

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：71301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02468

研究課題名(和文) 巨大ファラデー効果を示すナノグラニューラー薄膜材料の開発

研究課題名(英文) Development of nanogranular films with giant Faraday effect

研究代表者

小林 伸聖 (Kobayashi, Nobukiyo)

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：70205475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：ファラデー効果を示す材料は、光通信システムに広く用いられ、先端情報技術には必須である。本研究では、光通信波長で大きなファラデー効果を示すナノグラニューラー膜について、その性能指数の向上、さらなる機能性を付与する検討を行った。その結果、マトリックスにBaF<sub>2</sub>を選択し、さらに成膜後の熱処理によって性能指数が大きく改善する、半導体プロセスへの適応のためマトリックスにSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>を選択することによって、高屈折率のナノグラニューラー膜が実現する、グラニューールに硬磁性Co<sub>3</sub>Ptを選択することにより、無磁場でファラデー効果を発現するナノグラニューラー膜が実現する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々は、独自にナノグラニューラー膜の機能性についての研究を続けてきた。そして、高周波磁気特性、トンネル磁気抵抗効果、磁気誘電特性および磁気光学特性など、様々な機能性を発見し、基礎的な物性メカニズムの解明からその実用化に至るまでの実績を重ねてきた。本研究が提案するナノグラニューラー膜において、その磁気光学特性が向上すれば、磁気光学デバイスの大幅な小型化とそれに伴う集積化が実現し、その先の、光集積回路実現のための技術的な足掛かりとなる。加えて、ナノグラニューラー膜の原子オーダーの構造解析と多機能性の相関を検討することにより、機能性の発現メカニズムが明らかになれば、新物性理論への展開も期待できる。

研究成果の概要(英文)：Magneto-optical materials with Faraday effect, are widely used in various optical devices. In this study, we investigated the enhancement of the figure of merit and the addition of further functionality to nanogranular films that exhibit a Faraday effect at optical communication wavelengths. As a result, (1) The figure of merit can be greatly improved by selecting BaF<sub>2</sub> as the matrix and further heat treatment after film deposition, (2) a high refractive index nano-granular film is realized by selecting Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> as the matrix for adaptation to semiconductor processes, and (3) by selecting hard magnetic Co<sub>3</sub>Pt for the granules, a nanogranular film exhibits the Faraday effect in no magnetic field.

研究分野：磁性薄膜、磁気センサ

キーワード：ナノグラニューラー 磁気光学効果 ファラデー効果 磁性薄膜 磁気誘電効果 多機能性 透明強磁性体 フッ化物

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ナノグラニューラー材料は、フッ化物等から成る絶縁体マトリックスに、微細な磁性グラニューラーが分散したナノメーターオーダーの微細な構造を有し、その量子サイズ効果によって、新しい原理に基づくユニークかつ多様な機能性を示す。ナノグラニューラー膜は、マトリックスに分散する磁性グラニューラーの含有量によって、その機能性は様々に変化する。グラニューラーの含有量が多量の場合は、磁化の大きな強磁性と GHz におよぶ高周波帯域において優れた透磁率特性を示す。グラニューラーの含有量が少なくなると、電気伝導はグラニューラー間のトンネル伝導によって生じ、スピントネル磁気抵抗効果を示す。さらに、グラニューラーの量が少なくなると、膜は絶縁性を示し誘電体として機能し、トンネル伝導に伴うグラニューラー間の電荷移動に起因する新規な磁気-誘電効果を示す。さらに近年、ナノグラニューラー膜において、磁性と光透過性を同時に併せ持つ、透明強磁性体が得られることが分かった。さらに、このナノグラニューラー膜のファラデー効果を検討した結果、光通信波長帯で従来材料である Bi-YIG に比して 40 倍もの巨大なファラデー効果を示すことを明らかにした。特筆すべきナノグラニューラー膜の特長は、これらの機能性が全て室温以上の温度にて発現し、作製が容易で再現性が良く、優れた耐熱性を有するなど、実用上の優位点を有することである。申請者らはナノグラニューラー膜の特長を生かした超小型高感度磁気センサの実用化に成功している。

この様に、ナノグラニューラー膜は、その構造に起因する新規な機能性を発揮し、実用化の実績もあり、通信波長帯に用いるための新しい磁気光学材料となり得るものである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、Bi-YIG に代わる新しいファラデー効果薄膜材料の実現である。1972 年に Bi-YIG が発見されて以来、世界中で様々な検討がなされてきたにもかかわらず、それに代わる新しいファラデー効果材料は見出されていない。Bi-YIG はバルク結晶材料で薄膜化できないため、光デバイスの小型化に対応できない。また、強磁性のキュリー温度が低いので温度安定性が悪いなどの多くの欠点がありながら、代わる材料が見出されてこないので、Bi-YIG を用いた光デバイスには多くの制約があった。

### 3. 研究の方法

(1) ナノグラニューラー膜のファラデー効果は、その微細な膜構造に起因し、膜構造は合成する膜組成や成膜方法の調整によって様々に制御することができる。膜組成に関しては、グラニューラーを成す物質とマトリックスを成す物質のそれぞれの選択と組み合わせが考えられる。また膜構造の制御については、グラニューラーの粒径、粒径分布、分散状態、結晶性など、またマトリックスについてはその結晶性や配向など、さらにグラニューラーとマトリックスの界面構造など多くの要素が考えられる。本研究では、それら膜構造の各要因のファラデー効果に及ぼす影響を明らかにし、さらには、膜組成や作製条件の調整による膜構造の制御を試みることによって、ファラデー効果の性能指数の高いナノグラニューラー膜を得ることを目指す。これを踏まえ、以下の各項目について研究を推進する。

(2) 第一に、スパッタ成膜における、膜組成および作製条件の検討を行う。膜組成の選択と作製条件を種々調整することによって、膜構造の異なるナノグラニューラー薄膜試料を作製する。膜組成に関しては、グラニューラーには強磁性元素の単体か合金、マトリックスには良好な光透過性を有するフッ化物を選択する。具体的には、強磁性金属である Fe, Co, Fe-Co 合金のターゲットと、 $MgF_2$ ,  $CaF_2$ , または  $BaF_2$  などのフッ化物焼結ターゲットを原料として薄膜試料を作製する。作製条件では、特に膜を成長させる基板温度に着目する。スパッタ膜の結晶構造および結晶性は膜の成長時の温度によって変化するため、グラニューラーやマトリックスの結晶性を制御するには、適当な温度に昇温された加熱基板上に薄膜を成長させることが有効である。これらの実験によって、種々の異なった微細構造を持つナノグラニューラー膜を作製する。薄膜試料は、ANELVA-SPF-332HS スパッタ成膜装置を用いたタンデム法 で作製する。

(3) 次に、得られたナノグラニューラー膜試料に対して、ファラデー効果と光透過特性を評価する。また、ファラデー効果は本質的にその材料の磁気特性と関連するため、磁化曲線の計測を進める。さらに、光学特性の挙動は電気伝導特性や誘電特性との相関があるため、電気抵抗の評価、磁気抵抗効果、さらには高周波帯域での誘電特性も併せて評価する。

(4) さらに、得られた薄膜試料について、それらの膜構造を評価する。構造解析には、いかにナノグラニューラー膜の構造因子を分類して評価できるかが重要となる。これには、ナノオーダーの分解能を有する構造解析手法が必要であり、X線回折装置(BRUKER D2 PHASER, 申請)および高分解能電子顕微鏡を用い、グラニューラーの粒径や分布状態、マトリックスの結晶性や配向など、膜の微細構造を詳細に検討する。ここで得られたデータを解析することによって、ファラデー効果

と膜特性の関係を明らかにする。

(5) 上記(1)-(4)で得られた知見を基に、ナノグラニュー膜の組成および作製条件と、得られた薄膜試料の構造、そしてファラデー効果等の諸特性の関係を整理し、これを基に、目標とするファラデー効果の性能指数を有するナノグラニュー膜合成のための材料設計の方針を確立する。想定通りに研究が進展した場合は、対象とする膜組成の選択範囲を拡大して、磁性ナノグラニュー膜に異方性磁界が大きく硬磁性を示し粒径が小さくとも強磁性を示すことが期待できる Fe-Pt, Co-Pt や Fe-Pd, Co-Pd 合金を用いたナノグラニュー膜の検討を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 膜組成の検討によって、マトリックスの結晶性を向上させ、高い光透過性を示す膜が得られることが明らかになった。図1には、FeCo-BaF、FeCo-YF 膜および FeCo-AlF 膜の膜中の波長 1550 nm における光透過率と膜中の Fe+Co 量の関係を示す。マトリックスに BaF<sub>2</sub> を選択することにより、同じ Fe+Co(グラニュー)を含有する膜について、より高い光透過率を示すことがわかる。さらに、成膜後の熱処理により、光透過率、ファラデー回転角が共に向上することが明らかとなった。図2には、FeCo-BaF 膜(Fe+Co 29 at.%)について、500 の基板上に成膜後、さらに 600 で熱処理した場合における、成膜直後と熱処理後の光透過率の波長変化(a)と波長 1550 nm の入射光に対するファラデー回転角の磁場依存性を示す。成膜後の熱処理によって、光透過率およびファラデー回転角ともに2倍程度も増加していることが分かる。図1、及び図2の結果は、ナノグラニュー構造において高い結晶性を有する BaF<sub>2</sub> マトリックスの選択、また加熱基板上への成膜並びに熱処理によって、さらなる結晶性の向上がなされた効果であると考えられる。この様に、膜組成、成膜条件を検討することによって、光透過率およびファラデー回転角の向上、すなわち性能指数の高いナノグラニュー膜が実現した。

(2) ナノグラニュー膜の実用化に際して考慮すべきことの一つとして、デバイス設計への適合性について考慮する必要がある。すなわち、ナノグラニュー膜を用いた光導波路を設計する場合、フッ化物のマトリックスは高い光透過性を示す反面、屈折率が低いため、光導波路のコア材などの高屈折率材料が求められるデバイスへの適用には、かなりの工夫が必要になり、デバイスの構成も複雑になることが考えられる。しかしながら、そもそも高屈折率を持つマトリックス材料を採用することができれば、光導波路の設計は容易になり、さらには、デバイスの必要に応じて光学特性が自由に調整できれば、その材料特性に縛られることなくデバイスへの適用が可能となる。これを考慮し、高屈折率を有するナノグラニュー膜の作製を目的として、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>をマトリックスとしたナノグラニュー膜の作製を検討した。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>は、高屈折率材料であり、Si系半導体とのプロセスの親和性も高い。図3には、膜中の Fe+Co 量が同程度の FeCo-BaF 膜および FeCo-SiN 膜のエリブソメータの測定値を解析して得られた屈折率の波長依存性を示

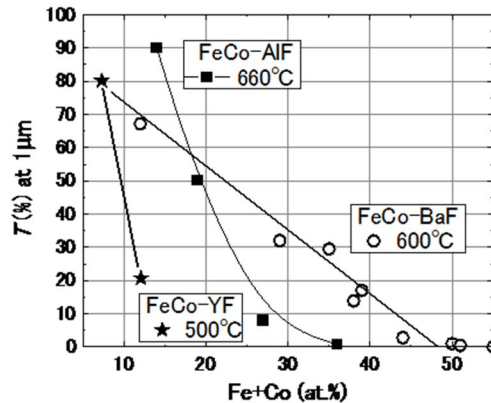


図1 FeCo-BaF(基板温度 600 )、FeCo-YF 膜(基板温度 500 )および FeCo-AlF(基板温度 660 )膜の膜中の波長 1550 nm における光透過率(T)と膜中の Fe+Co 量の関係。

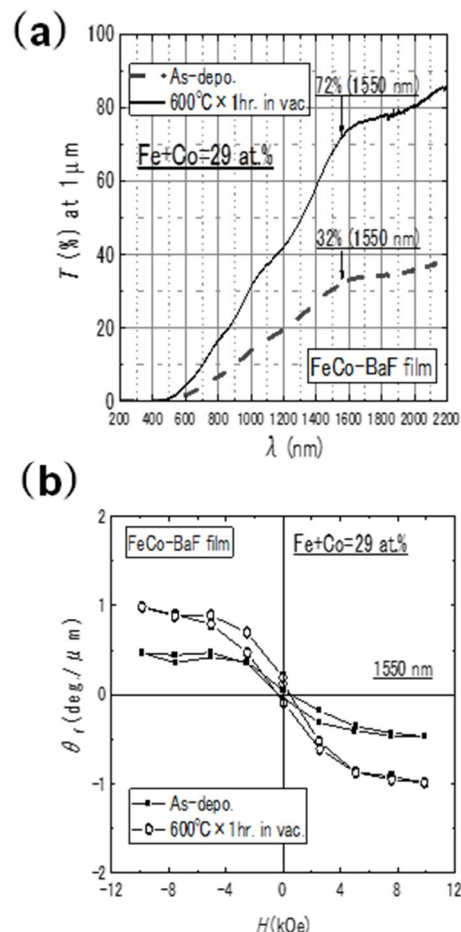


図2 FeCo-BaF 膜(Fe+Co 29 at.%)について、500 の基板上に成膜後、さらに 600 の熱処理した場合における、成膜直後と熱処理後の光透過率(T)の波長(λ)変化(a)と波長 1550 nm の入射光に対するファラデー回転角(θ<sub>F</sub>)の磁場(H)依存性。

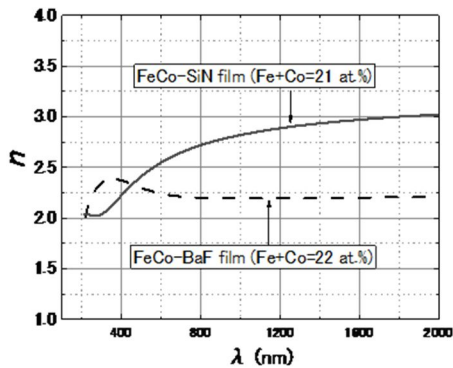


図3 FeCo-SiN (Fe+Co=21 at.%) および FeCo-BaF (Fe+Co=22 at.%) 膜の屈折率( $n$ )の波長( $\lambda$ )依存性。

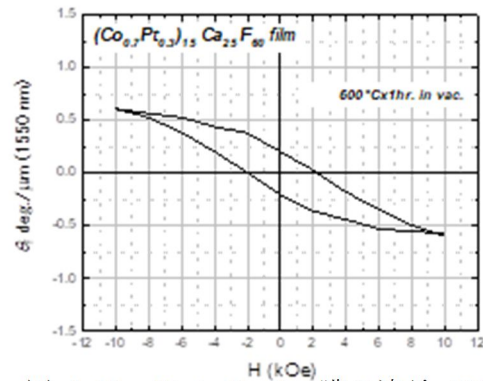


図4  $(\text{Co}_{0.7}\text{Pt}_{0.3})_{15}\text{Ca}_{25}\text{F}_{60}$  膜の波長 1550nm におけるファラデー効果。

す。FeCo-BaF 膜に比べて FeCo-SiN 膜は大きな屈折率を示しており、マトリックスを  $\text{Si}_3\text{N}_4$  としたナノグラニューラ膜において屈折率の大きな材料が得られていることが分かる。

(3)磁性ナノグラニューラに、保磁力と残留磁化を有する Co-Pt 合金を用いたナノグラニューラ膜の作製を検討した。ナノグラニューラ膜は、スパッタ法で作製される膜厚がサブミクロンから数ミクロン程度の薄膜材料であり、光通信デバイスの微細化・集積化を可能とする材料となり得る。一方、磁気光学デバイスには、組み込まれた磁気光学材料を磁化するために磁場を印加する機構が必要である。この磁場の印加は、磁気光学デバイスの大きな容積を占め、これらのデバイスの小型化と集積化の障害となっている。図4には、 $(\text{Co}_{0.7}\text{Pt}_{0.3})_{15}\text{Ca}_{25}\text{F}_{60}$  膜の波長 1550nm でのファラデー効果を示す。ファラデー効果は保磁力と残留磁化に伴うヒステリシスを有し、零磁界で約  $0.25\text{deg./}\mu\text{m}$  のファラデー回転角を示す。XRD の結果から、この膜のグラニューラは  $\text{Co}_3\text{Pt}$  規則相から成ることが明らかとなり、材料自身の残留磁化によって、磁界を印加しない状態でファラデー効果を示す材料が実現した。これにより、磁気光学デバイスの設計において磁界印加機構が不要となり、デバイスの簡素化・小型化の実現に大きく貢献すると考えられる。

#### <引用文献>

- S.Ohnuma, H.Fujimori, S.Mitani, and T.Masumoto : "High frequency magnetic properties in metal-nonmetal granular films", J. Appl. Phys., 79, 5130 (1996) [小林ら, J.Appl.Phys. 90(2001)4159-4162]
- H.Fujimori, S.Mitani, and S.Ohnuma : "Tunnel-type GMR in metal-nonmetal granular alloy thin films", Mater. Sci. Eng. B, 31, 219-223, DOI:10.1016/0921-5107(94)08032-1 (1995)
- N.Kobayashi, H.Masumoto, S.Takahashi, and S.Maekawa : "Giant dielectric and magnetoelectric responses in insulating nanogranular films at room temperature", Nature Communications, 5:4417, DOI:10.1038/ncomms5417 (2014)
- N. Kobayashi, K. Ikeda, Bo Gu, S. Takahashi, H. Masumoto, and S. Maekawa : "Giant Faraday Rotation in Metal-Fluoride Nanogranular Films, Scientific Reports", 8:4978, DOI:10.1038 /s41598-018-23128-5 (2018)
- N.Kobayashi, S.Ohnuma, T.Masumoto, and H.Fujimori : "(Fe-Co)-(Mg-fluoride) insulating nanogranular system with enhanced tunnel-type magnetoresistance", J. Appl. Phys., 90, 4159-4162, DOI:10.1063/1.1376415 (2001)
- N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Masumoto, and H. Fujimori : "Tunnel-type magnetoresistance in metal-nonmetal granular films prepared by tandem deposition method" J. Magn. Soc. Jpn. 23, 1-2, 76-78, DOI:10.3379/jmsmag.23.76 (1999).
- 小林伸聖, 池田賢司, 荒井賢一 : FeCo-BaF および FeCo-SiN 系ナノグラニューラ膜の巨大ファラデー効果, 電気学会誌, Vol.141 No.2 pp.123-127(2021)
- Nobukiyo Kobayashi, Tadayoshi Iwasa, Kenji Ikeda and Ken-Ichi Arai : "Faraday effect in CoPt-CaF<sub>2</sub> nanogranular films with hard magnetic property for magnetic-field-free Faraday devices" Front. Phys. 10:940370, DOI:10.3389/fphy.2022.940370 (2022)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Loi Tonthat, Toru Murayama, Nobukiyo Kobayashi, Shin Yabukami, Wakako Ikeda-Ohtsubo, and Ken Ichi Arai	4. 巻 13
2. 論文標題 A simple antigen-antibody reaction using ultrasmall FeCo nanoparticles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025009 ~ 025009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000569	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 直江 正幸、曾根原 誠、松永 温加、宮地 幸祐、佐藤 敏郎、小林 伸聖、荒井 賢一	4. 巻 MAG-22
2. 論文標題 タンデム法で磁界中成膜したCoFe-フッ化物ナノグラニューラー膜の異方性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料	6. 最初と最後の頁 128 ~ 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Moe Kimura, Yang Cao, Hanae Kijima-Aoki, Nobukiyo Kobayashi, Shigehiro Ohnuma, Hiroshi Masumoto	4. 巻 63
2. 論文標題 Tunneling Magnetodielectric Effect in Co-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Granular Films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1677 ~ 1681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2022098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nobukiyo Kobayashi, Tadatoshi Iwasa, Kenji Ikeda and Ken-Ichi Arai	4. 巻 10
2. 論文標題 Faraday effect in CoPt-CaF <sub>2</sub> nanogranular films with hard magnetic property for magnetic-field-free faraday devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2022.940370	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tianji Liu, Nobukiyo Kobayashi, Kenji Ikeda, Yasutomo Ota, and Satoshi Iwamoto	4. 巻 9
2. 論文標題 Topological Band Gaps Enlarged in Epsilon-Near-Zero Magneto-Optical Photonic Crystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 1621 ~ 1626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.1c01942	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yang Cao, Nobukiyo Kobayashi, and Hiroshi Masumoto	4. 巻 120
2. 論文標題 Tunnel magnetodielectric effect: Theory and experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 82901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0077879	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Ikeda, Nobukiyo Kobayashi, and Ken-Ichi Arai	4. 巻 12
2. 論文標題 Large Faraday effect in nanogranular films with a high refractive index matrix	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 403-412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.447532	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hanae Kijima-Aoki, Shigehiro Ohnuma, Nobukiyo Kobayashi, Hiroshi Masumoto	4. 巻 547
2. 論文標題 DC and AC tunneling magnetoelectric responses of cobalt lateral nanogranular	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 168890
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2021.168890	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Cheng Wang, Yang Cao, Nobukiyo Kobayashi, Shigehiro Ohnuma, and Hiroshi Masumoto	4. 巻 11
2. 論文標題 Structure and tunneling magneto-dielectric properties of Co-SrF <sub>2</sub> nano-granular thin films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 85224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0058707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yang Cao, Kenta Nogawa, Nobukiyo Kobayashi, and Hiroshi Masumoto	4. 巻 14
2. 論文標題 Fabrication of transition metal (TM = Fe, Co) difluorides-carbon nanocomposite films by magnetron co-sputtered deposition of Fe/Co and Teflon targets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 75502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac07f0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 小林 伸聖, 池田 賢司, 荒井 賢一	4. 巻 141
2. 論文標題 FeCo-BaF <sub>2</sub> およびFeCo-SiN系ナノグラニューラ膜の巨大ファラデー効果	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌)	6. 最初と最後の頁 123 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.141.123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計43件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 王 誠, 小林 伸聖, 大沼 繁弘, 増本 博
2. 発表標題 CoPt-SrF <sub>2</sub> ナノグラニューラ薄膜における GHz 付近の磁気・電気効果
3. 学会等名 日本セラミックス協会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 青木 英恵、池田 賢司、小林 伸聖、増本 博、遠藤 恭
2. 発表標題 光周波数帯の誘電特性に及ぼすCo-BaF <sub>2</sub> ナノ複相膜のCo添加量の効果
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村 萌、池田 賢司、小林 伸聖、大沼 繁弘、増本 博
2. 発表標題 Co-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系ナノグラニューラ薄膜におけるトンネル磁気 - 光学効果
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoharu Uchiyama, Yang Cao, Hanae Aoki, Kenji Ikeda, Nobukiyo Kobayashi, Shigehiro Ohnuma, Hiroshi Masumoto
2. 発表標題 Effect of sputtering condition on tunnel magneto-dielectric response in Co- (Si-N) nanocomposite films
3. 学会等名 第61回セラミックス基礎科学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 横浜 希、青木 英恵、小林 伸聖、大沼 繁弘、増本博
2. 発表標題 共スバッタ法により作製したCo-BaMgF <sub>4</sub> 薄膜の結晶構造と磁気および誘電特性
3. 学会等名 令和4年度 日本セラミック協会 東北北海道支部研究発表会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 直江 正幸, 曾根原 誠, 松永 温加, 宮地 幸祐, 佐藤 敏郎, 小林 伸聖, 荒井 賢一
2. 発表標題 タンデム法で磁界中成膜したCoFe-フッ化物ナノグラニューラー膜の異方性
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Loi Tonthat, Toru Murayama, Nobukiyo Kobayashi, Shin Yabukami, Wakako Ikeda-Ohtsubo, and Ken Ichi Arai
2. 発表標題 Synthesis and antigen-antibody reaction of ultrasmall FeCo nanoparticles
3. 学会等名 67th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 萌, 曹 洋, 青木 英恵, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 増本 博
2. 発表標題 熱処理によるCo-Al2O3系ナノグラニューラー薄膜の弱磁場におけるトンネル磁気-誘電効果の向上
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期第171回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王 誠, 曹 洋, 小林 伸聖, 大沼 繁弘, 増本 博
2. 発表標題 Enhancement of tunneling magneto-electric responses by Fe addition in Co-(Sr-F) nano-granular thin films
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期第171回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 曹 洋, 小林 伸聖, 大沼 繁弘, 増本 博
2. 発表標題 Electrical control of tunnel magnetodielectric response in nanogranular films
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期第171回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田 賢司, Tianji Liu, 太田 泰友, 岩本 敏, 小林 伸聖
2. 発表標題 イプシロンニアゼロ特性を示すCo-IT0ナノグラニューラー薄膜の磁気光学効果
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内山 智元, 曹 洋, 青木 英恵, 池田 賢司, 小林 伸聖, 大沼 繁弘, 増本 博
2. 発表標題 Co-(Si-N)ナノコンポジット薄膜におけるトンネル磁気誘電効果の発現
3. 学会等名 日本セラミックス協会第35回秋季シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Loi Tonthat, 村山 徹, 小林 伸聖, 藪上 信, 大坪 和香子, 荒井 賢一
2. 発表標題 A simple antigen-antibody reaction using ultrasmall FeCo nanoparticles
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 直江 正幸, 曾根原 誠, 遠藤 恭, 小林 伸聖, 荒井 賢一
2. 発表標題 タンデム法で成膜した強磁性CoFe-フッ化物ナノグラニューラー膜の一軸異方性
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田 賢司, 小林 伸聖, 荒井 賢一
2. 発表標題 FeCo-SiNナノグラニューラー薄膜の磁気光学ヒステリシスの解析
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林 伸聖, 岩佐 忠義, 池田 賢司, 荒井 賢一
2. 発表標題 CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -フッ化物系ナノグラニューラー膜のファラデー効果
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林伸聖
2. 発表標題 ナノグラニューラー材料を用いた磁気センサとその応用
3. 学会等名 TECNO-FRONTIER 2022 第30回 磁気応用技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木 英恵、本田 祥基、大沼 正人、小林 伸聖、大沼 繁弘、増本 博
2. 発表標題 小角散乱法を用いたナノグラニューラー膜の構造とトンネル伝導の関係
3. 学会等名 日本金属学会 2022年 春期 第170回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Aoki Kijima, Y. Endo, T. Miyazaki, T. Nojima, K. Ikeda, N. Kobayashi, S. Ohnuma and H. Masumoto
2. 発表標題 Shape effect of cobalt nano-particles on magnetic properties of Co-SiO <sub>2</sub> nano-granular films.
3. 学会等名 MMM-InterMag2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 C. Wang, Y. Endo, Y. Cao, H. Aoki Kijima, N. Kobayashi, S. Ohnuma and H. Masumoto
2. 発表標題 Relationship between morphology and soft-magnetic properties of Co-Sr-F nano-granular films.
3. 学会等名 MMM-InterMag2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoharu Uchiyama, Yang Cao, Hanae Aoki, Kenji Ikeda, Nobukiyo Kobayashi, Shigehiro Ohnuma, Hiroshi Masumoto
2. 発表標題 Effect of Annealing on the Structure and Magneto-electric Properties of Co-Si-nitride Nanogranular Films
3. 学会等名 第60回セラミックス基礎科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yang Cao, Nobukiyo Kobayashi, Shigehiro Ohnuma, Hiroshi Masumoto
2. 発表標題 Tunneling magneto-dielectric response in nanogranular films: Theoretical and experimental studies
3. 学会等名 MRM2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Moe Kimura, Yang Cao, Hanae Aoki, Shigehiro Ohnuma, Nobukiyo Kobayashi, Hiroshi Masumoto
2. 発表標題 Tunneling Magneto-Resistance Effect of Co-Oxide Nano-Composite Films
3. 学会等名 MRM2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hanae Aoki, Katsuhiko Uchikoshi, Takamichi Miyazaki, Masato Ohnuma, Yoshiki Honda, Nobukiyo Kobayashi, Shigehiro Ohnuma, Hiroshi Masumoto
2. 発表標題 Structure of cobalt-(barium-fluoride) lateral nano-granular films under slow-motion tandem method
3. 学会等名 MRM2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nozomi Yokohama, Hanae Aoki, Shigehiro Ohnuma, Nobukiyo Kobayashi, Hiroshi Masumoto
2. 発表標題 Effect of heat treatment on structure and properties of Co-BaMgF4 nanocomposite film
3. 学会等名 東北大-台北技科大オンラインジョイントシンポジウム2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 打越雄央, 青木英恵, 本田祥基, 大沼正人, 小林伸聖, 大沼繁弘, 増本 博
2. 発表標題 扁平球状ナノ粒子が配列したCo-BaF <sub>2</sub> ナノコンポジット膜の磁気・静電特性
3. 学会等名 令和3年度 日本セラミック協会 東北北海道支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木英恵, 曹 洋, 野島 勉, 大沼繁弘, 小林伸聖, 増本 博
2. 発表標題 Co-SiO <sub>2</sub> ナノグラニュー膜の低温磁気特性におよぼす粒子形状の効果
3. 学会等名 日本金属学会秋期第169回講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田賢司, Tianji Liu, 太田泰友, 岩本 敏, 小林伸聖
2. 発表標題 イプシロンニアゼロ特性を有するITO薄膜の磁気光学効果
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田賢司, Tianji Liu, 太田泰友, 岩本 敏, 小林伸聖
2. 発表標題 イプシロンニアゼロ材料をマトリックスとしたナノグラニュー膜の磁気光学効果
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木英恵, 打越雄央, 大沼繁弘, 小林伸聖, 増本 博
2. 発表標題 ナノ粒子を扁平化したナノグラニューラー膜の粒子形状が及ぼす強磁性・超常磁性への影響
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林伸聖, 岩佐忠義, 池田賢司, 荒井賢一
2. 発表標題 (Fe-Pt, Co-Pt)- フッ化物系ナノグラニューラー膜のファラデー効果
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 萌, 曹 洋, 青木英恵, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 増本 博
2. 発表標題 Co-MgO系ナノコンポジット薄膜の構造と磁気特性に及ぼすスパッタ照射面積の影響
3. 学会等名 日本セラミックス協会2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 打越 雄央, 青木 英恵, 小林 伸聖, 大沼 繁弘, 増本 博
2. 発表標題 磁性ナノ粒子を扁平化したCo-BaF <sub>2</sub> ナノグラニューラー膜の電気・磁気特性
3. 学会等名 日本金属学会春期第168回講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木 英恵, 曹 洋, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 増本 博
2. 発表標題 粒子の形状制御によるナノグラニューラー膜の磁気異方性制御
3. 学会等名 日本金属学会春期第168回講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tianji Liu, Nobukiyo Kobayashi, Kenji Ikeda, Yasutomo Ota, Satoshi Iwamoto
2. 発表標題 Investigation of enlarged topological band gaps in magneto-optical epsilon-near-zero photonic crystals
3. 学会等名 2021年第28回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田 賢司, 小林 伸聖, 荒井 賢一
2. 発表標題 SiNをマトリックスとしたナノグラニューラー薄膜の磁気光学効果
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林 伸聖, 池田 賢司, 岩佐 忠義, 荒井 賢一
2. 発表標題 ナノグラニューラー(FeCo)-(BaF,SiN)膜の巨大ファラデー効果
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 小林 伸聖
2. 発表標題 ナノグラニューラー透明磁性薄膜の巨大ファラデー効果
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会と磁気学会光機能磁性デバイス・材料専門研究会の合同研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林 伸聖, 池田 賢司, 荒井 賢一
2. 発表標題 透明-強磁性ナノグラニューラー膜の巨大ファラデー効果
3. 学会等名 Microwave Workshop & Exhibition, MWE2020, マイクロウェーブワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野川 健太, 曹 洋, 青木 英恵, 小林 伸聖, 大沼 繁弘, 増本 博
2. 発表標題 Fe-PTFE 系ナノ複相薄膜の構造と磁気-誘電特性
3. 学会等名 令和2年度 日本セラミック協会 東北北海道支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 萌, 曹 洋, 青木 英恵, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 増本 博
2. 発表標題 Co-MgO系ナノコンポジット薄膜の電気および磁気特性
3. 学会等名 日本金属学会秋期第167回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木 英恵, 曹 洋, 大沼 繁弘, 小林 伸聖, 増本 博
2. 発表標題 トンネル効果に与えるCo-BaF <sub>2</sub> ナノグラニューラー層状膜のCo粒子の形状と周期性の影響
3. 学会等名 日本金属学会秋期第167回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 曹 洋, 野川 健太, 小林 伸聖, 大沼 繁弘, 増本 博
2. 発表標題 Structure and dielectric properties of (CoF/FeF)-C nanocomposites
3. 学会等名 日本セラミックス協会第33回秋季シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 パリティ編集委員会、小林伸聖 他	4. 発行年 2022年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 204
3. 書名 物理科学, この1年 2022	

〔出願〕 計16件

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 小林 伸聖、岩佐 忠 義、池田 賢司、荒井 賢一	権利者 公益財団法人電 磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、台湾 111126620	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 小林伸聖、岩佐忠 義、池田賢司、荒井 賢一	権利者 公益財団法人電 磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/026985	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 小林 伸聖、岩佐 忠 義、池田 賢司、荒井 賢一	権利者 公益財団法人電 磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、18/019543	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 小林伸聖、岩佐忠義、池田賢司、荒井賢一	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、112022000092.9	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 岩本 敏、太田 泰友、池田 賢司、小林伸聖	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-571853	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 岩本 敏、太田 泰友、池田 賢司、小林伸聖	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、18/019317	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 岩本 敏、太田 泰友、池田 賢司、小林伸聖	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、112022000093.7	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 ナノグラニューラ構造材料およびその作製方法	発明者 小林 伸聖、岩佐 忠義、池田 賢司、荒井賢一	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、18/019914	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 ナノグラニューラ構造材料およびその作製方法	発明者 小林 伸聖、岩佐 忠義、池田 賢司、荒井賢一	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、112022000090.2	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 ナノグラニューラ構造材料およびその作製方法	発明者 小林伸聖、岩佐忠義、池田賢司、荒井賢一	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、111107891	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 ナノグラニューラ構造材料およびその作製方法	発明者 小林伸聖、岩佐忠義、池田賢司、荒井賢一	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/008503	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 岩本敏、太田泰友、池田賢司、小林伸聖	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、111101479	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 岩本敏、太田泰友、池田賢司、小林伸聖	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/000798	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 磁気光学材料およびその製造方法	発明者 小林伸聖、岩佐忠義、池田賢司、荒井賢一	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-134657	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 ナノグラニューラー構造材料およびその製造方法	発明者 小林伸聖、岩佐忠義、池田賢司、荒井賢一	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-035401	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 電磁光学材料およびその製造方法	発明者 池田賢司、小林伸聖、岩本敏、太田康友	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-003325	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藪上 信  (Yabukami Shin)  (00302232)	東北大学・医工学研究科・教授    (11301)	
研究分担者	池田 賢司  (Ikeda Kenji)  (40769569)	公益財団法人電磁材料研究所・その他部局・研究員(移行)   (71301)	
研究分担者	増本 博  (Masumoto Hiroshi)  (50209459)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・教授   (11301)	

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

#### 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------