

誘導透過干渉フィルタの導入による Fe, Co 超薄膜のファラデー効果性能指数の改善効果に関する基礎検討

Improvement of Figure of Merit of Faraday Effect of Fe (Co) Thin Film by Introduction of Induced Transmission Filter

宮本光教^{a),b)†}・久保利哉^{a)}・花田貴拓^{b)}・井原敬人^{b)}・佐藤敏郎^{b)}・曾根原誠^{b)}

^{a)}シチズンファインデバイス株式会社, 長野県北佐久郡御代田町御代田 4107-5(〒389-0295)

^{b)}信州大学, 長野県長野市若里 4-17-1(〒380-8553)

M. Miyamoto^{a),b)†}, T. Kubo^{a)}, T. Hanada^{b)}, H. Ihara^{b)}, T. Sato^{b)}, M. Sonehara^{b)}

^{a)}Citizen FineDevice Co., Ltd., 4107-5, Miyota, Miyota-machi, Kitasaku-gun, Nagano 389-0295, Japan

^{b)}Shinsyu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano 380-8553, Japan

Although ferromagnetic metals such as iron and cobalt have a giant Faraday rotation, it is difficult to apply them to optical devices because of their strong light absorption. If the giant Faraday effect of the ferromagnetic metal is applied to magneto-optical devices using the transmission light, the ferromagnetic metals must be arranged on the thin film structure in such a way as to reduce the light absorption. An even more important issue is how to suppress the reflection light caused by a refractive-index difference with a light pass medium. In this study, we introduce an induced transmission filter with iron or cobalt thin film to enhance the transmittance at the light-wavelength of 1550 nm. We also investigate the Faraday effect. The fabricated filter consisted of a center-positioned magnetic layer sandwiched by top and bottom admittance matching layers. When the admittance matching layer thickness was changed, the Faraday effect was enhanced compared with the basic structure that never decreased the Figure of merit (FOM), defined here as a Faraday-rotation per transmission loss [deg./dB].

Key words: ferromagnetic metal, thin film, Faraday effect, optical interference, multilayer, evaporation

1. はじめに

ある媒質に印加された磁界方向に対して平行に偏光面が偏った光が進行しているとき、偏光面の旋光が生じる。このようなファラデー効果を示す材料として、各種金属イオンで置換されたイットリウム鉄ガーネット ($Y_3Fe_5O_{12}$) 系結晶が挙げられる。これらは、近赤外域以上の波長領域で特に透明であって、光通信帯のアイソレータ材料として有用である。その他、石英ガラスや YIG 微粉末を分散させた光ファイバーもファラデー効果をもつ材料として磁界センシング用途に用いられている^{1),2)}。

一方、Fe, Co をはじめとする強磁性金属は室温で極めて大きなファラデー効果を持つ材料として古くから知られており、単位長さ当りの旋光角は他の材料を大きく凌ぐ。また、キュリー温度が高く、高温環境下であっても安定的なファラデー効果を得ることが期待できる。しかし、金属特有の極めて強い光吸収を持つことと周囲媒質との大きな屈折率差による光反射のために、透過光を利用した磁気光学デバイスへの応用は困難である。

著者らのグループは、1550 nm 帯のブロード光源と偏波保存光ファイバー (PMF: Polarization Maintaining Fiber) を用いて、Fe, Co 強磁性体超薄膜のファラデー効果を利用した磁界センシング可能な光学系を報告した³⁾。Fe, Co のように強い光吸収をもつ金属磁性体中を透過する光を信号光として利用する磁気光学デバイスにとって、反射光を抑制し透過光の利用効率を上げることが重要である。

磁気光学効果と透過率を両立する手段として、Inoue らは Bi 置換イットリウム鉄ガーネット (Bi:YIG) 薄膜と誘電体薄膜の組み合わせ⁴⁾について詳細に検討しており、Bi:YIG 層を誘電体多層膜のブラッグミラーで挟み込んだ

一次元磁性フォトニック結晶⁵⁾ (マイクロキャビティ構造) は、Bi:YIG 単層に比べ数倍以上のファラデー回転角増大を達成している。これらは理論的に解析され、ブラッグミラーの積層周期を増加させることや乱れた積層構造をとることで効果が増大できることも示している⁶⁾。この構造はブラッグミラーによる内部多重反射を利用することで、中央に配置された Bi:YIG 層に強く光局在化させることを特徴としている。

金属磁性体であっても光の透過が可能な超薄膜 (数十 nm 以下) 構造を採用し、さらに反射光を抑制できる光学構造を導入することで金属磁性体を持つ巨大ファラデー効果を利用できるとの着想のもと、本研究は、金属磁性体として Fe あるいは Co 超薄膜を採用し、誘導透過干渉フィルタの導入によって反射光を抑制し、大きなファラデー効果と透過率の両立を図ることを目指して種々の検討を行ったものである。誘導透過干渉フィルタは金属磁性体膜を誘電体多層膜で挟み込んだ構造で、先に述べたマイクロキャビティ構造と類似している。本構造の特徴は、金属磁性体膜と周囲媒質とのアドミッタンス整合を考慮している点であり、光吸収が強く屈折率が高い Fe, Co 層界面における反射防止によって透過光の増大が期待できるものである。

本論文では、Fe あるいは Co 単層超薄膜に比べ、大幅に透過光増大が期待できる誘導透過干渉フィルタを実際に作製し、その光学特性とファラデー回転特性の改善効果について検討した結果を述べる。また、強磁性層の両側に配置したアドミッタンス層の整合波長ずれによって、透過損失当たりのファラデー回転角で定義される性能指数 FOM (Figure of merit) を低下させることなくファラデー効果が大きく増大したので、併せて報告する。

Table 1 Evaporation conditions of materials.

Material	Temperature (°C)	Degree of vacuum(Pa)	Depo. Rate (Å/sec.)	Ion-gun parameters			
				Gas	V _{IG} (V)	I _{IG} (mA)	Ion current density (μA/cm ²)
Fe	<80	1.0×10 ⁻²	0.5	Ar	500	600	31
Co	<80	<4.0×10 ⁻⁴	0.5	—	—	—	—
Ta ₂ O ₅	80–150	1.5×10 ⁻²	2.0	O ₂	900	900	104
SiO ₂	80–150	1.5×10 ⁻²	6.0	O ₂	750	900	92

2. 実験・測定方法

2.1 誘導透過干渉フィルタの設計

一般的な金属薄膜の透過率を最大化させるために、金属薄膜の両側に適当なアドミッタンス値を持つ誘電体整合層を配置する手段がある^{7)–9)}。用いる金属薄膜の厚さを d 、複素屈折率を $n - ik$ とし、出力される光学アドミッタンスを $Ye (= X + iZ)$ としたとき、最大透過率を示すポテンシャル透過率 ψ は、

$$\psi = \frac{T}{1-R} = \frac{Re(Ye)}{Re(B \cdot C)}$$

$$\left[\begin{array}{l} [B] \\ [C] \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} \cos \delta & \frac{i}{n-ik} \sin \delta \\ i(n-ik) \sin \delta & \cos \delta \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} 1 \\ X + iZ \end{array} \right]$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n - ik)d$$

で与えられる。

このように、ポテンシャル透過率 ψ は配置する金属薄膜の複素屈折率と膜厚を決定すれば、アドミッタンス整合層の複素屈折率 $X + iZ$ に依存することがわかる。整合層の構造は ψ が最大化する材料の組み合わせと積層数を外挿によって検討し、Ta₂O₅ (屈折率 $n=2.138$) と SiO₂ ($n=1.458$) を選択した。そして最終的な積層構造は、

$$(Ta_2O_5/SiO_2)^2/Ta_2O_5/Fe(or Co)/Ta_2O_5(SiO_2/Ta_2O_5)^2$$

とした。ここで Fe と Co 膜厚はそれぞれ $d=65$ nm, 55 nm とした。Ta₂O₅ と SiO₂ の光学膜厚は $nd=\lambda/4$ (設計波長 $\lambda=1550$ nm) を基本とした。但し、Fe, Co の両側に隣接する Ta₂O₅ 層は調整層であり、膜厚を適宜に変更してスペクトル位置調整を行っている。実際に作製した誘導透過干渉フィルタの断面 SEM 像を Fig. 1 に示す。磁性層を中心にその両側にアドミッタンス整合層が対称に配置されている。

2.2 磁性膜および誘導透過干渉フィルタの作製

誘導透過干渉フィルタを構成する磁性膜 Fe, Co および誘電体膜 Ta₂O₅, SiO₂ は、IAD(Ion Assisted Deposition) 蒸着装置 (オプトラン(株)製 HOC-1300) を用いて、ガラス基板 (SCHOTT 製 B270) 上に成膜した。Table 1 に各材料の成膜条件を示す。材料の蒸発と同時に、Fe は Ar イオンの照射を併用し、Co はイオン照射を併用していない。Ta₂O₅ と SiO₂ に対しては、O イオンの照射を併用した。蒸着時の膜厚は反射型光学モニターおよび水晶膜厚計で監視した。光学モニターを用いることで、精密に光学膜厚を制御できるため、今回のようにある特定の波長に合わせて整



Fig. 1 Cross section image of induced transmission filter with Fe.

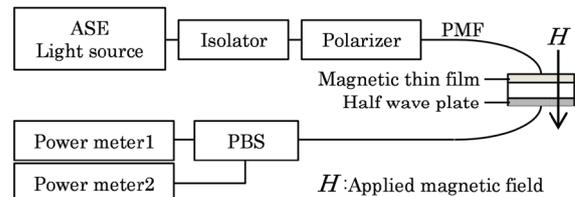


Fig. 2 Faraday effect measurement set-up.

合わせる光学フィルタの作製に適している。

2.3 測定・評価方法

透過率、反射率については、分光光度計 (株日立製作所製 U-4100) を使用し、磁化曲線の測定には振動試料型磁力計 (理研電子(株)製 BHV-50) を使用した。Fe, Co 薄膜の光学定数 n, k は以下のように求めた¹⁰⁾。光を透過する範囲で膜厚の異なる 2 種類の試料を作製して、厚み (d_1, d_2) と透過率 (T_1, T_2) を測定し、(1)式によって消衰係数 k を求めた。

$$k = [\lambda / 4\pi (d_1 - d_2)] \ln (T_1 / T_2). \quad (1)$$

更に、光が透過しない厚みの試料を作製して反射率 R を測定した。光が透過しなければ膜内の多重反射を無視でき、反射率 R は(2)式で表すことができる。(1)式で得られた消衰係数 k と反射率 R から n を求めた。

$$R = [(1-n)^2 + k^2] / [(1+n)^2 + k^2]. \quad (2)$$

ファラデー回転角測定装置を Fig. 2 に示す。1550 ±30 nm の範囲でブロードなスペクトル特性をもつ ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光源から PMF で伝播された光はアイソレーターおよび偏光子を介して一軸の直線偏光となり、磁性膜付きガラス基板に入射する。磁性膜を光が通過するとき、印加された磁界に応じたファラデー回転が生じる。直後に 1/2 波長板によって偏光面を 45 deg. 回転させて

再び PMF で伝送する．最終的に PBS(Polarization Beam Splitter)で P, S 偏光に分離してパワーメーターによって得られた光強度比からファラデー回転角を求めた．ASE 光源は安藤電気㈱製 AQ2141 を使用し，パワーメーターは Agilent Technologies 製 8163A を使用した．

3. 実験結果

3.1 Fe, Co 単層薄膜の磁気光学特性と飽和ファラデー回転角の推定

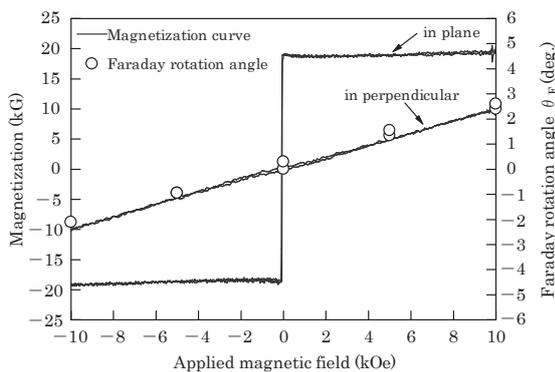
Fe, Co 薄膜単独の基礎特性の測定結果を Fig. 3 および Table 2 に示す．Fig. 3 は 65 nm 厚 Fe 薄膜, 55 nm 厚 Co 薄膜 に対して最大 ± 10 kOe の磁界の範囲で測定した膜面内方向 および垂直方向磁化曲線を示したものである．また, この 範囲で測定されたファラデー回転角 (以下 θ_F) も併記した．Fe, Co 薄膜のどちらも膜面垂直方向の反磁界効果によって 面内磁化膜となっている．垂直方向は反磁界の影響によって ± 10 kOe でも飽和磁化しないが, 磁化直線の直線性に優れ, ヒステリシスも小さく, 垂直方向の磁化飽和する磁界は飽和反磁界で与えられるものと推定される．各単層膜の 磁場に対する θ_F も直線性を有しており, 垂直方向磁化曲線 と対応している．飽和磁化値は文献値と比べて小さい値で あった．また, 1550 nm における光学定数 n, k は, 文献値 に近く, 純粋な金属元素に近い薄膜が得られていると考え

られる．特に Fe は真空蒸着法では真空槽内の残留酸素などと結合しやすいが, Ar イオン照射を併用することで, 酸化を抑制し純金属薄膜を得ることができていると推測される．

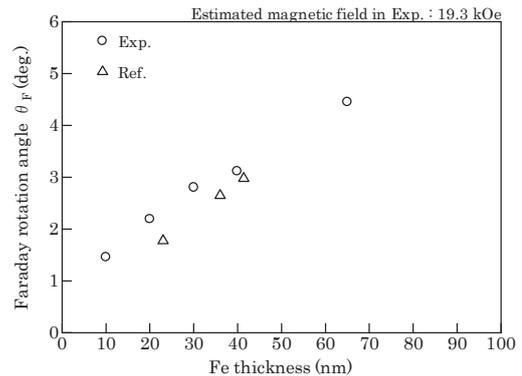
Fig. 4 に Fe, Co 薄膜単独の θ_F の膜厚依存性の結果を示す．図中に示す θ_F は磁気飽和した場合の計算値である．実際の測定範囲 (± 10 kOe) では磁気飽和していないので, 垂直方向磁化曲線に近似した直線を引き, 面内方向磁化曲線との交点から飽和磁界を求めた．これにより Fe, Co の飽和磁界はそれぞれ ± 19.3 kOe, ± 18.3 kOe と推定した．また, θ_F も ± 10 kOe 以上の磁場に対して直線性を有していると仮定し, Fe, Co の ± 10 kOe での θ_F 測定値にそれぞれ 1.93, 1.83 を乗じた値を磁気飽和時の θ_F とした．以後記載する θ_F はすべて上記に基づいて計算された値である．光が透過で

Table 2 Optical and magnetic properties of Fe, Co single layer prepared by IAD method.

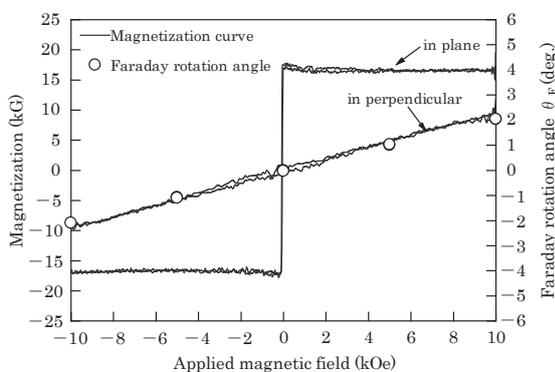
Property	Fe		Co	
	Ref.	Exp.	Ref.	Exp.
Refractive Index n (@1550nm)	3.62 ¹¹⁾	3.65	4.29 ¹²⁾	4.30
Extinction coefficient k (@1550nm)	5.56 ¹¹⁾	5.60	6.41 ¹²⁾	6.17
Magnetic saturation M_s (kG)	21.6 ¹³⁾	18.8	17.9 ¹³⁾	17.0



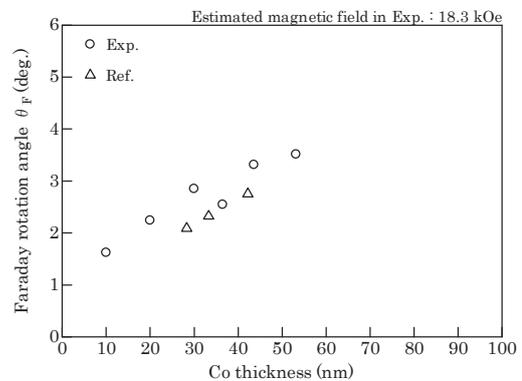
(a) Fe



(a) Fe single layer



(b) Co



(b) Co single layer

Fig. 3 Magnetization curves and Faraday rotation angle of Fe, Co single layer.

Fig. 4 Faraday rotation angle of Fe, Co single layer compared with those of Ref. 14).

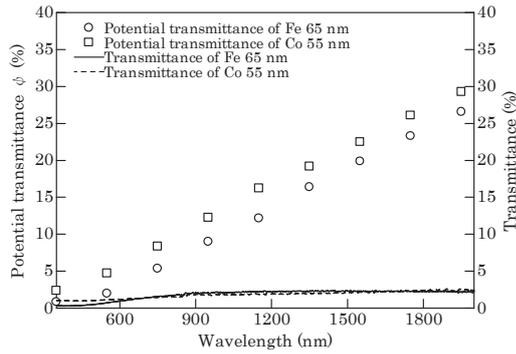


Fig. 5 Potential transmittance by theoretical calculation of Fe (or Co) films compared with transmittance of Fe (or Co) single layer.

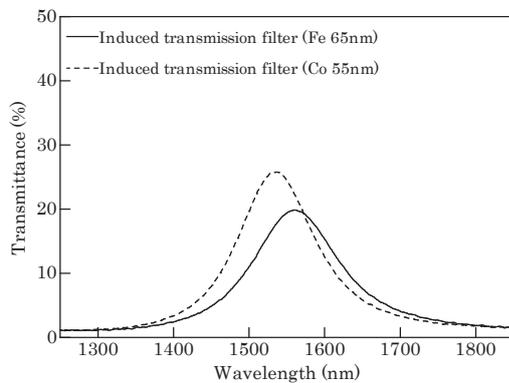
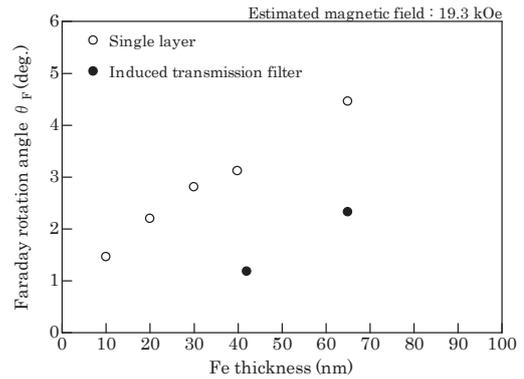


Fig. 6 Transmittance of induced transmission filter with Fe and Co films, thickness are 65 and 55 nm, respectively.

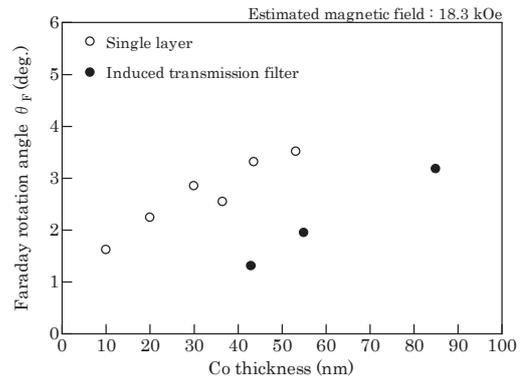
きる膜厚範囲において、Fe, Co 共に文献値と比較してやや大きな θ_F が得られた。これらは共通してプロットの近似直線は原点を通らない。ファラデー効果は磁化した媒質を伝播している際に生じる他、磁化されていない媒質の境界を通過する際にも生じる¹⁵⁾。また、内部多重反射効果によって効果が増強されることも関係している。今回作製した膜厚範囲における θ_F は、膜厚に対して直線的な比例関係を示した。

3.2 Fe, Co を用いた誘導透過干渉フィルタの光学特性

Fe 65 nm および Co 55 nm を用いて設計した誘導透過干渉フィルタを作製したとき、最大でどの程度の透過率が得られるかを表すポテンシャル透過率 ψ の計算結果を Fig. 5 に示す。また、図中に併記したスペクトルは Fe 65 nm および Co 55 nm 単層の場合の透過率測定値である。この結果から、可視域から赤外域の範囲において、長波長領域にいくほど単層に比べて透過率を大きくできることがわかった。一方、Fe, Co の θ_F も同じく長波長域で大きくなり、1550 nm 付近で最大値を取ることが知られており¹⁴⁾、透明性とファラデー効果を両立するためには 1550 nm 帯の光を用いることが有効であると言える。設計波長 1550 nm として、実際に作製した誘導透過干渉フィルタの透過率測定値を Fig. 6 に示す。このように、誘導透過干渉フィルタは設計波長においてのみ整合するため、設計波長で透過率が極大化する。それ以外の波長域は阻止帯となる。実際に作



(a) Fe



(b) Co

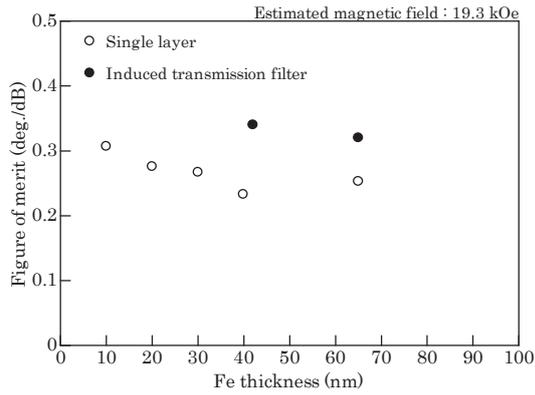
Fig. 7 Faraday rotation angle of induced transmission filter with Fe (or Co) film compared with Fe (or Co) single layer.

製したフィルタは、Fe が 65 nm のとき、ピーク透過率が約 20 % となり、ポテンシャル透過率の計算値 19.9 % とほぼ一致した。Co が 55 nm のとき、ピーク透過率は約 25 % でポテンシャル透過率計算値 22.5 % より大きい。これは実際に成膜された Co が 55 nm よりもやや薄かったためと考えられる。単層の場合と比較してみると、Fe を 65 nm 単層で配置したとき、その透過率は約 2.2 % であり本フィルタによって約 9 倍に透過光を増加することができている。Co を 55 nm 単層で配置したときの透過率も約 2.2 % であるので、約 10 倍に透過光を増加できている。

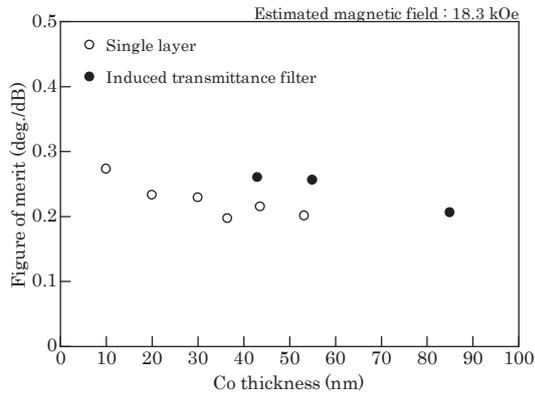
3.3 誘導透過干渉フィルタの導入によるファラデー効果性能指数の改善

Fig. 7 に誘導透過干渉フィルタの導入による θ_F の結果を示す。単層膜と同じ膜厚と比較すると、およそ半分程度にまで θ_F が低下した。誘導透過干渉フィルタは、透過光を増大させる半面、膜内の反射光を極限まで減らしている。このことが、実効的な θ_F の低下を引き起こしている要因である。これは前述した境界効果および内部多重反射効果が全体のファラデー効果に大きく寄与していることを示している。ここで、透過光損失を $P_{\text{loss}}(\text{dB}) = -10 \log(I/I_0)$ (I : 透過光強度, I_0 : 入射光強度) とし、透過損失あたりのファラデー回転角を性能指数 $\text{FOM}(\text{deg./dB}) = |\theta_F| / P_{\text{loss}}$ と定義した。

Fig. 8 に単層膜と誘導透過干渉フィルタの性能指数を示す。誘導透過干渉によって磁性膜の単位厚さあたりの回転



(a) Fe



(b) Co

Fig. 8 Figure of merit of induced transmission filter with Fe (or Co) film compared with Fe (or Co) single layer.

角は減少したが、透過率を大きく増加させたことで透過損失あたりの回転角としては大きくなり、性能指数が向上した。

Bi:YIG と誘電体膜からなる磁性フォトニック結晶では、すでに多くの構造で検討が成されている。その中で (SiO₂/Ta₂O₅)⁵/Bi:YIG/(Ta₂O₅/SiO₂)⁵ の構造で具体的な実施例が示されている⁵⁾。文献によれば、設計波長 720 nm, Bi:YIG 層の厚さ 300 nm のとき、波長 634 nm 付近に大きな光局在が生じ、透過率 56 % (2.52 dB) でファラデー回転角 -0.8 deg. が得られている。本論文で定義した性能指数で表せば、0.32 deg./dB となり、波長 1550 nm で観測した Fe 65 nm の誘導透過干渉フィルタと同程度の性能指数となる。

3.4 アドミッタンス層の整合波長ずれの効果

アドミッタンス整合層は磁性層の両側に対称に配置される。磁性層に対して、入射媒質側の整合層の設計波長を λ_a , 出射媒質(基板)側の整合層の設計波長を λ_b としたとき、 λ_a, λ_b を光源波長に一致させた $\lambda_a = \lambda_b = 1550$ nm の場合を基本構造とする。

膜内に反射光を生じさせ磁性体層に光を局在化させてファラデー効果を増大させることを目的に、基本構造に対して入射媒質側の整合波長 λ_a と出射媒質側の整合波長 λ_b を以下のようにずらした構造を考える。

$$\lambda_a = 1550 + \Delta\lambda, \quad \lambda_b = 1550 - \Delta\lambda$$

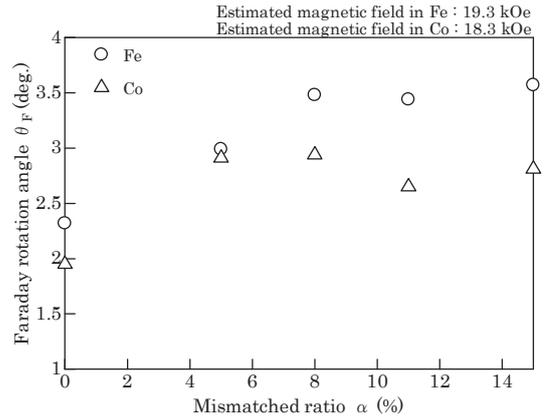


Fig. 9 Faraday rotation angle depends on mismatched ratio measured in induced transmission filter with Fe (or Co) film.

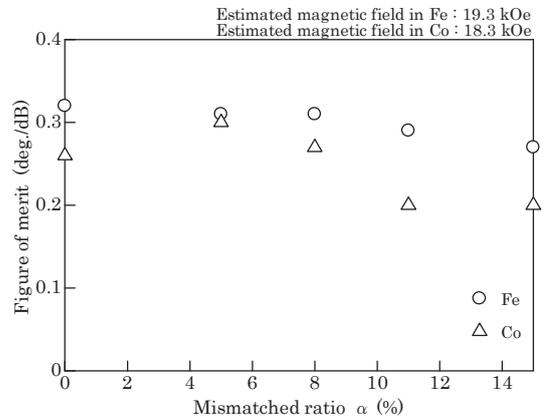


Fig. 10 Figure of merit depends on mismatched ratio.

ここで、基本構造に対する整合波長ずれ a を以下のように定義する。

$$a = \frac{\Delta\lambda}{1550} \times 100 (\%)$$

基本構造に対して入・出射媒質の整合波長を $\pm a$ % ずらした構造を作製し、その効果について検証した。Fig. 9, Fig. 10 に θ_F および性能指数と整合波長ずれ a の関係を示す。 $a=0$ が基本構造であることを示している。

Fig. 9 から分かるように、整合波長ずれ a が 8 % までは θ_F が単調に増加し、基本構造の約 1.5 倍にまで増大する。しかしながら、 a を 8 % 以上に大きくしても、Fe の場合にはこれ以上の θ_F 増加は無く、Co の場合には逆に低下する傾向が見られた。

Fig. 9, 10 において、Fe の場合では、8 % までの a の領域で θ_F を増大させることができたが、性能指数は一定であった。Co の場合では、5 % までの a の領域で θ_F と性能指数の両者が増大することが確認できる。 a の大きい領域で性能指数が低下するのは、膜内部での反射が強くなり、透過損失が大きくなるためであると考えられる。

誘導透過干渉フィルタの基本構造は膜内の反射光を抑制することに主眼をおいたものであるのに対し、整合ずれ構造は膜内で生じる反射光による弱い光局在化によってファ

ラデー効果が増大されるものと推察され、前述した磁性フォトニック結晶で導入されたマイクロキャビティ構造と同様の効果を発現しているものと考えられる。膜内における適度な反射光はファラデー効果を大きく増強する働きがあるが、強い光吸収をもつ金属磁性体膜の場合、ある一定以上の強い光局在化を起こすと多重反射による光吸収が優位となり、性能指数としては低下してしまうと考えられる。

誘導透過干渉フィルタは、アドミッタンス整合層の設計波長によって膜内の反射光を自在にコントロールすることが可能であり、透過光とファラデー効果の両立のための有効な手段の一つと言える。

4. まとめ

金属磁性超薄膜のファラデー効果を利用する磁気光学デバイスの実現を最終目的として、Fe, Co をファラデー効果超薄膜として採用し、誘導透過干渉フィルタを用いて透過光を増大させるための基礎検討を行った。以下に得られた知見を要約して示す。

- (1) 真空蒸着法(IAD)で作製した Fe, Co 薄膜は、スパッタ法で作製された文献値と比べてやや高いファラデー回転角を示し、膜厚に対して比例関係であった。
- (2) Fe, Co 超薄膜を用いた誘導透過干渉フィルタの設計波長におけるピーク透過率は、理論計算から求めたポテンシャル透過率とよく一致し、Fe, Co 単層に比べ 10 倍近く透過光を増加させることができた。
- (3) 誘導透過干渉フィルタによって膜中の界面反射を極限まで減らした結果、磁性層膜厚あたりのファラデー回転角は単層に比べて半分以下に低下した。
- (4) 誘導透過干渉フィルタの導入による透過率の大幅な増加によって、Fe 厚さ 65 nm のとき、性能指数 FOM は単層時の 0.25 deg./dB と比べ、0.32 deg./dB まで向上した。これは、観測波長は異なるものの、Bi:YIG を用いた磁性フォトニック結晶の FOM と同程度である。
- (5) 誘導透過干渉フィルタを構成する整合層の整合波長をずらすことで膜内に反射光が生じ、ファラデー回転角が増大した。整合波長ずれを適切に選択することで性能指数を犠牲にすることなく、ファラデー回転角を増大できることが示された。

本方法は金属磁性体に対して光の透過とファラデー効果を両立するための有効な手段と言え、将来的には、金属磁性体のキュリー温度が高い特徴を活かして、高温下で動作する磁気光学デバイス/センサへの応用が期待される。

謝辞

本研究は、JST 研究成果展開事業「京都スーパークラスタープログラム/長野サテライトクラスター」の補助を得て実施されたものであり、ここに謝意を表する。

References

- 1) M.Takahashi *et al.*: *Magnetics Japan*, Vol.1, No.3, pp.118-122 (2006).
- 2) T.Y.Kim *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, Vol.38, [5], p.3240-3242 (2002).
- 3) T.Hanada *et al.*: *40th Annual Conf. on Magnetics in Japan*, 6pB-13 (2016).
- 4) M.Inoue *et al.*: *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy.*, Vol.58, No.9, p.545-552 (2011).
- 5) T.Takayama *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol.24, No4-2, p.391-394(2000).
- 6) M.Inoue, T.Fujii: *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol.21, No4-1, p.187-192(1997).
- 7) P.H.Berning,A.F.Turner: *J. Opt. Soc. Am.*, Vol.47,No.3, pp.230-239(1957).
- 8) M.Scalora *et al.*: *Optics & Photonics News*, p.25-27(1999).
- 9) Cheng-Chung Lee: *Kogakuhakumaku to Seimaku-gijutu* (in Japanese), p.239-246(AGNE Gijutu Center, Tokyo, 2002).
- 10) M.Kobiyama: *Kogakuhakumaku no Kisoriron*(in Japanese), p.137-142(OPTRONICS,Tokyo,2003).
- 11) M. A. Ordal *et al.*, *Appl. Opt.* 27, pp.1203-1209 (1988).
- 12) AIST, Network Database System for Thermophysical Property Data.
- 13) Kagaku Binran Kisohen II (in Japanese), pp.1247-1248(Maruzen, Tokyo).
- 14) K.H.Clemens,J.Jaumann: *Zeitschrift fur Physik.*, 173, pp.135-148(1963).
- 15) T.Yoshino: *Seisan Kenkyu* (in Japanese), Vol.20, 9, pp.439-447(1968).

2016年10月4日受理, 2016年12月13日採録