光方式電流センサ用希土類鉄ガーネット結晶

正員 和田 道夫 (関西電力) 非会員 石塚 訓 (松下電器)
 正員 不動 弘幸 (関西電力) 非会員 石河 大典 (松下電器)
 非会員 江川 進 (関西電力) 非会員 伊藤 伸器 (松下電器)

Rare-Earth Iron Garnets for Fiber Optic Current Sensors

Michio Wada, Member, Hiroyuki Fudo, Member, Susumu Egawa, Non-member (Kansai Electric Power Co., Inc.), Satoshi Ishizuka, Non-member, Daisuke Ishiko, Non-member, Nobuki Itoh, Non-member (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.)

Fiber optic current sensors with temperature-independent sensitivity have been developed. For Faraday rotators of the sensors, highly Bi-substituted rare-earth iron garnets, $\text{Bi}_x\text{Gd}_y\text{Y}_{3-(x+y)}\text{Fe}_3\text{O}_{12}$, are prepared by a liquid phase epitaxy (LPE) method. It is found that the temperature dependence of the sensitivity constants is improved by Gd substitution. The crystal with the components of $X=1.3$ and $Y=0.43$ is found to show the least temperature variation of the sensitivity constants within $\pm 0.5\%$ between 253 and 353K. The sensor modules using the crystals have good characteristics in practical use. The sensor units for monitoring the condition of power distribution lines have high environmental durability, high insulation, and no electromagnetic induction.

キーワード：光方式電流センサ，Bi置換希土類鉄ガーネット結晶，ファラデー効果，感度温度特性

1. 序 論

近年，電力会社では，高度情報化社会に対応するため，開閉器の遠隔制御を中心とした配電線自動運用システムを主軸にして，配電線総合自動化システムの研究が行われている。開閉器の高度な遠隔制御を実施するには，事故区間極小化や復旧の迅速化のための運転状態のモニタが不可欠となる。

このような背景から，ファラデー効果を利用した光方式電流センサが，高絶縁性，耐電磁誘導雑音性，電気的非接触測定が可能といった利点から，配電システムの事故検出用センサとして開発されてきた⁽¹⁾。これらの光方式電流センサは，屋外の配電線に設置して使用されることから，室温付近の温度変化に対して，常に一定の出力を与えることや耐環境性，高信頼性が望まれる。

そこで著者らは，光方式電流センサ用ファラデー素子として，材料組成を検討することにより，高感度で温度特性の優れたBi置換希土類鉄ガーネット結晶を開発した。ここでは，材料の評価結果とセンサ特性および開発したセンサユニットについて報告する。

2. 試料の準備と測定

液相エピタキシャル成長(LPE)法を用いて $[111]$ 面方位 $(\text{GdCa})_3(\text{MgZrGa})_3\text{O}_{12}$ 基板上に，Bi置換希土類鉄ガーネット結晶を成長した。基板の格子定数は， 12.497Å である。用いたフラックスは， $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 系である。得られた結晶の組成は，X線マイクロアナライザで分析した。また，結晶の膜厚は，分光器を用いて近赤外領域における干渉縞から求めた。

結晶の感度定数の測定は，223 K から 373 K の温度

範囲において、ACあるいはDC磁界に対して平行に、発光中心波長0.85 μmのLED光を透過して行った。結晶の感度定数は、印加磁界に対する正味のファラデー回転角の大きさから求められる。ここで、正味のファラデー回転角とは、光ビームの単位面積当たりのファラデー回転角の大きさである。実際には、結晶の感度定数は印加磁界に対する光信号処理回路からの出力（変調度）から決定した。材料の磁気飽和状態におけるファラデー回転角は、日本分光製磁気光学測定装置を用いて測定した。

3. 光方式電流センサの原理と構成

ファラデー効果は、媒質に磁界を印加したとき、光の偏波面が光の伝搬と共に回転する現象である。反磁性体や常磁性体に対するファラデー回転角(θ)は、次式で与えられる。

$$\theta = VHL \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、V：ベルデ定数であり媒質固有の定数、H：光の伝搬方向の磁界強度、L：ファラデー素子の光路長

図1に光方式電流センサの原理図を示す。偏光子と検光子をファラデー素子の前後に相対角45度で配置している。図のように構成したとき、センサからの出射光量は次式で表される⁽²⁾。

$$P_{out} = \alpha P_{in} (1 + \sin 2\theta) \\ \approx \alpha P_{in} (1 + 2VHL) \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで、αは比例定数であり、ファラデー回転角θが十分に小さい場合のsin θ≈θの近似を用いている。

従って、印加磁界HがH=H₀sinωtで表されるとき、上式に代入すると出射光量は次式のように表され、磁界強度に比例した光量変化が得られる。

$$P_{out} = \alpha P_{in} \{1 + 2VH_0L \sin \omega t\} \cdots \cdots \cdots (3)$$

センサを出射した光は、光ファイバで光信号処理回路へ導かれ、(3)式第1項のDC成分と第2項のAC成分を分けて割算され、変調度m(%)として回路か

らの出力を得る。

しかしながら、本研究でファラデー素子に用いた希土類鉄ガーネット結晶はフェリ磁性体であり、磁区構造として迷路状やストライプ状パターンを形成する。単磁区構造でないフェリ磁性体には上記の原理は単純にあてはめることはできない⁽³⁾。本結晶の磁区幅は10 μm程度であり、磁区構造に起因する回折効果も考慮する必要がある。従って、入射光のビーム径は磁区幅よりも十分に大きく、入射して結晶を透過した光は、すべて出射側の光ファイバに集光するようにセンサモジュール光学系を構成することが必要となる。

4. 実験結果と考察

希土類鉄ガーネット結晶は、フェリ磁性体であるから、印加磁界が弱いときには多磁区構造をとる。正味のファラデー回転角は、磁性体が磁気飽和状態（単磁区）になったときに飽和する。この単磁区状態でのファラデー回転角をファラデー回転能(θ_F)と呼ぶ。光方式電流センサには、正味のファラデー回転角が印加磁界に対して比例変化する領域を用いる。結晶の感度定数Cは温度Tの関数として次式で定義できる⁽⁴⁾。

$$C(T) = \theta_F(T) / M_s(T) \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで、M_s：飽和磁化

上式から、結晶の感度定数を大きくするためには、θ_Fが大きくM_sが小さい結晶が必要であることがわかる。更に、室温付近でθ_F(T)の温度変化とM_s(T)の温度変化の割合が等しければ、C(T)が全く温度依存性を示さないことが期待できる。

そこで、θ_F(T)を大きくするために、Y₃Fe₅O₁₂結晶のY元素にBi元素を置換し、温度特性を改善するために、更にGd元素を置換した。Gd元素を選択したのは、Bi置換量が大きいときにはGd置換によってθ_F(T)は変化しないが、M_s(T)は室温付近で大きく変化するからである。

一般に、ガーネット構造に対しては三つの副格子(4面体格子(d), 8面体格子(a), 12面体格子(c))を考えなければならない。Crossleyによれば、ファラデー回転能の温度変化は、次式で表されるとした⁽⁵⁾。

$$\theta_F(T) = AM_a(T) + DM_d(T) + CM_c(T) \cdots \cdots \cdots (5)$$

ここで、M_a, M_d, M_c：各副格子の磁化、A, D, C：磁気光学系数

(5)式をもとに計算すると、Bi元素を多量に置換したガーネット結晶の場合、C値はA, Dの値に比べてかなり小さい値となる⁽⁶⁾。従って、ファラデー効果に

図1 光方式電流センサの原理図
Fig. 1. Principle of fiber optic current sensor.

図 2 (BiGdY)IG 結晶の飽和磁化の計算結果
Fig. 2. Calculated results of $M_s(T)$ by the molecular field theory.

図 3 (BiGdY)IG 結晶の $\theta_F(T)$ の測定結果
Fig. 3. Temperature dependence of normalized Faraday rotation of (BiGdY)IG at $0.85 \mu\text{m}$.

対する Gd 置換の寄与は、Bi を多量に置換した場合は無視できると考えられる。

フェリ磁性ガーネット結晶の飽和磁化の温度依存性については、分子場理論によってよく説明されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。単位体積当たりの磁気モーメントは、次式で与えられる。

$$M_s(T) = |M_d(T) - M_a(T) + M_c(T)| \cdots (6)$$

これら二つの理論から、(4)式を用いて $C(T)$ の温度特性を計算することができる。

図 2 に分子場理論による $(\text{Bi}_x\text{Gd}_y\text{Y}_{3-(x+y)})\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ 結晶〔以下、(BiGdY)IG と略記〕の飽和磁化の温度依存性の計算結果を示す。この場合、Hansen らによって、Bi 置換による補償温度とキュリー温度の変化を考慮して導かれた $\text{Gd}_3\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ の分子場係数を用いている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。図 2 からわかるように Gd 濃度が高くなる

図 4 (BiGdY)IG 結晶の感度定数の温度依存性
Fig. 4. Temperature dependence of sensitivity constants of (BiGdY)IG.

につれて、室温付近の $M_s(T)$ の温度変化が減少することがわかる。

実際に 5 種類の組成の (BiGdY)IG を作製し、 $\theta_F(T)$ の温度依存性を測定した結果を図 3 に示す。測定結果は、300 K で規格化されている。波長 $0.85 \mu\text{m}$ で 300 K から 600 K の温度範囲で測定した。Bi 濃度はほぼ一定であり、Gd 濃度は 0~1.7 に変化している。Gd 置換によって、 $\theta_F(T)$ は室温付近では特に温度変化を示さないことがわかる。これらの結果から、5 種類の組成に対して A, D, C の係数を決定し、 $\theta_F(T)$ の計算に用いた。

更に、図 4 に 300 K で規格化された結晶の感度定数の温度依存性の測定結果を示す。測定の温度範囲は、223~373 K である。プロットした点が実測値であり、実線が M_s と θ_F の理論値を用いて (4) 式から求めた計算値である。実験結果と計算結果はよい一致を示している。結果として、 $(\text{Bi}_{1.3}\text{Gd}_{0.43}\text{Y}_{1.27})\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ の組成をもつ結晶の感度定数が、253 K から 353 K の温度範囲で最小の $\pm 0.5\%$ 以内の温度特性をもつことが明らかとなった。この組成をもつ結晶の感度定数の値は、室温で $5.0 / (0 \text{ e} \cdot \text{cm})$ であり、膜厚は $90 \mu\text{m}$ である。また、透過スペクトルから求めた波長 $0.85 \mu\text{m}$ の光に対する結晶の吸収係数は、 250 cm^{-1} であった。

5. 光方式電流センサモジュールと特性

ファラデー素子に上記の (BiGdY)IG 結晶を採用し、光方式電流センサを開発した。電流センサモジュ

図 5 モジュール内部構成

Fig. 5. Construction of current sensor modules.

図 6 室温における磁界強度と SN 比の関係
Fig. 6. Relationships between magnetic field and measured SN ratio of the sensor output.

ールの構成を図 5 に示す。センサモジュールは、結晶と偏光子、検光子からなり、二つの偏光ビームスプリッタ (PBS) の透過偏光方向は互いに 45 度傾けた光強度変調タイプの構成とした。光ファイバはコア径 80 μm のマルチモードファイバを使用し、芯線をセラミック製フェルールに挿入して、レンズ端面に接着している。コリメートレンズには、1/4 ピッチの自己集束性ロッドレンズを使用した。従って、結晶を透過する光ビーム径は約 1 mm である。ガーネット結晶は 3 mm 角に切断した後、鏡面研磨した。ミラーは立方体型の全反射ミラーを用いている。PBS とミラーは一辺 5 mm の立方体である。それぞれの部品の接着にはエポキシ系接着剤を使用し、21×29×10 mm のケースに固定した。

ファラデー素子には、温度特性の最も良い $(\text{Bi}_{1.3}\text{Gd}_{0.43}\text{Y}_{1.27})\text{FeO}_{12}$ 結晶を用いた。センサ特性として、SN 比、直線性誤差、センサ出力の温度特性を

図 7 交流磁界に対するセンサ出力の直線性誤差

Fig. 7. Linearity deviation of sensor output vs. magnetic field.

図 8 交流磁界に対するセンサ出力の温度変化
Fig. 8. Temperature variation of sensor output.

測定した。図 6 に室温における 50 Hz の AC 磁界強度と SN 比の関係を示す。最小検出感度 ($S/N=1$) は、0.04 Oe である。図 7 に AC 磁界強度に対する直線性誤差の測定結果を示す。120 Oe までの磁界強度に対して、 $\pm 0.5\%$ 以内の非線形誤差を示している。30 Oe の AC 磁界に対するセンサ出力の温度変化を図 8 に示す。実用温度域である $-20 \sim +80^\circ\text{C}$ の温度範囲において、 $\pm 0.6\%$ 以内の計測精度が得られている。センサの温度変化は、主に $(\text{BiGdY})\text{IG}$ 結晶の特性に起因していると考えられる。

6. センサユニット構成

電流センサは電線路に流れる電流によって生じる磁界を検知する。センサユニットには、電線路周辺の磁界を効率良く電流センサ部に集中するために磁界周回積分用コアを使用している。センサユニットの構造を図 9 に示す。ユニット内には電気光学結晶のポッケルス効果を応用した光方式電圧センサも内蔵している。従って、光ファイバは 4 芯ノンメタリックケーブルを使用した。ケース材料はポリエチレン樹脂であり、内部に設置した各部品を樹脂充填により固定している。

図9 センサユニットの構造
Fig. 9. Construction of current sensor units.

ケースサイズは、 $230 \times 110 \times 120 \text{ mm}$ であり、重量は約 1.7 kg である。

7. 結 論

光方式電流センサ用 Bi 置換希土類鉄ガーネット結晶(BiGdY)IG を LPE 法を用いて作製した。結晶の感度定数の測定から、 $(\text{Bi}_{1.3}\text{Gd}_{0.43}\text{Y}_{1.27})\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 結晶が 253~353 K の温度範囲において $\pm 0.5\%$ 以内の最小の温度依存性をもつことが明らかとなった。 θ_F の理論と分子場理論から求めた計算結果は、実験とよい一致を示した。この結晶を用いた光方式電流センサモジュールは感度が高く、温度に依存しない特性を有する。また、開発したセンサユニットは、配電線上に設置するには小型かつ軽量であり、降雨や積雪に対しても耐候性がよく安定な出力を与え、配電線モニタリングセンサとして実用上問題のない特性を実現した⁽¹¹⁾。

(平成 4 年 5 月 25 日受付)

文 献

- (1) K. Kurosawa: Proc. of 7th Optical Fiber Sensors Conf. TUO 3-1, p. 67 (1990)
- (2) K. Kyuma, S. Tai, M. Nunoshita, T. Takioka & Y. Ida: *IEEE J. Q. E.*, **QE-18**, 1619 (1982)
- (3) 八尾・沼田・井口: 電気学会マグネティクス研資, MAG-92-75 (平 4)
- (4) O. Kamada, H. Minemoto & S. Ishizuka: *J. Appl. Phys.*, **61**, 3268 (1987)
- (5) W. A. Crossley, R. W. Cooper, J. L. Page & R. P. van Staple: *Phys. Rev.*, **181**, 896 (1969)
- (6) O. Kamada, H. Minemoto & S. Ishizuka: Advances in Magneto-Optics, Proc. Int. Symp. Magneto-Optics, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **11**, Supplement, No. S 1, 401 (1987)
- (7) G. F. Dionne: *J. Appl. Phys.*, **41**, 4874 (1970)
- (8) C. D. Brandt & S. L. Blank: *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG-12**, 14 (1976)
- (9) P. Hansen, K. Witter & W. Tolksdorf: *Phys. Rev.*, **27**, 4375 (1983)
- (10) P. Hansen, K. Witter & W. Tolksdorf: *ibid.*, **27**, 6608 (1983)
- (11) 石河, 他: *National Tech. Rep.*, **38**, No. 2127 (平 4)

和田 道夫 (正員)

昭和 23 年 8 月 7 日生。46 年 3 月京都大学工学部電気工学科卒業。46 年 4 月関西電力(株)入社。63 年 12 月同社配電部配電計画課長。平成 3 年度大山松次郎

賞受賞。

不動 弘幸 (正員)

昭和 22 年 11 月 15 日生。41 年兵庫県立洲本実業高校電気科卒業。41 年 4 月関西電力(株)入社。現在、同社配電部配電計画課副長。平成元年度オーム技術賞

受賞。

江川 進 (非会員)

昭和 35 年 6 月 10 日生。56 年 3 月和歌山工業高等専門学校電気工学科卒業。56 年 4 月関西電力(株)入社。現在、同社配電部配電計画課。

石塚 訓 (非会員)

昭和 23 年 8 月 11 日生。46 年 3 月秋田大学電気工学科卒業。同年松下電器産業(株)入社。現在、同社ネットワーク開発推進センター主任技師。平成 3 年度大

山松次郎賞受賞。

石河 大典 (非会員)

昭和 24 年 11 月 7 日生。43 年松下電器産業(株)入社。61 年より光方式電流・電圧センサの研究開発に従事。現在、同社ネットワーク開発推進センター主任技

師。

伊藤 伸器 (非会員)

昭和 39 年 1 月 11 日生。平成元年大阪大学大学院基礎工学部修士課程修了。同年松下電器産業(株)入社。光方式電流センサ用希土類鉄ガーネット材料とセンサ

光学系の研究開発に従事。