



## 等方性 Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラー膜の磁気光学特性と 光プローブ電流センサへの適用

### Magneto-optical properties of isotropic Co-MgF<sub>2</sub> granular film and their application to optical-probe current sensor

宮本光教<sup>a)†</sup>・須江聡<sup>a),b)</sup>・久保利哉<sup>a)</sup>・曾根原誠<sup>b)</sup>・佐藤敏郎<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup>シチズンファインデバイス, 長野県北佐久郡御代田町御代田 4107-5 (〒389-0295)

<sup>b)</sup>信州大学, 長野県長野市若里 4-17-5 (〒380-8553)

M. Miyamoto<sup>a)†</sup>, S. Sue<sup>a),b)</sup>, T. Kubo<sup>a)</sup>, M. Sonehara<sup>b)</sup>, and T. Sato<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Citizen Finedevice Co., Ltd., 4107-5 Miyota, Miyota-machi, Kitasaku-gun, Nagano 389-0295, Japan

<sup>b)</sup> Shinshu University., 4-17-5 Wakasato, Nagano-shi, Nagano 380-8553, Japan

In recent years, the spread of power semiconductor devices such as SiC/GaN that can enable high speed switching has contributed to the miniaturization and increasing efficiency of the power electronics systems. The optical-probe current sensor proposed by our group has an ultra-compact probe, so *in-situ* measurement of switching current is possible. In this paper, to improve the sensitivity of the Co-MgF<sub>2</sub> granular film with an in film-plane magnetization used as a Faraday element of this sensor, we fabricated the isotropic granular film in all directions by reducing the demagnetizing effect in perpendicular to the film-plane. This is achieved by reducing the magnetic dipole interaction between cobalt nano particles in the granular film. In this case, this film is easily magnetized in perpendicular to the film-plane, and it has high transmittance for infrared light. We confirmed that the figure of merit( $^{\circ}/\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{dB}$ ) defined as the Faraday-rotation angle per unit transmission loss was increased. In fact, the signal-to-noise ratio of the optical-probe current sensor with isotropic granular film was significantly improved.

**Keywords:** Faraday effect, nano particles, granular film, thin film, co-evaporation, magnetic dipole interaction, current sensor

#### 1. はじめに

SiC パワー半導体は、従来の Si 半導体に比べて、10 倍程度高耐圧で、オン抵抗が小さい。また、ユニポーラ構造によりテール電流の発生が小さく、高速なスイッチングが可能となった。これはインバーターなどの電力変換器における、Turn ON/OFF 損失および導通損失の低減につながり、機器の小型化や高効率化に寄与している。特に電気自動車や鉄道車両では、インバーターの軽量化と高効率化によって、消費電力が大幅に削減されている<sup>1),2)</sup>。パワーデバイスの普及に伴うスイッチング周波数の高周波化によって、機器間を接続するバスバーの設計も重要性を増している。高速パルス電流では、高周波成分の表皮効果による電流の偏りや、隣接するバスバーとの近接効果による電流密度分布の乱れが生じるなどの問題が提起されている<sup>3)</sup>。バスバーの最適設計に際して、有限要素法による電磁界シミュレーション等が広く活用されているが、非侵襲で空間/時間分解能が高い電流計測手法<sup>4)</sup>を併用することでより精度の高い設計に繋がる。しかしながら、高い周波数帯になると、市販されている電気式の電流計では、周波数ディレーティングによる電流計測周波数範囲の制限、挿入インピーダンスによる主回路への干渉、周囲電磁ノイズによる計測波形の乱れ、といった課題があり、正確な電流波形を計測することが難しいのが現状である。

著者らは光ファイバの先端に配置した磁性膜のファラデー効果を利用した光プローブ電流センサ<sup>5)</sup>を提案している。本センサは、挿入インピーダンスがほとんど無く、光をプ

ローブおよび信号に利用しているため電磁誘導に伴う電磁ノイズの影響を受けない。また、極小のプローブを有するため、空間分解能が高く局所における *in-situ* 計測が可能である。これまでに報告されている光学式の電流(磁気)センサは、センサ素子として、希土類置換イットリウム鉄ガーネット結晶が多く用いられてきた<sup>6),7)</sup>。ガーネット系材料は高い透明性が最大の利点であるが、フェリ磁性体で典型的な縞状磁区構造を有することから、センサ素子として使用する際にプローブ光を拡大する必要がある<sup>8)</sup>ことや周波数応答に制限がある<sup>9)</sup>などの欠点がある。また温度依存性が大きく<sup>10)</sup>環境変化による出力変動が課題である。

近年、Kobayashi らが報告した誘電体マトリックス中に強磁性金属ナノ粒子を分散したナノグラニューラー膜<sup>11)</sup>は、数 GHz 以上に強磁性共鳴を有するため高周波計測が期待される材料である。前述した用途の電流計測を目指した場合、100MHz 以上の周波数帯域を有し、0.1~数 100 A 程度の範囲で検出感度を持つセンサが望まれる。現状のナノグラニューラー膜では、単位厚さあたりのファラデー効果は大きいだが、光の透過率が低いため、単位磁界に対する光強度変化が小さく、低電流(低磁界)における検出感度は十分ではない。

著者らが検討してきた Co ナノ粒子を MgF<sub>2</sub> マトリックスに分散した Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラー膜は、Co と Mg のフッ化物生成エネルギーの違いで相分離が良好<sup>12)</sup>であり、比較的透明な膜が得られる<sup>5)</sup>。本研究では、より高感度な電流計測を目指し、光の入射・伝播方向と垂直の膜面内に膜面垂直方向の大きな反磁界効果による磁化容易軸を有するグラニューラー膜から、Co ナノ粒子の粒子直径と粒子間距離を適切に制御することによって 3 次的に等方性のグラニューラー膜を開発した。これにより、光の進行方向である膜

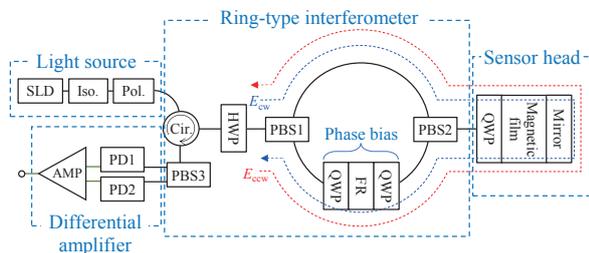
Corresponding author: M. Miyamoto (e-mail: [miyamotom@citizen.co.jp](mailto:miyamotom@citizen.co.jp)).

面に対して垂直方向に磁化し易くなり、単位磁界、単位透過損失当たりのファラデー回転角として定義される性能指数 (Figure of merit) が大幅に上昇した。また、実際の電流計測に於いて、従来の面内磁気異方性を有するグラニューラー膜と比べて SN 比が改善することを確認した。

## 2. 光プローブ電流センサの構成と動作

### 2.1 光プローブ電流センサの構成

Fig. 1 に光プローブ電流センサの構成図を示す。主に SLD (Super luminescent diode) 光源、リング型干渉計、センサヘッド、センサヘッドからの戻り光 (P 波および S 波成分) を電気信号に変換した後に差動増幅するアンプの 4 つから構成されており、各光学部品は、偏波面保存光ファイバ (PMF: Polarization Maintaining Fiber) によって光接続されている。ここで、各構成部の特徴について述べる。光源に SLD を用いたのは、DFB (Distributed feedback) レーザーと比べて発光波長がブロードで、コヒーレンス長が短いことにより、PMF 中を安定して偏光を伝搬できるためである。また、中心波長は 1550 nm を選択しているが、光通信で広く用いられ、各光部品が比較的安価であることと、本研究で用いたグラニューラー膜がこの波長帯で透過率が高く、光の利用効率が高いことが理由である。SLD 光源



Iso.: Isorator, Pol.: Polarizer, Cir.: Circulator, HWP: Half-wave plate, QWP: Quater-wave plate, PBS: Polarization beam splitter, FR: Faraday rotator, PD: Photo diode, AMP: Amplifier

Fig. 1 Configuration of optical-probe current sensor and propagation route of polarized light.

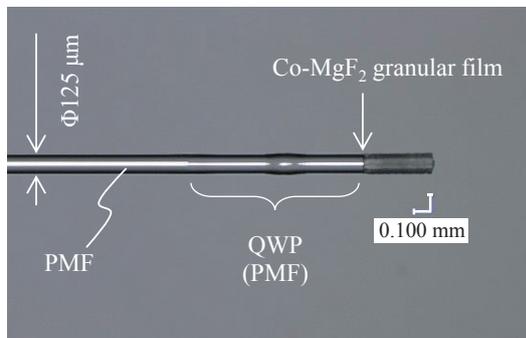


Fig. 2 Appearance of sensor head with diameter of 125 μm.

に接続されたリング型干渉計では、互いに直交した偏光がセンサヘッドを介して、相互逆回りに伝搬することで、外部環境 (温度・振動) の耐性を大幅に向上<sup>13)</sup>している。センサヘッド部には、直線偏光を円偏光に変換するための 1/4 波長板を配置しており、PMF のビート長<sup>14)</sup>の性質を利用することで、光ファイバ型の 1/4 波長板を構成<sup>15)</sup>している。この端面に Ag ミラー膜と Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラー膜を接着することにより、Fig. 2 に示すような、光ファイバ径 (直径 125 μm) のセンサヘッドとした。最終的に電圧出力する差動増幅回路は、2 つのフォトダイオードと差動アンプからなる。

### 2.2 動作原理

Fig. 1 を用いて、光プローブ電流センサの動作を説明する。SLD 光源から出射された光 (波長;  $\lambda = 1550$  nm) は、アイソレーターと偏光子を介して一軸の直線偏光となり、偏波無依存型のサーキュレータによってリング型干渉計に導波される。干渉計内の 1/2 波長板 HWP は入射する直線偏光に対して、光軸が 22.5° になるように配置されており、45° 傾いた直線偏光が出射される。すなわち、互いに直交した 2 偏光が出力され、PMF の Slow 軸と Fast 軸によって以降は伝搬される。この 2 偏光は PBS (Polarization beam splitter) 1 によって右回りの経路と左回りの経路に分けられる。右回り経路の偏光 ( $E_{cw}$ ) は次の PBS2 を介してセンサヘッドに導波され、左回り経路の偏光 ( $E_{ccw}$ ) は 1/4 波長板 QWP と 45° ファラデー回転子からなる位相バイアスで  $\pi/4$  の位相差を受けて、同じくセンサヘッドへ導波される。この 2 偏光は互いに直交しているため、センサヘッドの 1/4 波長板 QWP で互いに逆回りの円偏光に変換され、グラニューラー膜によって互いに逆向きファラデー効果 (位相ずれ) を受ける。その後、Ag ミラーで反射され、再び 1/4 波長板 QWP を通過すると、入射時とは直交した偏光に変換され、行きとは逆経路を通る。この時、 $E_{cw}$  は位相バイアスを通過し、 $\pi/4$  の位相差を受ける。このように、 $E_{cw}$  と  $E_{ccw}$  は、全く同じ光路を反対向きにリング状に伝搬し、最終的に 1/2 波長板 HWP で干渉する。この干渉光は PBS3 によって、P 偏光と S 偏光に分離されてフォトダイオード PD1, PD2 で光電変換される。フォトダイオード PD に入射する光強度は、電界の振幅の 2 乗であるので、P 偏光と S 偏光の光強度  $P_p$  と  $P_s$  の変化は、次式のように表される。

$$P_p = E_{cw}^2 = E_0^2 \sin^2(2\theta_F - \pi/4). \quad (1)$$

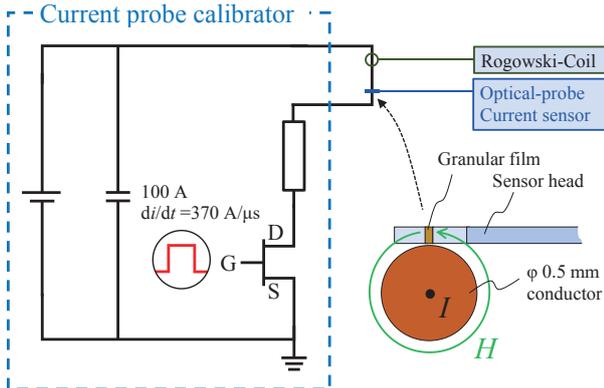
$$P_s = E_{ccw}^2 = E_0^2 \cos^2(2\theta_F - \pi/4). \quad (2)$$

ここで、 $E_0$  は、グラニューラー膜に入射する電界波の振幅であり、 $\theta_F$  は、電流磁界によって誘起されるファラデー回転角である。本構成では、 $P_p$  と  $P_s$  の差動を検出するため、最終的な光強度  $\Delta P$  は次式のように表される。

$$\Delta P = P_p - P_s = E_0^2 \cos(4\theta_F - \pi/2). \quad (3)$$

**Table 1** Co-evaporation conditions for granular film.

Sample	(A)	(B)	(C)
Evaporation rate ( $\text{\AA}/\text{s}$ )	Co : 0.5 MgF <sub>2</sub> : 1.0	Co : 0.5 MgF <sub>2</sub> : 1.5	Co : 0.5 MgF <sub>2</sub> : 2.0
Rate ratio Co : MgF <sub>2</sub>	1 : 2	1 : 3	1 : 4
Substrate temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	450		
Substrate rotation (rpm)	1		
Back pressure (Pa)	$< 5.0 \times 10^{-4}$		



**Fig. 3** Current measurement set-up.

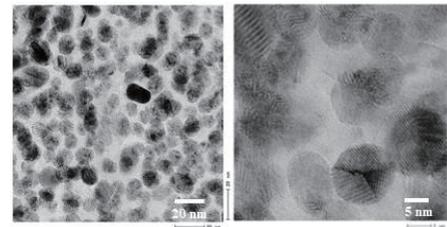
### 3. 実験

#### 3.1 Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラー膜の作製と評価方法

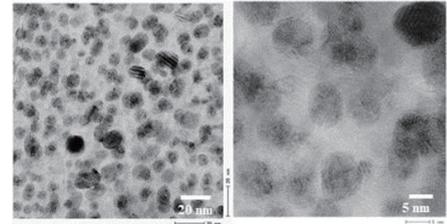
Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラー膜は真空蒸着装置を用い、Co と MgF<sub>2</sub> を電子銃で独立した蒸発源から同時に蒸発させてガラス基板 (SCHOTT 製 D263Teco) 上に堆積させる共蒸着法によって作製した。ガラス基板は、それぞれの蒸発源上を交互に通過するように公転しており、背面のヒーターによって、所定の温度に加熱されている。Table 1 に、本実験の成膜条件を示す。Co と MgF<sub>2</sub> の蒸発レート比を (A) 1 : 2, (B) 1 : 3, (C) 1 : 4 の 3 種類で制御し、その他の条件は同一として、膜厚は 1~2 [ $\mu\text{m}$ ] となるように成膜した。得られたグラニューラー膜は、分光光度計を用いて透過率を測定し、Fig. 1 に示すセンサシステムを用いてファラデー回転角を測定しており、測定光束径は光ファイバのコア径と同じ約 10.5  $\mu\text{m}$  である。グラニューラー構造は、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 (EDX) により膜組成を、透過電子顕微鏡 (TEM) 像からコバルトナノ粒子径および分散状態を観察し、X 線光電子分光法 (XPS) によって得られた各元素の結合状態から相分離の程度を評価した。また、磁化曲線は 10 mm 角に切り出した試料を振動試料型磁力計 (VSM) で測定し、膜厚は段差計を用いた。

#### 3.2 Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラー膜の性能評価

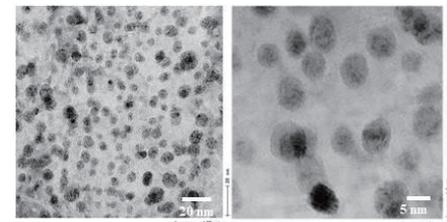
センサ素子として磁気光学材料を用いる場合に重要な点は、透過率と単位磁界あたりのファラデー効果が大きいこ



Co<sub>9.8</sub>Mg<sub>21.3</sub>F<sub>67.8</sub>,  $D_{\text{ave.}} = 12.1 \text{ nm}$   
(a) Rate ratio 1 : 2



Co<sub>5.9</sub>Mg<sub>22.7</sub>F<sub>70.8</sub>,  $D_{\text{ave.}} = 8.8 \text{ nm}$   
(b) Rate ratio 1 : 3



Co<sub>4.7</sub>Mg<sub>23.0</sub>F<sub>71.5</sub>,  $D_{\text{ave.}} = 7.3 \text{ nm}$   
(c) Rate ratio 1 : 4

**Fig. 4** TEM images of Co-MgF<sub>2</sub> granular film at different evaporation rate ratio. Composition and average diameter of cobalt nanoparticles are indicated.

と、外部磁界に対してファラデー効果が直線変化し線形性を有することである。本研究では、センサ素子に用いる場合を想定し、グラニューラー膜の性能指数 (FOM: Figure of merit) を、次式のように定義し、各条件で作製した試料を比較評価した。

$$\text{FOM} [^{\circ}/\text{kA} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{dB}] = |\theta_F'| / -10 \log_{10} T. \quad (4)$$

ここで、 $\theta_F'$  は外部磁界 1 kA/m におけるファラデー回転角であり、 $T$  は波長 1550 nm における透過率である。具体的には  $\theta_F'$  は外部磁界 79.7 kA/m (1 kOe) で測定された値を 79.7 kA/m で除し、単位磁界当たりのファラデー回転角としている。

#### 3.3 電流計測方法

本電流センサは、主にインバーター等、高周波成分を有する比較的早いパルス電流の計測をターゲットとしている。Fig. 3 に電流計測時の模式図を示す。電流発生源として、Current probe calibrator (PMK 製 KSZ-100D) を用いた。 $\phi 0.5 \text{ mm}$  の銅線に 100 A, 立ち上がりスルーレート  $di/dt = 370 [\text{A}/\mu\text{s}]$  の電流を流し、発生する磁界がグラニューラー

膜面の法線方向に入射するように配置した。センサヘッドの光ファイバは外径  $\phi 125 \mu\text{m}$  で、その中心に光を伝搬する約  $\phi 10.5 \mu\text{m}$  径のコアがある。つまり、銅線中心から  $312.5 \mu\text{m}$  の位置における約  $10.5 \mu\text{m}$  範囲の平均磁界量を測定していることになる。銅線の周囲に発生する磁界量はアンペールの法則に従うが、銅線とセンサヘッドの相対距離を厳密に調整することは実際には困難である。従って、本実験では、次式のようにセンサから出力される電圧  $V_0$  に比例定数  $A$  を乗じた値を被測定電流  $I_m$  とした。

$$I_m [A] = A \cdot V_0 = A \cdot \Delta P \cdot S \cdot Z_{TIA} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta P$  は (3) 式から得られた光強度 [W],  $S$  はフォトダイオードの感度係数 [A/W],  $Z_{TIA}$  は、差動アンプのトランスインピーダンス [V/A] である。比例定数  $A$  は、同一銅線上に設置した Rogowski-Coil (岩崎通信機株式会社製 SS-683A) で測定された電流値と比較して決定した。測定した電流波形から SN 比 ( $= 20 \log_{10}(S/N)$ ) を計算した。

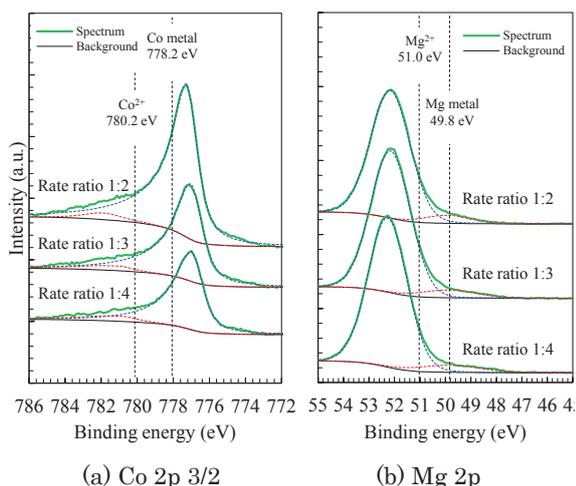


Fig. 5 XPS narrow-band spectrum of Co-MgF<sub>2</sub> granular film with different evaporation rate ratio.

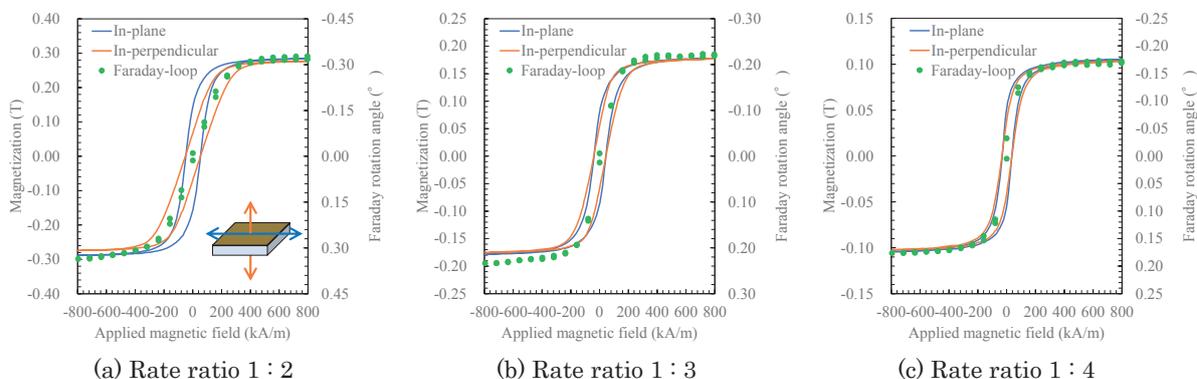


Fig. 6 Magnetization curves and Faraday-loop of Co-MgF<sub>2</sub> granular film with different evaporation rate ratios.

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 グラニューラー構造の観察

これまでの研究で、共蒸着法で作製した MgF<sub>2</sub> マトリックス中に Co ナノ粒子を分散させたグラニューラー膜は、同じ蒸発レート比で成膜した時、成膜中の基板温度が高いほど、Co ナノ粒子径は大きく、粒子間距離が広がるということが分かっている<sup>5)</sup>。

Fig. 4 は、本実験で得られた 3 試料の TEM 像と EDX で測定した膜組成である。いずれの試料も明瞭な Co ナノ粒子が観察でき、グラニューラー構造が得られていることが示唆される。MgF<sub>2</sub> のレート比を増加させると、相対的に Co の含有比率が下がり、Co 粒子径は小さく、粒子表面間距離が広がっていることが観察できる。Co ナノ粒子径の減少は、Co の成膜レートが相対的に小さくなり、成膜中の粒子成長が抑制されたためと考えられる。

Fig. 5 に、3 試料の XPS 分析の結果を示す。実線は測定値を、破線はピーク分離解析した結果である。いずれの試料も Co は、ほぼ金属状態であると考えられ、Mg は Mg<sup>2+</sup> (MgF<sub>2</sub>) の構造になっていると考えられる。Co および Mg<sup>2+</sup> の結合エネルギーが理論値 (Co: 778.2 eV, Mg<sup>2+</sup>: 51.0 eV) と比べて、Co は低エネルギー側、Mg<sup>2+</sup> は高エネルギー側にシフトしている。グラニューラー膜は MgF<sub>2</sub> マトリックス中に Co ナノ粒子が分散した構造をとるため、Co ナノ粒子表面で Co と MgF<sub>2</sub> との接触面積が極めて広く、電気陰性度の違いから電子の偏りが生じ、バルクの理論値よりも結合エネルギーが互いにシフトしたものと考えられる<sup>16)</sup>。

以上の結果から、今回作製したすべての試料は強磁性金属の Co と誘電体の MgF<sub>2</sub> が明瞭に相分離したグラニューラー構造を有することが分かった。

### 4.2 磁気光学特性と性能指数

Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラー膜を構成する Co ナノ粒子は hcp 構造をとるが、hcp-Co は磁気異方性エネルギーが大きく、強磁性から超常磁性に遷移する臨界粒径は 7 nm 程度と計算されている<sup>17)</sup>。我々の研究結果からも粒径 5 nm 程度を

境界に、それ以下では超常磁性を、それ以上では強磁性的性質を示し、計算結果と概ね一致する。超常磁性の場合、一般的にその磁化曲線は Langevin 関数に従い<sup>18)</sup>、外部磁界と磁化の関係は双曲線カーブを描く。一方、強磁性的となれば、磁気飽和領域付近を除き外部磁界と磁化の関係は直線比例する傾向になる。また、粒子間距離を広くすることは、透過率向上に寄与する。従って、センサ素子として用いる場合、粒子径を大きく、粒子間距離を広くすることが有効と考えられる。

Fig. 6 に成膜レート比を変更した 3 試料の磁化曲線とファラデーループを示す。磁化曲線はガラス基板の反磁性磁化曲線を補正し、グラニュー膜自身は膜面水平方向、膜面垂直方向ともに反磁界補正は行っていない。ファラデーループは膜面垂直方向に光を入射して測定されるため、垂直方向の磁化曲線と傾きが一致している。ここで、磁化曲線ではヒステリシスが見られるのに対して、ファラデーループではほとんど見られない。この要因は明らかではないが、磁化曲線では 10 mm 角の試料全体の磁化を測定しているのに対して、ファラデーループは光ファイバのコア径、つまり約 10.5 μm の範囲で測定しており、このことが関係しているものと考えている。レート比 1:2 のような Co ナノ粒子の含有量が多い試料では、膜面内方向が磁化容易軸、膜面垂直方向が磁化困難軸となっている。一方、Co ナノ粒子の含有量が少なくなると、膜面内と垂直方向の磁化率の差が縮まり、レート比 1:4 の試料では膜面内と垂直方向の磁化曲線が一致した。Co ナノ粒子の含有量が多い場合は、隣接する Co ナノ粒子同士が磁氣的に結合しており、巨視的に見れば一様な薄膜と見なせるため形状磁気異方性（膜面垂直方向の反磁界係数  $N_d = 1$ ）を発現したものと考えられる。Co ナノ粒子の含有量が少ない場合は、粒径が小さく Co ナノ粒子が磁氣的に孤立したことで、方向に依らず反磁界係数  $N_{dx} = N_{dy} = N_{dz} = 1/3$  となり、等方性を示したものと考えられる。

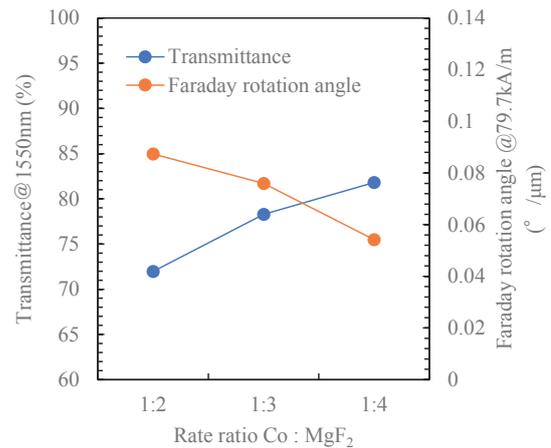
Fig. 7 に各試料の単位磁界当たりのファラデー回転角と波長 1550 nm における透過率を示す。Co ナノ粒子の含有量が少ないほど、ファラデー回転角は減少するが、反面、透過率は上昇した。最終的に (4) 式で計算される性能指数 FOM は Fig. 8 に示すように、Co ナノ粒子の含有量が少ないほど、高い値を示した。

#### 4.3 ナノ粒子間相互作用の影響

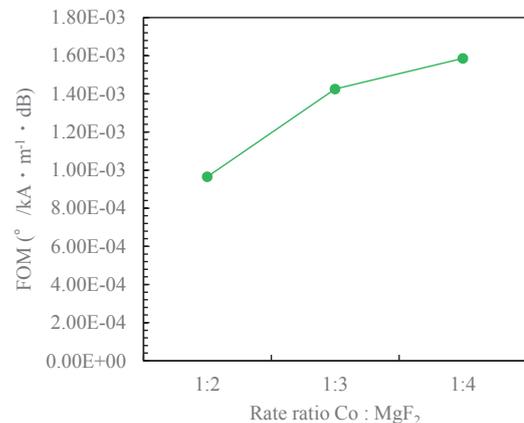
一般的に強磁性体内の磁気構造は多磁区構造であり、磁歪による磁気弾性エネルギーを無視すれば、磁区内の磁気異方性や磁壁、および表面磁極の静磁エネルギーの総和が最小になるような構造をとる。グラニュー膜中に分散された粒子のようにサイズが低下するとエネルギー密度の高い磁壁を増やせず、特にナノメートルオーダーでは、磁壁をつくるよりも表面磁極による静磁エネルギーの方が低くなることで、単磁区構造となる。本実験で作製したグラニュー膜中においても、一对の磁極をもった単磁区ナノ粒子が有限の間隔で分散されていると考えられ、ナノ粒子(磁

**Table 2** Estimation of magnetic dipole interaction energy between nanoparticles on Co-MgF<sub>2</sub> granular films.

Sample	(A)	(B)	(C)
Co particle concentration $F$ (vol.%)	10.2	6.1	4.8
Co particle diameter $d$ (nm)	12.1	8.8	7.3
Interparticle distance $r$ (nm)	16.5	14.1	12.6
Magnetic dipole interaction energy $E_{p-p}$ (J)	$9.7 \times 10^{-26}$	$2.3 \times 10^{-26}$	$1.0 \times 10^{-26}$



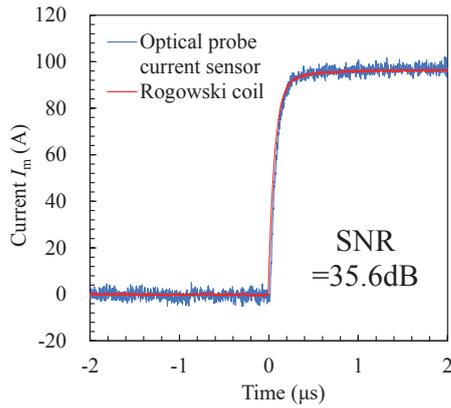
**Fig. 7** Faraday rotation angle per unit film thickness and transmittance of Co-MgF<sub>2</sub> granular film.



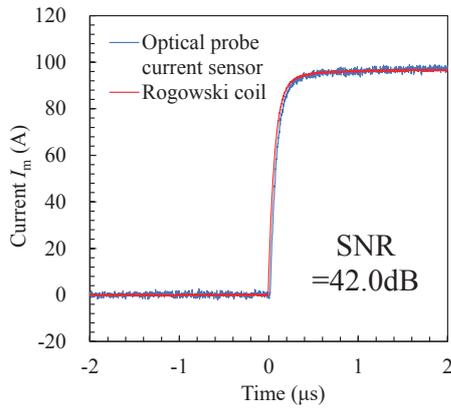
**Fig. 8** Figure of merit of Co-MgF<sub>2</sub> granular film.

気双極子) は双極子相互作用によってお互いに磁気エネルギーに影響し合っているものと推察される。ナノ粒子がつくる磁界によって 2 つの隣接したナノ粒子間に働く磁気双極子相互作用エネルギー  $E_{p-p}$  は、次式のように表すことができる<sup>19)</sup>。

$$E_{p-p} = M_s^2 V^2 / 2 \pi \mu_0 r^3. \quad (6)$$



(a) FOM =  $1.46 \times 10^{-3} \%$  /  $\text{kA} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{dB}$



(b) FOM =  $2.26 \times 10^{-3} \%$  /  $\text{kA} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{dB}$

**Fig. 9** Current measurement results of optical-probe current sensor with Co-MgF<sub>2</sub> granular film. Previous (a) and latest (b) studies with different figures of merit.

ここで、 $M_s$ はCoナノ粒子の飽和磁化、 $V$ はナノ粒子の体積 ( $= 4\pi/3 \cdot (d/2)^3$ )、 $\mu_0$ は真空の透磁率 ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ )、 $r$ はナノ粒子同士の中心間距離である。 $V$ を求めるためのナノ粒子直径  $d$ は、TEM像から無作為に抽出したナノ粒子を計測し、その平均値を使用した。また、ナノ粒子中心間距離  $r$ は、粒子直径  $d$ とEDXで測定されたCoナノ粒子の体積濃度  $F$ を用いて、次式によって求めた<sup>20)</sup>。

$$r = d + d \{ (1/3\pi F + 5/6)^{1/2} - 1 \}. \quad (7)$$

Table 2に、磁気双極子相互作用エネルギーを計算した結果を示す。エネルギーを相対的に比較すると、形状磁気異方性を発現した試料(A)と等方性を発現した試料(C)では10倍程度の差があることが分かった。磁気双極子相互作用エネルギーが低下したことで、前述したように、ナノ粒子同士が磁氣的に孤立し、薄膜全体での形状異方性が緩和されて等方性を示したものと考えられる。このように、相互作用の大きさは、ナノ粒子の大きさと粒子間距離で決まるため、薄膜作製時の条件を適切に制御すれば、巨視的に見た薄膜全体の異方性を制御することが可能である。

#### 4.4 電流計測結果

Fig. 9は、本実験で得られた等方性 Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラ一膜を光プローブ電流センサに取り付け、実際にパルス電流の測定を行った結果で、パルスの立ち上がり部分を示したものである。ここで使用したグラニューラ一膜は、試料(C)の条件で、膜厚を 8.2 μm の厚さに成膜したものである。比較として、過去に作製した性能指数 FOM が異なるグラニューラ一膜の計測結果も併記した。グラニューラ一膜の性能向上によって、明らかな SN 比の向上が見られた。測定値に見られるノイズは、差動アンプ自身が有する他、SLD 光源から生じるノイズや、リング型干渉計を構成する光部品の消光比も影響している。特に光学系で生じるノイズは、P 偏光と S 偏光の差分を取ることで除去しているが、P, S 偏光の僅かな強度差や位相差がノイズとして残る。本実験では同じシステムを使用しているため、SN 比の向上はグラニューラ一膜の性能指数改善効果のみによるものである。市販の Rogowski Coil (SN 比 = 53dB) と比較して SN 比は劣るが、電流パルスの立ち上がりにおいて、遅れや乱れは無く、良好な結果が得られた。電流の立ち上がりスルーレート  $di/dt = 370 \text{ [A/}\mu\text{s]}$  は周波数 1.6 MHz 程度に相当し、少なくともこの程度の周波数に対しては問題無く応答できている。

#### 5. まとめ

パワー半導体の普及に伴う各種機器のスイッチング周波数の増加により、従来の電気式の電流計では正確な計測が困難となってきた。挿入インピーダンスが極めて小さく、高い分解能で局所計測可能な光プローブ電流センサの高感度化を目的とし、センサ素子として用いるグラニューラ一膜の性能指数向上を図った。本稿では、従来の薄膜由来の形状磁気異方性を有する面内磁化 Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラ一膜に対し、共蒸着条件を変更して等方性グラニューラ一膜とした場合についてファラデー素子としての性能指数改善効果を確認した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 成膜温度を 450 °C 一定とし、Co 含有濃度を低下させた結果、面内磁気異方性から等方性のグラニューラ一膜に変化した。
- 2) TEM 像、XPS の解析から Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラ一膜に分散している Co ナノ粒子は、ほぼ金属状態であり、MgF<sub>2</sub> と良く相分離していることが分かった。
- 3) 磁気双極子相互作用エネルギーの推定から、等方性グラニューラ一膜は隣接粒子の相互作用の低下により磁氣的に孤立し、反磁界係数が方向に依らず一定になっているものと考えられる。
- 4) 得られた等方性 Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラ一膜は面内磁気異方性を有するものと比べて、性能指数が高く、実際の電流計測に於いても SN 比の向上が認められた。

以上のように、等方性 Co-MgF<sub>2</sub> グラニューラー膜を使用することで、実際の電流計測で SN 比が大幅に改善することを示した。グラニューラー膜は、分散される強磁性ナノ粒子の粒子径と粒子間距離によって、磁気光学的性質が変化する。今後は、強磁性ナノ粒子の分散状態の最適化を図ると共に、膜組成についても検討を行い、更なる高感度化を目指していく。

### References

- 1) H. Kumo, S. Orita, and S. Hatae: *Mitsubishi Denki giho*, **96**, 44 (2022).
- 2) T. Uchida, K. Okumura, and S. Narita: *Fuji Electric Review*, **94**, 272 (2021).
- 3) C. Donaghy-Spargo, and A. Horsfall: *Proc. PEMD 2018*, Liverpool, 2018, (*J. Eng. Technol.*, Stevenage, 2018).
- 4) D. Tatsuoka, S. Hashi, and K. Ishiyama: *T. Magn. Soc. Jpn.* (Special Issues), **4**, 37 (2020).
- 5) M. Miyamoto, T. Kubo, Y. Fujishiro, K. Shiota, M. Sonehara, and T. Sato: *IEEE Trans. Magn.*, **54**, 2501205 (2018).
- 6) T. Yoshino, S. Torihata, M. Yokota, and N. Tsukada: *Appl. Opt.*, **42**, 1769 (2003).
- 7) N. Itoh, H. Minemoto, D. Ishiko, and S. Ishizuka: *Appl. Opt.*, **38**, 2047 (1999).
- 8) M. N. Deeter, A. H. Rose, and G. W. Day: *J. Light. Technol.*, **8**, 1838 (1990).
- 9) R. Wolfe, E. M. Gyorgy, R. A. Lieberman, V. J. Fratello, S. J. Licht, M. N. Deeter, and G. W. Day: *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2048 (1992).
- 10) O. Kamada, and K. Takaseya: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, 1417 (1999).
- 11) N. Kobayashi, K. Ikeda, Bo Gu, S. Takahashi, H. Masumoto, and S. Maekawa: *Sci. Rep.*, **8**, 4978 (2018).
- 12) S. Ohnuma, and T. Masumoto: *Materia Jpn.*, **41**, 402 (2002).
- 13) K. Furuya, K. Iwami, S. Ota, K. Yamazaki, T. Kubo, M. Miyamoto, M. Sonehara, and T. Sato: *Dig. 43 th Annual Conf.*, Kyoto 2019, 86 (*J. Magn. Soc. Jpn.*, 2019).
- 14) S. Arai, H. Saitoh, N. Oyama, T. Nakamura, K. Yokomizo, and K. Aiso: *The Furukawa Electric review*, **109**, 5 (2002).
- 15) M. Miyamoto, T. Kubo, T. Sato, Y. Fujishiro, and M. Sonehara: Kokai Tokkyo Koho JP 2020-126006 (2020).
- 16) S. Peters, S. Peredkov, M. Neeb, W. Eberhardt, and M. Al-Hada: *Surf.Sci.*, **608**, 129 (2013).
- 17) O. Kitakami, T. Sakurai, Y. Miyashita, Y. Takeno, Y. Shimada, H. Takano, H. Awano, K. Ando, and Y. Sugita: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 1724 (1996).
- 18) S. Bendanta, and W. Kleemann: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 013001 (2009).
- 19) H. Kura, R. Tate, M. Takahashi, and T. Ogawa: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **35**, 203 (2011).
- 20) H. Kamiya: *J. Jpn. Soc. Colour Mater.*, **86**, 26 (2013).

2022年10月19日受理, 2022年12月13日採録