The Magnetics Society of Japan

日本応用磁気学会誌 23, 1417-1420 (1999)

YIG単結晶を用いた光応用磁界センサの検討

Optical Magnetic Field Sensors Using YIG Single Crystals

鎌田 修・高瀬屋京子

職業能力開発大学校電子工学科，相模原市橋本台4-1-1（〒229-1196）

O.Kamada and K.Takaseya

Department of Electronics, Polytechnic University, 4-1-1 Hashimotodai, Sagamihara 229-1196

（1998年10月14日受理，　1998年12月4日採録）

A new type of magnetic field sensor based on creation of the Faraday effect by rotation magnetization of YIG single crystals is described. The influences of both the Cotton-Mouton effect and cubic anisotropies on the sensor characteristics are also discussed. The linearity error of the sensor output was very small in external magnetic fields ranging of 0.02-200 Oe. The temperature dependence of the sensor output was obtained with an accuracy of ±1 % between 20 ℃ and 120 ℃.

Key words: optical magnetic field sensors, Faraday effect, rare-earth iron garnet crystals, Cotton-Mouton effect, cubic anisotropy.

1. はじめに

ファラデー効果を利用した磁界センサは，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ことから，例えば高圧配電線用電流センサとして電力分野で実用化されている．これらのセンサは事故検出用に屋外に設置して用いられるために，ファラデー素子には，高感度で温度変化が小さいビスマス置換希土類鉄ガーネット結晶が用いられる[1]．この結晶は液相エピタキシャル法で得られ，その大きな垂直磁気異方性のために垂直磁化膜となっている．このような結晶をセンサ用ファラデー素子に用いる場合には，周期的磁区構造により入射光が回折されることや，磁壁移動が支配的な磁化過程であることに留意する必要がある[2]．我々もこの考え方に注目して，磁壁移動による磁化過程がセンサ出力の線形性へ与える影響について考察した．その結果，0.3 Oe程度の微小な磁壁抗磁力が存在するために，5 Oe以下の低磁界領域においてセンサ出力の直線性が著しく悪化することを明らかにした[3]．このような磁壁抗磁力の成因については，結晶の不完全性を初めとして多くの原因が考察されているが[4]，その低減のための解決策は明確ではない．

今回，我々はセンサ構成の観点からの解決法として，希土類鉄ガーネット結晶の回転磁化によるファラデー効果を利用する構成を提案し，その基礎特性を明らかにした．そして，提案するセンサ構成を採用すれば低磁界側での直線性が改善され，ダイナミックレンジが拡大されることが分かったので報告する．また，本構成においては，コットン－ムートン効果や回転磁化過程のセンサ出力特性への影響は小さいこと，そして感度の温度変化は，用いる永久磁石を選択することで，補償できることも併せて報告する．

2. 実験方法

2.1 センサの構成と用いる$Y_3Fe_5O_{12}$結晶の緒元

今回検討したセンサの構成をFig. 1に示す．方位角を45°に設定した偏光子と検光子の間にファラデー素子を設置した．光源には半導体レーザ（以下LD）を用いた．ファラデー素子には，正方形板状のフェリ磁性$Y_3Fe_5O_{12}$（以下YIG）結晶を用いた．まず，光の伝播方向と垂直な方向の磁界H_bを印加して単磁区化する．そして，被測定磁界であるH_aがH_bと垂直な方向に印加されると，H_aの方向に磁化（M_s）が回転し，光の伝播方向の磁化成分によってファラデー回転が生じる．このファラデー回転角は検光子で光量変化に変換され，フォトダイオード（以下PD）で光電変換される．この場合，PDでの出力信号V_sは，次式で表される．

$$V_s = \frac{1}{2}K\{1+\sin(2\theta_F L\sin\varphi)\} \qquad (1)$$

ここで，KはPDの光電変換係数，θ_FはYIGのファラデー回転能，LはYIGの結晶長である．φはH_aによりH_bの方向から磁化が回転した角度であり，H_aとH_bをベクトル合成して得られる磁界の方向と磁化の方向が一致している場合，φはH_b/H_aの逆正接で与えられる．

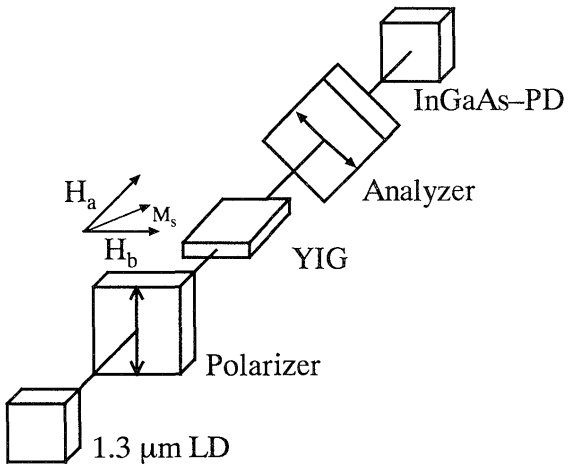

Fig. 1 Schematic diagram of a magnetic field sensor using a YIG single crystal.

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

今回の実験にファラデー素子として用いたYIG結晶は，フローティングゾーン法（以下FZ法）で得られた結晶であり，波長1.3 μmでθ_Fは216 °/cmである．また，外形は2.7 mm角で，厚みは1.05 mmである．H_a及びH_bはそれぞれ<111>方向もしくは<211>方向に印加し，磁化は（110）面内で回転するように切り出してある．

2.2 センサ特性の評価方法

センサの入出力特性の評価は，Fig.1に示したセンサ構成と同等な測定系を光学ベンチ上に構成して行った．光源には発振波長が1.3 μmのInGaAsP−LDを，受光器にはInGaAs−PDを，偏光子及び検光子にはグラントムソンプリズムを用いた．H_bを印加するために，同一形状のフェライト磁石を対向させて用い，今回は320 Oe，555 Oe及び765 Oeが得られる三種類の磁石を用意した．H_a印加用には，直流及び交流磁界を印加するために，ヘルムホルツコイルを用いた．センサとしての特性評価項目は，センサ出力の直線性，SNR（Signal-to-noise ratio）特性及びセンサ出力の温度変化である．今回のセンサは電力分野での応用を考えているので，特に直線性に関しては計器用変成器等の規格[5]にある比誤差（α）による評価を行った．比誤差とは標準入力に対する出力の誤差を百分率で示したもので，次式で表される．

$$\alpha = \frac{H_{out} - H_{in}}{H_{in}} \times 100\ \% \qquad (2)$$

ここで，H_{in}は標準入力磁界強度であり，H_{out}はセンサ出力を磁界強度に較正した値である．

3. 実験結果と考察

3.1 直線性（比誤差特性）について

Fig.2に，直流磁界に対するセンサ出力を，検光子の方位角（ϕ_a）が±45 °の場合について示す．(1)式で表される出力特性を示し，本構成による基本動作が確認できた．また，H_bを

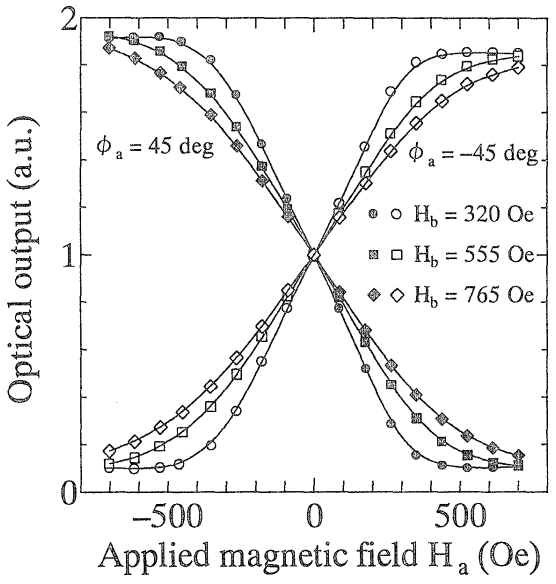

Fig. 2 Optical output intensity as a function of the applied magnetic field H_a.

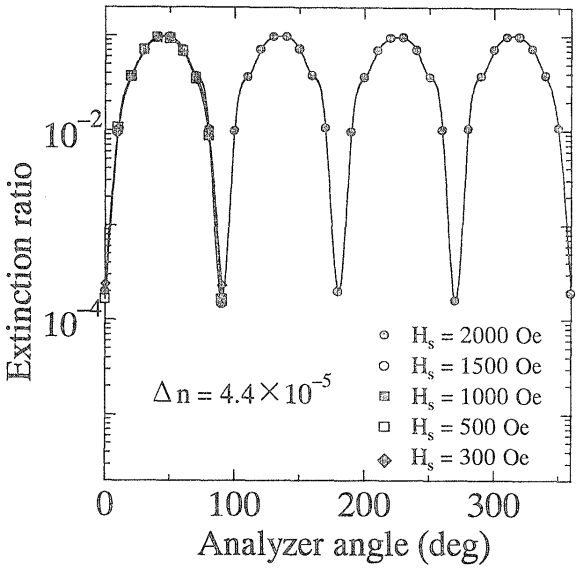

Fig. 3 Extinction ratio as a function of the azimuthal angle of the plane of linear polarization light with respect to the optical axis of the YIG crystal.

変化させることによって，感度を調整できることが分かる．しかしFig.1から分かるように，このセンサ構成においては，直線偏光を磁化に対して垂直な方向に入射することから，コットン−ムートン効果[6]の影響を考慮する必要がある．さらに，H_aとH_bを合成して得られる外部磁界だけでなく，立方晶の磁気異方性を考慮した回転磁化過程も考察する必要がある．

まず最初に，コットン−ムートン効果の影響について考察する．この効果はフォークト配置における複屈折現象であり，磁化の方向に発生する一軸異方性に起因する．したがって，屈折率楕円体の主軸は磁化に平行及び垂直な方向にある．そこで，コットン−ムートン効果による複屈折量（Δn）を求めるために，消光比の入射偏光方向（θ）依存性を測定した．結果をFig.3に示す．90 °周期で消光比が最大となるが，この最大の消光比の値からΔnが求まり，$\Delta n = 4.4\times10^{-5}$が得られた．Fig.1から分かるように，$H_b$で飽和した磁化が$H_a$で回転している状態に直線偏光が入射されるので，YIG結晶をファラデー効果とコットン−ムートン効果の両者を有する光学媒質として扱う必要がある．今回は，Taborらによる，複屈折とファラデー効果が同時に存在する媒質のジョーンズマトリックス[7]を引用して，センサ出力特性を計算した．結果をFig.4(a)に示す．図には，θが0 °，22.5 °及び45 °の場合を示した．Fig.4(b)には測定結果を示す．感度自体は余り良く一致していないが，コットン−ムートン効果による変化の様子は，良く説明されている．一点鎖線の曲線は複屈折が存在しない場合の結果であるが，この場合に比べて今回の結晶長の場合は5 %程度の感度低下が生じている．さらに，θが22.5 °の場合には，原点においてゼロ点ずれも生じている．しかしながら，低磁界領域では影響の小さい，θ=0 °又は45 °を採用すれば良いと考えられる．

次に，磁気異方性が存在する場合のセンサ出力について考察する．YIG結晶は立方晶の結晶磁気異方性を有し，室温では$K_1 = -5.5\times10^3$ erg/cc，$K_2 = -0.66\times10^3$ erg/cc程度であり[8]，磁化容易軸は<111>となる．また，FZ法によるYIG結晶の成長温度は約1500 ℃と高く，成長誘導磁気異方性は小さいと考えられるので，ここでは立方晶の結晶磁気異方性のみを考慮した．今回の構成の場合は，磁気異方性を有する磁性体に，大き

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

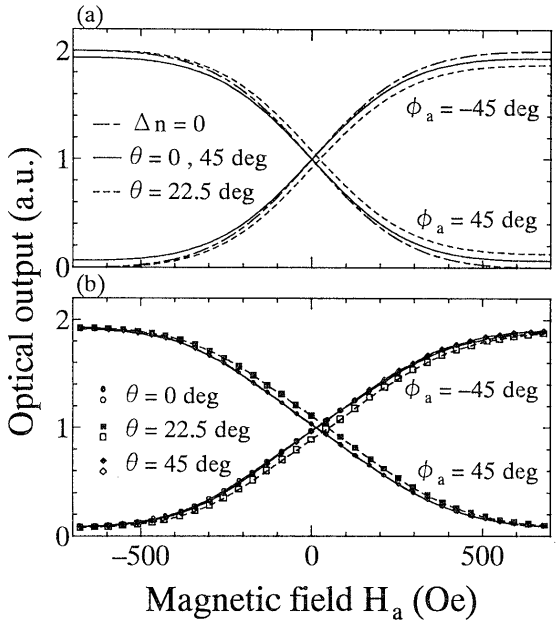

Fig. 4 Azimuthal angle dependence of the optical output characteristics: (a) calculation results and (b) experimental results.

さと方向が変化する外部磁界が印加された場合の回転磁化過程に相当すると考えられる．しかし，常に単磁区化した磁化が回転する状態であることや，試料が正方形で，H_a方向とH_b方向の反磁界係数はほぼ等しいと考えられることから，反磁界による自己エネルギーの異方性は無いと仮定した．この仮定の下で磁化の方向（φ）は，単位体積当たりの異方性エネルギーとゼーマンエネルギーを最小にする条件から求めることができる．YIG結晶の$4\pi M_s$を1700 Gとしてφを算出し，その後，(1)式によりセンサ出力を求めた．結果をFig.5(a)に示す．同図に

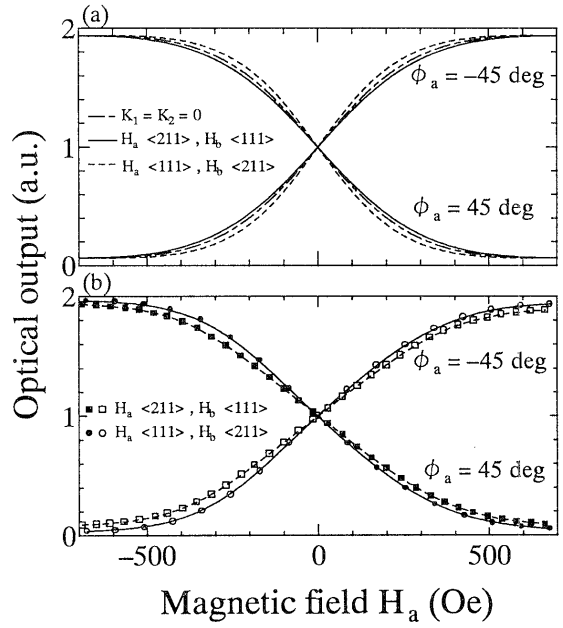

Fig. 5 Propagation direction dependence of the optical output characteristics: (a) calculation results and (b) experimental results.

はH_bを<111>方向及びH_aを<211>方向に印加した場合と，それとは逆の場合について示してある．又，Fig.5(b)には，計算時と同じ条件で測定した結果を示す．両者の傾向は良く一致しており，磁気異方性が無い場合に比較して，H_bの印加方向によって感度が少し増減することが分かる．YIG結晶の場合，その変化は±5 %程度である．以上の結果から，コットンームートン効果や磁気異方性は，センサ出力特性に対して大きな変化を与えないことが分かった．次に比誤差特性での評価を行う．Fig.6に，H_b=555 Oe，θ=0°，<111>に平行にH_bを印加した場合の，センサ出力の比誤差を示す．直流磁界印加と交流磁界印加の場合の特性を併せて示してある．約200 Oeから0.02 Oeの低磁界領域まで，比誤差特性が良好であることが分かる．図には，Bi置換希土類鉄ガーネット結晶を用いた場合の比誤差特性[3]も併せて示してある．明らかに，今回のセンサ構成を採用することにより，低磁界領域での比誤差が改善され，ダイナミックレンジが拡大されていることが分かる．

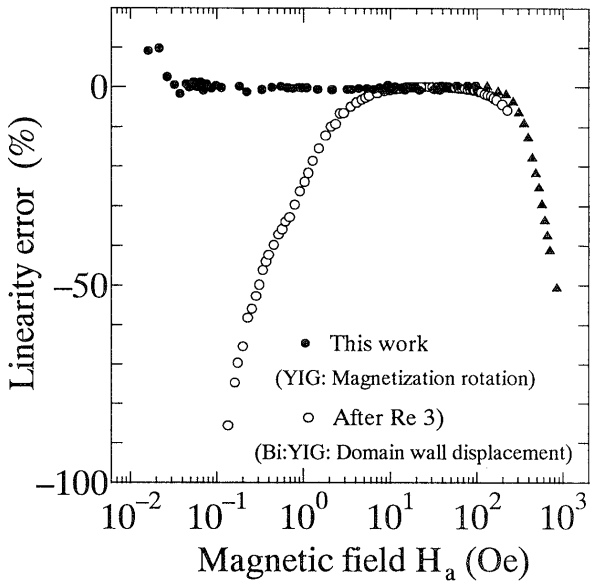

Fig. 6 Linearity error of the output signals as a function of the applied magnetic field H_a.

3.2 SNR特性

Fig.7にセンサ出力のSNR特性の測定結果を示す．(a)は，帯域ΔB=16 kHzの測定系を用いた場合であり，雑音等価磁界強度（以下NEMとする）は0.43 Oeであった．又，(b)に示すように，ΔB=0.5 Hz相当のロックインアンプを用いた場合は，0.005 OeのNEMが得られた．

3.3 感度の温度特性

(1)式に依れば，センサの感度の温度特性は，主にYIG結晶のファラデー回転能の温度変化θ_F(T)とH_bの温度変化に依存すると考えられる．Fig.8にYIG結晶のθ_F(T)の測定結果を示す．室温付近で-0.13 %/degの温度変化を有しており，感度の温度変化の原因となると考えられる．しかしながら，(1)式から分かるように，この温度変化はH_bの温度変化で補償することが可能であり，今回は市販のフェライト磁石を採用した．Fig.8に，この磁石を用いた場合のH_bの温度変化を示すが，得られた値-0.16 %/degはカタログ値とほぼ一致している．又，コットンームートン効果の温度変化も感度の温度変化に影響すると考えられるので，その温度変化の測定結果もFig.8に示す．

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

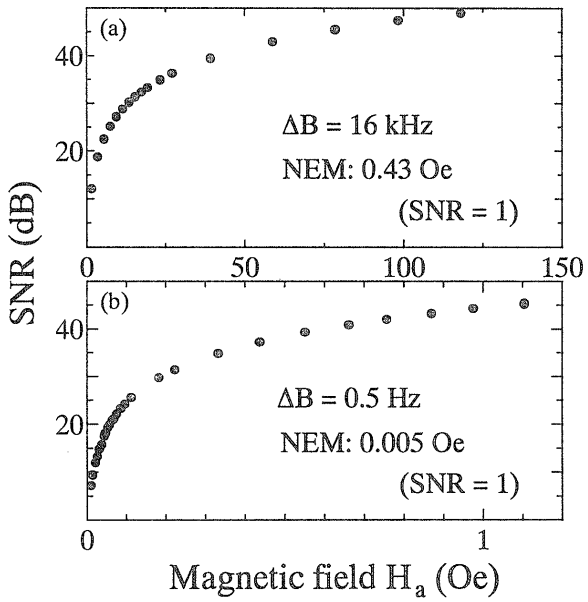

Fig. 7 Signal-to-noise ratio as a function of the applied magnetic field H_a.

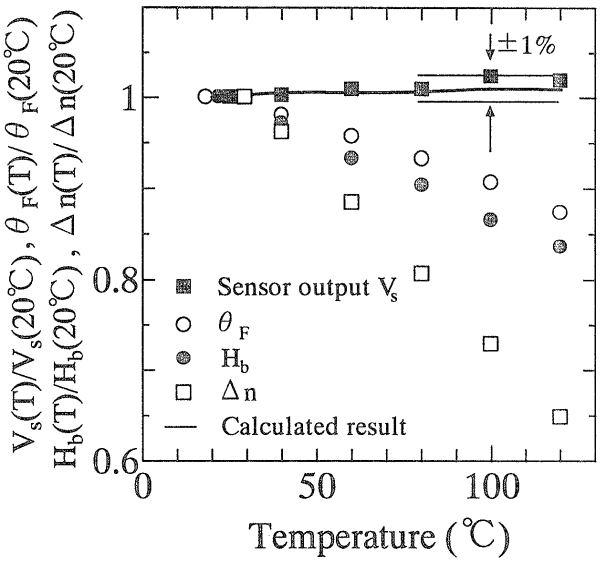

Fig. 8 Temperature dependence of the sensor output signals, θ_F, H_b, and Δn.

そして，YIG 結晶とフェライト磁石を同時に温度変化させた場合の感度の温度変化を■印で示す．±1 %以内の温度変化に収まっているのが分かる．併せて，θ_F(T)，H_b(T)，Δn(T)の測定値を用いて計算した結果を実線で示したが，測定値と良く一致していることが分かる．

4. まとめ

YIG 結晶の回転磁化によるファラデー効果を利用した磁界センサの構成を提案し，その基礎特性を明らかにした．特に，コットンームートン効果や磁気異方性の影響を明らかにした．そして，比誤差特性は，0.02 Oe の低磁界領域まで平坦で，良好な直線性を有しており，単磁区化用のフェライト磁石を選択することにより，感度の温度変化は±1 %以内に収まることが分かった．

文　献

1) S.Ishizuka, N.Itoh and H.Minemoto: Opt. Rev., 4, 45 (1997).
2) 沼田卓久，棚池博行，井口征士，桜井良文：日本応用磁気学会誌，14，642（1990）．
3) 渡村雄幸，鎌田修，伊藤伸器，峯本尚：日本応用磁気学会誌，20，165（1996）．
4) M.Pardavi-horvath and P.E.Wigen: Proc. Int. Symp. Magneto-Optics, J. Magn. Soc. Jpn. 11, (suppl. No.S1), 161 (1987).
5) 電気学会　電気規格調査会標準規格　計器用変成器 JEC-1201.
6) J.F.Dillon, J.P.Remeika and C.R.Staton: J.Appl.Phys., 41, 4613 (1970).
7) W.J.Tabor and F.S.Chen: J. Appl. Phys., 40, 2760 (1969).
8) R.F.Pearson: J. Appl. Phys., 33, 1236s (1962).

NII-Electronic Library Service