方性モデルに反する高い異方性磁界の要因検証

磁性ナノ結晶から成るナノ磁性体の軟磁性発現は、ランダム異方性モデルによって理解されてきた<sup>(7)</sup>。このモデルは、ナノ結晶がランダム配向し結晶異方性を打ち消し合うことで、保磁力が小さくなることが前提となっている。つまり、ナノ磁性体において異方性が付与されたとしても、それはアモルファス合金のペアオーダリング<sup>(7)</sup>に類似した偶発的で弱いものであるべきで、異方性の強調には、よほどの形状異方性や異方的内部応力が必要であると考えられる<sup>(8,9)</sup>。



(a) 静磁化特性



(b) 高周波複素透磁率スペクトル(磁化困難軸)  
図4  $(\text{Co}_{0.83}\text{Pd}_{0.17})_{74}-(\text{Ca}_{0.33}\text{F}_{0.67})_{26}$  膜の磁気特性

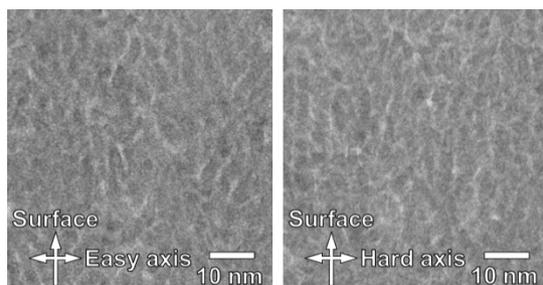
軟磁性領域のナノグラニューラ膜では、ナノグラニューラの形状が球状から回転楕円体形状に変化し、静止対向スパッタベースの従来法で作製した膜のナノグラニューラは、長手方向が膜厚方向に揃うことは以前から知られていた<sup>(10,11)</sup>。本研究では、タンデムスパッタ法で作製した膜で、その長手方向が膜厚方向から面内方向に傾斜した方向に揃っていることを、TEM および STEM 観察から見出した(図5)。さらには、グラニューラの結晶学的磁化容易方向 $\langle 111 \rangle$ が、グラニューラの長手方向に配向していることも新たに見つめられた(図5(b))。つまり、結晶異方性による磁化容易方向が予め面内方向に傾いていることで、従来膜よりも膜厚方向の反磁界によって面内方向に倒されやすくなり、より高い結晶異方性エネルギーを有するグラニューラ、もしくは結晶異方性の長距離浸透性が保たれるグラニューラ密度の高い(グラニューラの多い)組成を有する膜を用いても面内磁化膜となり、異方性磁界が大きくなるものと考えられる。この斜めの配向の要因をさらに詳しく確かめるために、X線極点図解析も行ったが、グラニューラの結晶学的磁化容易方向が、基板への磁界印加に反して、特に基板回転の向心方向に配向していた(図6)。これが面内磁化のみならず、一軸異方性になる要因であると言える。この特異なグラニューラの各種配向は、ランダム異方性モデルに反している。また、基板がターゲット直下にある時間よりも、オフセットされる時間が圧倒的に長いタンデム法において、基板に入射するスパッタ粒子のほとんどが斜め入射になっていることに由来すると考えている。

#### (4) 異方性分散低減に関する検討

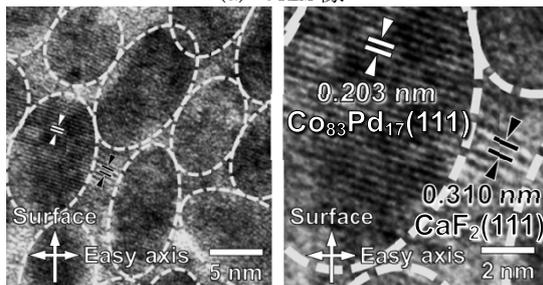
##### ① 角度分散

ナノグラニューラ軟磁性膜は、高い比抵抗と異方性磁界を兼ね備えることが出来る利点があることを先に述べたが、一方で、強い異方性分散を持つことが、以前からの欠点の一つであった。

先に述べた図4~6の試料は、磁界中成膜した



(a) STEM 像



(b) TEM 像

図5  $(\text{Co}_{0.83}\text{Pd}_{0.17})_{74}-(\text{Ca}_{0.33}\text{F}_{0.67})_{26}$  膜の断面ナノ組織：(b)の右図は同左図の拡大像である

ものである。しかし、前述のように、タンデムスパッタ法によって、磁界中成膜を行わなくとも高い強磁性共鳴周波数を有する一軸異方性膜が得られる(図7)。この時、異方性分散の内、角度分散を見ることが出来るギルバート・ダンピング定数が磁界中成膜で0.14であったものが、組成がほとんど変わらないにもかかわらず、無磁界中成膜では0.06まで減少した。本膜のTEM/STEM観察では全く見分けが付かなかったが、無磁界中成膜した膜の極点図では、図8の通り、磁界中成膜の図6と比較すると極が小さくなっており、これが異方性分散の減少に寄与していると考えられる。磁界中成膜では、図6の通り、基板回転によって膜が磁化困難になる方向に磁界を印加している。その影響と思われるが、印加磁界のN極方向にナノグラニューラの結晶配向が一部流れていることも確認され、これが角度分散の増大に寄与していると考えられる。

##### ② 強度分散

ところで、図7の通り、無磁界中成膜した試料では、複数の強磁性共鳴成分が重畳していることが明確に見えるようになった。これは、ギルバート・ダンピング定数が小さくなったことで、強度分散が見えるようになったためと考えられる。LLG方程式に基づく多重計算(破線)により、主ピークが5.5 GHzであるのに対し(▼)、これより寄与度の低い第二ピークが7.6 GHzにも存在することがわかった(▽)。上述のギルバート・ダンピング定数の変化は異方性の角度分散の変化に伴うものであるが、強磁性共鳴の分離は強度分散によるものである。実は、図4(b)における多重計算(破線)によっても強度分散が存在していることがわかっているが、各強磁性共鳴成分の角度分散が大きいため、明確に共鳴の分離が確認されないだけである。この強度分散は、スパッタ合金ターゲットにPdチップを貼り付けていることによる転写性の影響によって、ナノスケールでの個々のナノグラニューラの組成にバラツキがあるためと考えられる。X線回折によるグラニューラ組成の同定もこれを支持した。

##### (5) まとめ

① 本科研費の助成によって、種々の磁性合金とフッ化物を系統的に組み合わせたナノグラニューラ軟磁性膜を作製し、以下の成果を得ることができた。

② 目標である、膜厚を厚くしても高周波帯域の渦電流損失の発生を抑制するに十分に大きな比抵抗(単相膜でも軟磁性フェライト材料と同等の比抵抗)を有し、かつ金属系軟磁性材料並みの高飽和磁化を併せ持つ磁性薄膜材料の合成に成功した。

③ 具体的には、大きな飽和磁化と異方性を兼ね備えたCoPd基磁性合金をグラニューラ材料として、高いエネルギーバンドギャップを持つ絶縁フッ化物をマトリックス材料として用い、タンデム

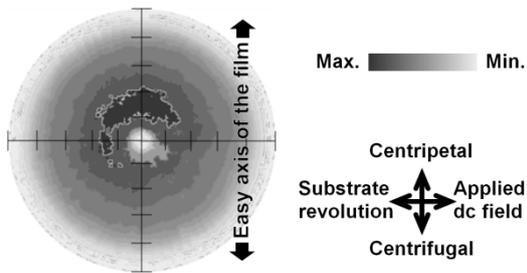


図 6  $(\text{Co}_{0.83}\text{Pd}_{0.17})_{74}-(\text{Ca}_{0.33}\text{F}_{0.67})_{26}$  膜における  $\text{Co}_{33}\text{Pd}_{17}$  グラニューール 111 面の極点図

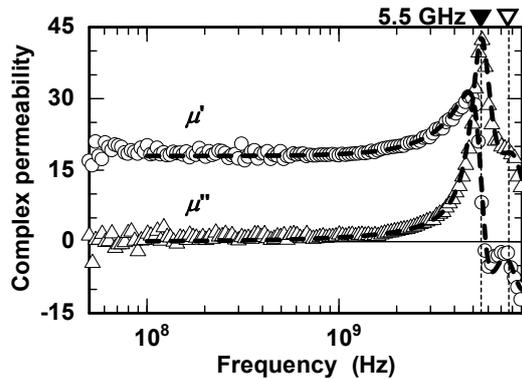


図 7 無磁界中成膜した  $(\text{Co}_{0.85}\text{Pd}_{0.15})_{74}-(\text{Ca}_{0.33}\text{F}_{0.67})_{26}$  膜の高周波複素透磁率スペクトル (磁化困難軸, 磁化: 0.95 T, 異方性磁界: 69 k A/m)

スパッタ法により Co (Fe)Pd-フッ化物系ナノグラニューール膜を合成した。フッ化物の中でも、 $\text{CaF}_2$  はナノグラニューール構造においても優れた結晶性を有しており、高い絶縁性を維持できることで、ナノグラニューール膜の高抵抗化をもたらした。また、組成が Co (Fe)Pd リッチとなる膜は、高比抵抗を維持しながら優れた高周波軟磁気特性を示した。その中で、静的透磁率は約 10 でありながら、強磁性共鳴周波数が 7 GHz を超える試料が得られた。この結果は、本膜の高い飽和磁化と異方性磁界によるものであり、ナノグラニューール軟磁性膜にとって世界最高水準のものである。よって、見出した膜の設計指針は、今後の超高周波磁気デバイスの発展に大きく寄与するものと考えられる。また、優れた高周波特性や、その一方で欠点である異方性分散の要因についても検討し、今後にとって良い知見を得た。

④ なお、当初の研究目的では、良好な高周波特性を示す膜を用いた磁気デバイスの設計、試作、およびその評価を行う予定であったが、膜特性で多くの結果が得られたことから、それらの解析を優先して研究を進めた。ナノグラニューール軟磁性膜の高抵抗化のみならず、高周波化も達成できたことにより、本研究助成の効果は目的以上に得られたと確信しているが、今後、機会を設けて本研究成果を高周波磁気応用にまで発展させたい。

<引用文献>

- (1) M. Yamaguchi, N. Matsumoto, H. Ohzeki, and K. I. Arai: IEEE Trans. Magn. 26 (1990) pp. 2014-2016.

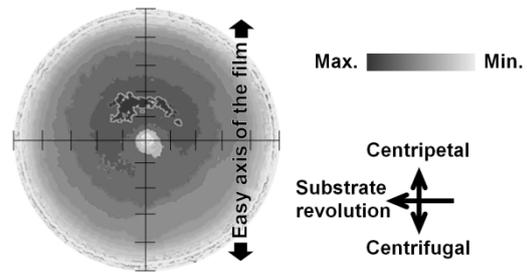


図 8 無磁界中成膜した  $(\text{Co}_{0.85}\text{Pd}_{0.15})_{74}-(\text{Ca}_{0.33}\text{F}_{0.67})_{26}$  膜における  $\text{Co}_{35}\text{Pd}_{15}$  グラニューール 111 面の極点図

- (2) K. Onizuka, K. Inagaki, H. Kawaguchi, M. Takamiya, and T. Sakurai: IEEE J. Solid-State Circuits 42 (2007) pp. 2404-2410.
- (3) S. Ikeda, K. H. Kim, and M. Yamaguchi: J. Appl. Phys. 97 (2005) article no. 10F912.
- (4) S. Ohnuma, M. Ohnuma, H. Fujimori, and T. Masumoto: J. Magn. Mater. 310 (2007) pp. 2503-2509.
- (5) N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Masumoto, and H. Fujimori: J. Magn. Soc. Jpn. 23 (1999) pp. 76-78.
- (6) G. Herzer: IEEE Trans. Magn. 26 (1990) pp. 1397-1402.
- (7) H. Fujimori, S. Ohta, T. Masumoto, and K. Nakamoto: Proc. 3rd Inter. Conf. Rapidly Quenched Metals 2 (1987) pp. 232-239.
- (8) 森崎 裕基, 柄澤 大樹, 曾根原 誠, 佐藤 敏郎, 高木 宏幸, 井上 光輝: 電気学会研究会資料 MAG-13-155 ~ 173, MAG-13-160 (2013) pp. 29-34.
- (9) J. Shin, S. H. Kim, Y. Suwa, S. Hashi, and K. Ishiyama: J. Appl. Phys. 111 (2012) article no. 07E511.
- (10) M. Ohnuma, K. Hono, H. Onodera, S. Ohnuma, H. Fujimori, and J. S. Pederson: J. Appl. Phys. 87 (2000) pp. 817-823.
- (11) W. J. Jung, C. G. Lee, B. H. Co, K. S. Shin, and Y. Shimada: J. Korean Phys. Soc. 49 (2006) pp. 992-995.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者および研究連携者には下線)

【雑誌論文】(計 19 件)

### (1) 査読有り 計 12 件

- ① M. Naoe, N. Kobayashi, S. Ohnuma, M. Watanabe, T. Iwasa, and H. Masumoto: "Control of in-plane uniaxial anisotropy of CoPd-CaF<sub>2</sub> nanogranular films by tandem-sputtering deposition," IEEE Magn. Lett. 5 (2014) article# 3700404, doi: 10.1109/LMAG.2014.2372691.
- ② M. Naoe, N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Iwasa, K. I. Arai, and H. Masumoto: "Ultra-high resistive and anisotropic CoPd-CaF<sub>2</sub> nanogranular soft magnetic films p

prepared by tandem-sputtering deposition,” J. Magn. Magn. Mater. 391 (2015) p. 213-222, doi: 10.1016/j.jmmm.2015.04.103

## (2) 査読無し 計7件

- ① 直江 正幸, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 岩佐 忠義, 石田 今朝男, 荒井 賢一, 増本 博: “FMR 周波数が SHF 帯に及ぶ高電気抵抗 CoFePd-CaF<sub>2</sub> ナノグラニューラー軟磁性薄膜の作製”, 電気学会研究会資料 MAG-13-048~059, MAG-13-048 (2013) pp. 1-6.
- ② 直江 正幸, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 岩佐 忠義, 石田 今朝男, 荒井 賢一, 増本 博: “高異方性磁界と高比抵抗を兼ね備える CoPd-CaF<sub>2</sub> ナノグラニューラー軟磁性膜の基礎検討”, 電気学会研究会資料 MAG-13-028~047(LD-13-032~051), MAG-13-042(LD-13-046) (2013) pp. 75-80.
- ③ 直江 正幸, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 岩佐 忠義, 石田 今朝男, 荒井 賢一, 増本 博: “タンデム法で作製したナノグラニューラー軟磁性薄膜の異方性の要因”, 電気学会研究会資料 MAG-13-122~140, MAG-13-133 (2013) p. 59-64.
- ④ 直江 正幸, 小林 伸聖, 大沼 繁弘, 渡邊 雅人, 飯塚 昭光, 岩佐 忠義, 増本 博, 山上 朋彦, 橋本 佳男: “タンデム法で作製したナノグラニューラー軟磁性膜の面内一軸異方性と結晶配向およびナノ組織との関係”, 電気学会研究会資料 MAG-14-225~235, MAG-14-235 (2014) pp. 61-66.

## [学会発表] (計45件)

### (1) 招待講演(国際会議) 計1件

### (2) 一般講演(国際会議) 計10件

- ① M. Naoe, N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Iwasa, K. Ishida, H. Masumoto, and K. I. Arai: “Nano-granular Soft Magnetic Thin Films Having Both Ultra-high Resistivity and Magnetization more than Ferrite,” The 11th International Conference on Ferrite, Okinawa, Japan (2013.4).
- ② M. Naoe, S. Ohnuma, N. Kobayashi, M. Watanabe, T. Iwasa, K. Ishida, K. I. Arai, H. Masumoto, T. Yamakami, and Y. Hashimoto: “Induced Magnetic Anisotropy of CoPd-CaF<sub>2</sub> Nano-granular Films Prepared by Tandem Sputtering Method with Substrate Revolution,” IEEE International Conference on Microwave Magnetism 2014 (ICMM 2014), Sendai, Japan (2014.7).

### (3) 一般講演(国内会議) 計34件

- ① 直江 正幸, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 岩佐 忠義, 石田 今朝男, 荒井 賢一, 増本 博: “高異方性 CoPd-CaF<sub>2</sub> ナノグラニューラー軟磁性薄膜の磁気特性と電気抵抗率,” 日本金属学会 2013 年春期講演大会, 東京 (2013.3).

- ② 直江 正幸, 小林 伸聖, 大沼 繁弘, 岩佐 忠義, 石田 今朝男, 増本 博, 金田 安司, 荒井 賢一: “タンデム法で作製した Co(Fe)Pd-CaF<sub>2</sub> ナノグラニューラー軟磁性膜の巨大異方性磁界,” 第37回日本磁気学会学術講演会, 札幌 (2013.9).
- ③ 直江 正幸, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 岩佐 忠義, 石田 今朝男, 荒井 賢一, 増本 博: “GHz 対応に向けたナノグラニューラー軟磁性膜の高抵抗化,” 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 仙台 (2013.11).
- ④ 直江 正幸, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 岩佐 忠義, 荒井 賢一, 増本 博, 山上 朋彦, 橋本 佳男, 村上 祐貴彦, 栢 修一郎, 石山 和志: “CoPd-CaF<sub>2</sub> ナノグラニューラー軟磁性膜の磁気特性とナノ構造との関係,” 平成 26 年電気学会全国大会, 松山 (2014.3).

## [図書] (計0件)

## [産業財産権]

### ○出願状況 (計1件)

名称: 高電気抵抗強磁性膜  
発明者: 小林 伸聖, 岩佐 忠義, 直江 正幸  
権利者: 公益財団法人電磁材料研究所  
種類: 特許  
番号: 特願 2013-049497  
出願年月日: 平成 25 年 3 月 12 日  
国内外の別: 国内

### ○取得状況 (計0件)

## [その他]

### (1) 受賞

- ① M. Naoe, N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Iwasa, K. Ishida, H. Masumoto, and K. I. Arai: “Nano-granular Soft Magnetic Thin Films Having Both Ultra-high Resistivity and Magnetization more than Ferrite,” New Product & Novel Technology Award, The 11th International Conference on Ferrite (ICF11) (2013.4).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大沼 繁弘 (OHNUMA, Shigehiro)  
公益財団法人電磁材料研究所・特任研究員  
研究者番号: 50142633  
(平成 27 年度より特別研究員)

### (2) 研究分担者

増本 博 (MASUMOTO, Hiroshi)  
東北大学 学際科学フロンティア研究所・教授  
研究者番号: 50209459

直江 正幸 (NAOE, Masayuki)  
公益財団法人電磁材料研究所・主任研究員  
研究者番号: 50533725

以上