Ring Interferometric Magnetic Field Optical Sensor Using a Garnet Single Crystal

H. Tamura, H. Tozuka, T. Nakaya, and O. Kamada

Polytechnic University, 4-1-1 Hashimoto-dai, Midori-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5196, Japan

A magnetic-field sensor based on reflection-ring interferometry is proposed to achieve a probing scheme with a polarization maintaining fiber (PMF). We used $\text{Tb}_{0.19}\text{Y}_{0.81}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ((TbY)IG) crystals with a striped magnetic domain structure as a Faraday element to enable both parallel and perpendicular fields to the propagating direction of the optical wave to be measured. A linear magnetization curve without hysteresis and a linear Faraday effect were expected to be obtained as the magnetization process of rotation occurred in each striped magnetic domain. This assumption was confirmed in an experiment. Experimental results such as sensitivity and SNR were well explained by this model. The obtained sensor sensitivity was $1.08 \times 10^{-3} \text{ } \%/(\text{A/m})$, and good linearity of sensor output was obtained over a wide dynamic range between 1 A/m to 10^4 A/m .

Key words: ring interferometry, magnetic-field optical sensor, Faraday effect, rare-earth iron garnet, magnetization rotation process.

ガーネット単結晶を用いたリング干渉型光磁界センサ

田村仁志・戸塚俊秀・中谷努・鎌田修

職業能力開発総合大学校, 神奈川県相模原市緑区橋本台 4-1-1 (〒252-5196)

1. はじめに

ファラデー効果を利用した光磁界センサは、高絶縁性、耐電磁ノイズ性、非接触でリモートセンシングが可能であるので、特に大電流を測定するためにファイバコイルを用いたものが、電力設備や工場設備で実用化がなされている¹⁾。一方、希土類鉄ガーネット結晶のファラデー効果を用いると高感度が実現され²⁾、さらに磁化の回転に伴うファラデー効果は高速応答が可能であることから、高周波電流測定に応用されている³⁾。このような光磁界センサの用途を考えると、光ファイバ先端にファラデー素子を設けたプローブ型センサが有用であるが、振動などの外乱に対して安定に動作することが要求される。

リング干渉型磁界センサは共通光路干渉法の一つであり、振動などによる光路長の変動の影響が相殺される特徴を持つ⁴⁾。また、プローブ型センサヘッド部の実現のためには、光伝送路として偏光状態が変化しない定偏波ファイバ (Polarization Maintaining Fiber: PMF) を用いれば良いが、逆に大きな複屈折とその温度変化が実用上の問題点である。しかし、リング干渉計に挿入して用いれば、それらの影響は補償され、安定な光磁界センサの構成が得られることから、今回以下のような検討を行ったので報告する。

センサヘッド部には、縞状磁区構造を有する希土類鉄ガーネット結晶 (TbY)IG を用いる。Flux 法で育成された (TbY)IG 単結晶は、(110)面下の成長域で、成長誘導磁気異方性により縞状磁区構造を持ち、ヒステリシスの無い直線的な磁化過程とファラデー効果が得られるので、磁界センサ用素子として有用である⁵⁾。今回は、プローブに対して平行な磁界を測定する素子に加えて、新たに垂直な磁界の測定が可能な素子の提案とその評価を行う。そして、リング

干渉型センサを構成して、センサ特性の評価を行うが、従来の光源であるレーザダイオード (Laser Diode: LD) に換えて、受光器に発生する雑音を改善するために、可干渉長の短いスーパーluminescentダイオード (Super Luminescent Diode: SLD)⁶⁾ を用いた場合の実験結果を報告する。そして、ガーネット結晶を用いたリング干渉型光磁界センサが、高感度で安定なプローブ型センサの実現に有用であることを示す。

2. 実験方法

2.1 リング干渉型光磁界センサの構成

今回提案するリング干渉計を用いた反射型光磁界センサの構成を Fig. 1 に示す。光源からの光波は、偏光子および無偏光ビームスプリッタを透過後、右廻りの光波 (e_{cw}) と左廻りの光波 (e_{ccw}) に分かれて伝搬し、偏光ビームスプリッタにより反射型のセンサヘッド部に導入される。光伝送路として定偏波ファイバを用いるが、直線偏光状態が保存されるように、主軸方向と偏光方向が一致して伝搬するように

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

結合される．ヘッド部は，方位 45° の $\lambda/4$ 板と垂直反射用ミラーの間にファラデー素子を挿入した構成であり，左右の円偏光がファラデー効果による位相を受ける．ヘッド部からの反射光は直線偏光に戻されており，それぞれ入射時と直交した定偏波ファイバの主軸方向を伝搬後，偏光ビームスプリッタにより入射時と反対方向の光路を伝播し，フォトダイオードに入射される．また，直線性が良好なセンサ出力を得るために， $\lambda/4$ 板・ 45° ファラデー回転子・ $\lambda/4$ 板を組み合わせた素子を光路に挿入して，光学的なバイアスを与えている．このような構成のセンサ出力は，次式のジョーンズマトリックス法を用いて計算することができる．

$$\mathbf{e}_{cw} = \overleftarrow{\mathbf{M}}_{BSR,0} \overleftarrow{\mathbf{M}}_{QW,45} \overleftarrow{\mathbf{M}}_{45F} \overleftarrow{\mathbf{M}}_{QW,45} \overleftarrow{\mathbf{M}}_{PBST,90} \overleftarrow{\mathbf{M}}_{PMF,0} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{QW,45} \overrightarrow{\mathbf{M}}_F \overrightarrow{\mathbf{M}}_m \overrightarrow{\mathbf{M}}_F \overrightarrow{\mathbf{M}}_{QW,45} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{PMF,0} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{PBSR,0} \overrightarrow{\mathbf{M}}_m \overrightarrow{\mathbf{M}}_m \overrightarrow{\mathbf{M}}_{BSR,90} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{P,0} \mathbf{L}_0 \quad (1)$$

$$\mathbf{e}_{ccw} = \overleftarrow{\mathbf{M}}_{BST,0} \overrightarrow{\mathbf{M}}_m \overrightarrow{\mathbf{M}}_m \overleftarrow{\mathbf{M}}_{PBSR,0} \overleftarrow{\mathbf{M}}_{PMF,0} \overleftarrow{\mathbf{M}}_{QW,45} \overrightarrow{\mathbf{M}}_F \overrightarrow{\mathbf{M}}_m \overrightarrow{\mathbf{M}}_F \overrightarrow{\mathbf{M}}_{QW,45} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{PMF,0} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{PBST,90} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{QW,45} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{45F} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{QW,45} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{BST,0} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{P,0} \mathbf{L}_0 \quad (2)$$

ここで，光源の座標系はFig. 1 に示すように，偏光子の主軸（ x 軸， y 軸）と光波の伝播方向（ z 軸）と一致させた右手系の座標をとる．しかしながら，ミラーによる反射で右手系と左手系間の座標変換がなされることを考慮する必要がある⁷⁾．したがって，各光学素子の表記を $\overrightarrow{\mathbf{M}}_{s,\theta}$ としたが， $\rightarrow$ は右手系の座標にある場合を示し， $\leftarrow$ は光波がミラーで反射されることにより，左手系の座標に変換された場合を示す．そして，右手系から左手系への座標変換を示す行列を $\mathbf{r}$ とすると， $\overrightarrow{\mathbf{M}}_{s,\theta}$ は次式で得られる．

$$\overleftarrow{\mathbf{M}}_{s,\theta} = \mathbf{r} \overrightarrow{\mathbf{M}}_{s,\theta} \mathbf{r}^{-1} \quad (3)$$

また， S は光学素子の種類を示し， θ は方位である．BSRおよびBSTは無偏光ビームスプリッタで，それぞれ反射される場合と透過する場合，PBSR，PBSTは，偏光ビームスプリッタで反射される場合と透過する場合，QWは $\lambda/4$ 板，PMFは定偏波ファイバ， $45F$ は 45° のファラデー回転素子， F は磁界検出用ファラデー素子， m は反射ミラー， P は偏光子を示している．本構成では光源からの直線偏光をセンサ系に入射するので，計算には直線偏光を基底ベクトルとしたマトリックスを用いる．そして， $\mathbf{L}_0$ は入射光を表すジョーンズベクトルであり，今回は x 軸方向の直線偏光である．定偏波ファイバにより与えられる位相を示すマトリックスは，今回は方位が 0° であるので

$$\overrightarrow{\mathbf{M}}_{PMF,0} = \overleftarrow{\mathbf{M}}_{PMF,0} = \begin{bmatrix} e^{i\frac{\pi}{\lambda}\Delta n L_{PMF}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\pi}{\lambda}\Delta n L_{PMF}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

である．ここで， Δn はモード複屈折率， λ は伝搬する光波の波長， L_{PMF} は定偏波ファイバの長さを示す．本構成においては， $\mathbf{e}_{cw}$ と $\mathbf{e}_{ccw}$ は共に，往路と復路においてPMFの x 軸方向と y 軸方向の両方を伝搬するので，複屈折の影響が補償され，その温度変化の影響も受けないことが期待される．ファラデー効果による位相変化は，ファラデー回転角を θ_F とすると，

$$\overrightarrow{\mathbf{M}}_{\theta_F} = \begin{bmatrix} \cos \theta_F & -\sin \theta_F \\ \sin \theta_F & \cos \theta_F \end{bmatrix}, \quad \overleftarrow{\mathbf{M}}_{\theta_F} = \begin{bmatrix} \cos \theta_F & \sin \theta_F \\ -\sin \theta_F & \cos \theta_F \end{bmatrix} \quad (5)$$

である．そして，(1)式および(2)式から，入射光の振幅を e_0 とすると，受光器上での $\mathbf{e}_{cw}$ と $\mathbf{e}_{ccw}$ は以下のように得られる．

$$\mathbf{e}_{cw} = \frac{1}{2} e_0 \begin{bmatrix} -ie^{-i(2\theta_F - \frac{\pi}{4})} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_{ccw} = \frac{1}{2} e_0 \begin{bmatrix} ie^{i(2\theta_F - \frac{\pi}{4})} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

したがって，干渉信号 I は以下の式で表される．

$$I = |\mathbf{e}_{cw} + \mathbf{e}_{ccw}|^2 = \frac{1}{2} |e_0|^2 (1 - \sin 4\theta_F) \quad (7)$$

以上のことから本構成は，同一光路干渉計が構成されており， $\mathbf{e}_{cw}$ と $\mathbf{e}_{ccw}$ に対するファラデー効果による位相差のみを，干渉信号として検出できることが分かる．

2.2 用いる (TbY) IG 結晶とセンサ特性の評価方法

今回の検討に用いた試料の外観をFig. 2 に示す．挿入図に示したように，(110)面下の成長域から切り出した試料であり，タイプAとタイプBの二種類である．タイプAは磁壁に対して平行な面で切り出したもので， $[\bar{1}10]$ 方向に磁界 H_a を印加し，それと平行な方向に光を伝搬させ，プローブに対して平行な磁界を測定するためのものである．タ

Fig. 2 Crystal cuts used for experiments. Inset shows crystal cut from (110) growth facet of (TbY)IG crystal grown by flux method.

イプBは $[\bar{1}10]$ 方向から 45° だけ傾けて切り出した試料に、 $[001]$ 方向に対して 45° の方向に磁界 H_a を印加し、それと垂直な方向に光を伝搬させるもので、プローブに対して垂直な磁界を測定するために新たに提案するものである。これらのファラデー素子を評価するために、ファラデー効果による磁化曲線の測定、偏光顕微鏡による磁区観察を行った。また、方位 45° の偏光子と検光子の間にファラデー素子を配置したセンサ構成を用いて感度定数の測定を行った。そして、Fig. 1 に示すような反射型のリング干渉計を光学ベンチ上に構成して、センサ特性の評価を行った。光源には波長 $1.3 \mu\text{m}$ のSLDを用い、ビート長の整数倍となるように長さ 1 m のPMFを用いた。受光器はInGaAsフォトダイオードを用い、信号検出はロックインアンプを用いて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ファラデー素子の評価結果

ファラデー効果の外部磁界依存性を測定して、用いた素子の磁化曲線を求めた。結果をFig.3およびFig.4に示す。○はゼロから飽和するまで正の磁界を、□は正から負の磁界を、△は負の磁界からゼロに至る磁界を印可した場合のファラデー回転角をそれぞれ示している。両者ともに、ヒステリシスのない直線的な磁化曲線が得られていることが分かる。縞状磁区構造のそれぞれの磁区内は一軸異方性を有し様に磁化した単磁区構造状態として考えられるので、磁化曲線はそれぞれの磁区における磁化過程の和として得られると考えた⁵⁾。さらに、タイプAの試料のように、磁化容易軸に垂直に外部磁界を印加する場合、ヒステリシスの無い磁化過程が得られることが期待される⁶⁾。計算によ

Fig. 3 Measurement results for Faraday rotation angle of Type-A sample as a function of applied magnetic field, H_a .

Fig. 4 Measurement results for Faraday rotation angle of Type-B sample as a function of applied magnetic field, H_a .

る磁化曲線は、単位体積当たりの磁気エネルギーと異方性エネルギーの和が最小になるような条件から求め、さらに反磁界の補正を行った。Fig.3 に実線で結果を示すが、測定結果と良い一致を示している。そして、この試料の飽和磁界(H_s)は 41.2 kA/m であり、飽和時のファラデー回転角の値から、ファラデー回転能 (θ_{SF}) は $23.3^\circ/\text{mm}$ であることが分かった。タイプBの試料の場合は、Fig.5 に示すように、磁化容易軸に対して 45° 及び 225° の方向に外部磁界が印加された二種類の磁区の磁化過程の和として考え

Fig. 5 Magnetization rotation process for Type-B sample.

Fig. 6 Measurement results for domain width and displacement of domain wall as a function of applied dc magnetic field.

る。そして、ファラデー効果は、光の伝搬方向に平行な磁化の成分に比例するので、 H_a 方向に垂直な磁化成分を求めた。それぞれの磁区における磁化過程を計算した結果をFig.5に示しているが、それぞれは大きなヒステリシスを示す。しかしながら、二つの磁化過程を合成するとFig.4に実線で示したような結果となる。印加磁界が小さい領域ではヒステリシスが補償され、直線的な磁化過程が得られている。この線形性が良い磁界領域の最大値を H_r とする。そして、計算結果から、今回のような条件では H_r はタイプAにおける H_s の1/2の値になり、合成した磁化の H_r での大きさは飽和磁化の1/4になることから、ファラデー回転角も $\theta_{sf}L$ の1/4になることが分かった。 H_r 以下での測定結果と計算結果は良く一致しており、この試料の H_r は20.3 kA/mであることが分かった。そして、このような磁化過程のモデルは、磁壁が移動しないことを仮定しているの、印加磁界による磁壁移動の有無を偏光顕微鏡により確認した。結果をFig.6に示す。タイプAの試料は磁区幅が約76 μm 、タイプBでは約80 μm の縞状磁区構造になっているが、タイプAでは16 kA/mまで、タイプBでは20 kA/mまでの範囲で、磁壁の移動と磁区幅の変化は見られなかった。しかし、それ以上の印可磁界領域では、複雑な磁壁の移動が観察された。特にタイプBの場合、Fig.4に示すように、 H_r 以上の印加磁界の領域で、計算結果では磁化の反転によってファラデー効果の符号の反転が生じることを示しているが、実験結果では符号の反転を示さずに連続的に飽和に至っている。この原因としては、 H_r 以上の印加磁界の領域では磁化は反転することなく、磁化の回転に磁壁の移動が加わった磁化過程に変化していることが考えられるが、今後の検討が必要である。最後にファラデー素子の評価として、感度定数を測定した。方位45°の偏光子と検光子の間にファラデー素子を配置した透過型構成の場合、センサ出力は次式で与えられる。

$$I_s = \frac{1}{2} |e_0|^2 (1 + \sin 2\theta_f). \quad (8)$$

そして、第二項の信号成分を第一項のDC成分で除算してセンサ信号としており、感度定数(S)は単位印加磁界当たりのセンサ信号の大きさを百分率で示したもののなので、そ

れぞれタイプA、タイプBについて、次式で与えられる。

$$S_A = \frac{\sin(2\theta_{sf} L H_a / H_s)}{H_a} \times 100\%, \quad (9)$$

$$S_B = \frac{\sin(\theta_{sf} L H_a / 2H_r)}{H_a} \times 100\%. \quad (10)$$

ここで、 H_a は印可磁界強度である。長さが等しい場合、タイプBの感度定数は、タイプAの1/2になることが分かる。今回の場合について計算結果と測定結果を比較すると、タイプAの計算値は $S_{A,cal} = 3.6 \times 10^{-3} \%/(\text{A/m})$ であり、測定値は $S_{A,ex} = 3.0 \times 10^{-3} \%/(\text{A/m})$ であった。またタイプBでは、 $S_{B,cal} = 2.1 \times 10^{-3} \%/(\text{A/m})$ 、 $S_{B,ex} = 2.0 \times 10^{-3} \%/(\text{A/m})$ であった。両者は比較的良く一致しており、タイプBの場合に感度が低くなることが実験的にも分かった。

3.2 光源と受光回路系に発生する雑音

光源としてLDを用いた場合、反射戻り光による雑音が信号対雑音比(Signal-to-Noise Ratio: SNR)の劣化の原因となることが考えられる。したがって、受光器に発生する雑音を、LDおよびSLDを用いた場合について比較する測定を行った。結果をFig.7に示す。□および■はそれぞれ2個のLD、○および●はそれぞれ二個のSLDに対する測定結果を示す。LDとSLDの両者に二桁程度の差が生じていることがわかる。また、受光回路系に発生する雑音はショット雑音と熱雑音の和と考え、次式で計算した結果も実線で示してある。

Fig. 7 Dependence of noise current at the photodetector on received optical power.

$$i_n^2 = \left(2q\eta\bar{P} + \frac{4kT}{R_{sh}} + \frac{4kT}{R_f} \right) \Delta B. \quad (11)$$

ここで、 q は電荷素量、 η はフォトダイオードの変換効率、 $\bar{P}$ は平均受光量、 ΔB は帯域幅、 k はボルツマン係数、 T は温度、 R_{sh} はフォトダイオードの内部抵抗、 R_f は電流電圧変換回路のフィードバック抵抗である。今回の測定条件は、 $\eta = 0.85$ A/W、 $R_{sh} = 100$ M Ω 、 $R_f = 10$ k Ω 、 $T = 300$ K、 $\Delta B = 300$ kHz である。SLDを用いた場合は計算値に近い値を示しており、光源にSLDを用いることで、LD使用時に比較して、雑音を大幅に低減できることが分かった。

3.3 センサ特性評価

得られたファラデー素子を反射型リング干渉計に適応して、センサ特性の評価を行った。タイプA及びタイプBについて、以下に述べるような項目について、同様な測定結果と考察の内容が得られたので、ここでは今回新規に提案したタイプBの試料を用いた場合で代表して説明する。Fig.8 に交流磁界の測定結果を示す。磁界強度が1 A/mから10⁴ A/mの範囲で良好な直線性が得られていることがわかる。センサ出力は式(7)で示されるが、交流磁界測定時は、系の変動の影響を除去するために、第二項のAC成分を第一項のDC成分で除算してセンサ出力としている。その計算結果を実線で示してある。そして、センサの感度定数 (S) は、反射型構成なので透過型に対して感度が2倍となり、今回の場合は次式で与えられる。

$$S = \frac{\sin(\theta_{sf} LH_a / H_r)}{H_a} \times 100\% . \quad (12)$$

Fig. 8 Measured and calculated results of sensor output for applied ac magnetic field.

Fig. 9 Measured and calculated results of SNR for applied ac magnetic field.

感度定数の計算値として $S_{cal} = 4.2 \times 10^{-3}$ %/(A/m) が得られるが、測定値は $S_{ex} = 1.08 \times 10^{-3}$ %/(A/m) であり、Fig.8 からわかるように計算値に対して 26 % に低下していることがわかった。また、SNRの測定結果をFig.9 に示す。また、Fig.7 で示されたように、雑音は熱雑音とショット雑音のみであると仮定してSNRの計算を行ったが、その結果も併せて実線で示してある。雑音に等価な磁界強度 4×10^{-1} A/m が達成されている。しかし、計算値に対して測定値は -20 dB程低い値を示し、センサ感度の低下がその主な原因と考えられる。

3.4 感度低下の原因

センサ特性評価の結果、感度が 26 % に低下していたが、その原因として以下の三点を検討した。光源として用いた SLD の発光スペクトル幅は LD に比較して広いので、最初に (TbY)IG 結晶のファラデー効果が持つ波長分散の影響を計算により検討した。一般にファラデー回転能の波長依存性は、

$$\theta_{sf}(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^2}, \quad (13)$$

で表される。センサ信号に光源の波長分布を考慮した場合の干渉信号 I_f は⁹⁾、

$$I_f = \int_{-\infty}^{\infty} \sin 4\theta_{sf}(\lambda) L \frac{H_a}{H_r} g(\lambda) d\lambda, \quad (14)$$

で表される。 $g(\lambda)$ は SLD の発光スペクトラムを示すガウス分布である。今回の場合、スペクトル分散は $\sigma = 16.6$ nm、

中心波長は $\lambda_0 = 1.32 \mu\text{m}$ である。計算結果は、LDを使用する場合に相当するが、単一波長での計算結果と同じであり、ファラデー効果の波長分散の影響は無視できることがわかった。二点目の原因として、受光器面上での $\mathbf{e}_{\text{cw}}$ と $\mathbf{e}_{\text{ccw}}$ のビーム径の差が生じると、干渉する成分が減少し、感度に寄与しないDC成分が増加することが考えられた。コリメータから受光器までの光路長に右廻りと左廻りで差が生じていたためであり、測定の結果、感度低下56%が推測された。三点目に、無反射(Anti-Reflection: AR)コートを施していない光学部品からの反射光について検討した。光源のコヒーレンス長が短いので、この反射光はDCレベルを増加させ、感度低下の原因となる。測定の結果、定偏波ファイバ端およびARコートを施していないファラデー素子からの反射光が原因で感度が48%に低下することがわかった。最終的には、両者による感度の低下率が27%と見積もられ、実験結果の26%がほぼ説明された。したがって、コリメータの改善とARコートをすることで改善可能であることがわかった。

4. まとめ

本研究では、プローブ型光磁界センサの実現のために、反射型リング干渉計を採用し、以下の検討結果を得た。

- (1) プローブに対して平行および垂直な磁界を測定するために、縞状磁区構造を有する(TbY)IG結晶を用いた二種類のファラデー素子を提案した。それぞれの素子の磁化過程を評価した結果、直線性の良い磁化曲線とファラデー効果が得られた。

- (2) SLDを光源に用いることで、受光器に発生する雑音の大幅な改善が成された。
- (3) リング干渉型光磁界センサの出力は、良好な直線性を示したが、感度が計算値に対して26%に低下していた。その原因を検討した結果、コリメータの改善とARコートで解決できることを示した。

References

- 1) K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Brandle, and M. G. Brunzel: *J. Lightw. Technol.*, **25**, 3602 (2007).
- 2) N. Itoh, H. Minemoto, D. Ishiko, and S. Ishizuka: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **21**, 637 (1997) (in Japanese).
- 3) S. Wakana, T. Ohara, M. Abe, E. Yamazaki, M. Kishi, and M. Tsuchiya: *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **48**, 2611 (2000).
- 4) O. Kamada, and H. Tamura: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3628 (1999).
- 5) K. Okubo, T. Nakaya, O. Kamada, and K. Shiraishi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **30**, 402 (2006) (in Japanese).
- 6) O. Mikami: *Jpn. J. Opt.*, **19**, 143 (1990) (in Japanese).
- 7) A. Yariv: *Appl. Opt.*, **26**, 4538 (1987).
- 8) K. Ohta : *Jikikogaku no Kiso 2* (in Japanese), p. 287 (Kyoritsu Shuppan, Tokyo, 1973).
- 9) P. A. Flournoy, R. W. McClure, and G. Wyntjes: *Appl. Opt.*, **11**, 1907 (1972).

2009年11月9日受理, 2010年2月17日再受理, 2010年4月22日採録