ビスマス多量置換ガドリニウム鉄ガーネットの 結晶育成と 0.8 μm 光アイソレータへの応用

Crystal Growth of a Highly Bi-Substituted Gadolinium Iron Garnet and Its Application to an 0.8 μm Optical Isolator

玉城孝彦・対馬国郎

NHK 放送技術研究所物性素子研究部, 東京都世田谷区砧 1-10-11 (〒157)

T. Tamaki and K. Tsushima

NHK Broadcasting Sci. and Technical Res. Lab., 1-10-11, Kinuta
Setagaya-ku, Tokyo, 157

Single crystals of highly Bi-substituted gadolinium iron garnets have been grown by an improved flux method in which Bi_2O_3 is used as a flux. Faraday rotation and optical absorption are measured in the near-infrared region at room temperature. The magneto-optical figure of merit is 44 deg/dB at 0.78 μm in $\text{Gd}_{1.8}\text{Bi}_{1.2}\text{Fe}_3\text{O}_{12}$. A very compact optical isolator has been developed for 0.8 μm wavelength by using this crystal as a Faraday rotator. The optical isolator features 1.5 dB insertion loss and 32 dB backward loss at wavelength of 0.78 μm .

1. ま え が き

半導体レーザ (LD) を光源として使用している広帯域光通信システムや光磁気ディスクなどの光応用機器において, 光ファイバケーブルやコネクタ, 磁気記録媒体などからの反射光が光源の LD キャビティに戻ると, 発振モードに変化が起り, 周波数特性の劣化や雑音発生の原因になる。そのため高品位高品質の光伝送や光磁気ディスクなどからの信号を検出する光ピックアップ系においても S/N を改善するために光源への戻り光を阻止する光アイソレータが必要になってくる。光アイソレータは光を一方にだけ通す素子で, ファラデー効果の非相反性を利用したものが盛んに研究されている。光アイソレータには光の偏光面を 45 度回転させるファラデー素子が使用される。ファラデー素子として 1.15 μm 以上の波長帯では $\text{YIG}^{1)}$ や $(\text{GdBi})_3\text{Fe}_3\text{O}_{12}^{2)}$ (GdBilG と略記) を使用したものが 0.8 μm 帯の短波長域では主にファラデーガラス³⁾ が使用されている。しかし, これらを機器に組み込んだり, 半導体レーザの発振モードの安定化を図るために恒温槽を使い温度を一定にコントロールして使用することがあるため, 小型高性能化が望まれている。小型高性能にするための方策としてファラデー回転係数が大きくかつ吸収損失は少ない, すなわち光学的性能指数が良く, さらに弱い磁場でファラデー回転角が飽和するような特性を示す素子をめざした研究が盛ん

に行われている。

磁性ガーネット結晶中の希土類の位置をビスマスで置換するとファラデー回転係数は著しく増加するが, 近赤外域における吸収係数はあまり増加しないために性能指数が向上する⁴⁾。しかしビスマスを多量置換した良質の単結晶の育成は非常に困難であった。我々は改良したフラックス法で, 良質でかつビスマスを多量置換した単結晶を育成し, それを使用した 1.15 μm の波長用の光アイソレータの試作結果について報告した²⁾。本論文では改良したフラックス法による GdBilG 単結晶の育成結果と, 磁気光学的特性, 育成した単結晶をファラデー素子として使用して試作した 0.8 μm 用の光アイソレータについて報告する。

2. 実験および実験結果

2.1 $\text{Gd}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ 単結晶の育成

GdBilG 単結晶の育成は, 主に Bi_2O_3 をフラックスとして普通のフラックス法と徐冷途中融液を攪拌し適当な温度で成長した単結晶をすくい上げるフラックス法 (以下この方法を攪拌すくい上げフラックス法と略記する) で原料の混合比や最高温度, 徐冷速度などの育成条件を変えて行った。最高温度は $1290 \pm 30^\circ\text{C}$ の範囲で数時間から数日間一定温度に保持した後に $0.5 \sim 10^\circ\text{C/h}$ の徐冷速度で $880 \pm 130^\circ\text{C}$ まで徐冷して実験を行った。

成長した単結晶の結晶構造は X 線ディフラクトメータ

Fig. 1 Composition diagram for Gd_2O_3 - Fe_2O_3 - Bi_2O_3 .

を使用してその回折角から面間隔 d を求め ASTM のデータと比較して決めた。

Fig. 1 には Gd_2O_3 と Fe_2O_3 , Bi_2O_3 の仕込み量 (mol% で表示) を変えたときに成長する単結晶を示す。2~3 mm 角以上の GdBiIG 単結晶が成長する範囲はほぼ Gd_2O_3 が 8 mol% 以下で Fe_2O_3 は 30~53 mol%, Bi_2O_3 は 40~60 mol% であった²⁾。この組成より Bi_2O_3 を多くしていくと GdFeO_3 単結晶が多くなりその大きさも大きくなる。さらに多くすると GdFeO_3 だけが成長するようになる。逆に Bi_2O_3 を減らして Fe_2O_3 を多くする α - Fe_2O_3 や BiFeO_3 単結晶がそれぞれ GdBiIG と共存して成長としようになる。普通のフラックス法で単結晶を育成すると、つぼの上部には GdBiIG 単結晶が底の方にはその他の単結晶が成長することが多い。3 種類の違う単結晶が同一のつぼ内に成長することもある。育成した単結晶中の Bi 置換量 x は、焼結体から求められた格子定数の x 依存 $a(x) \approx 0.05x + 12.475$ ²⁾ から決めた。 GdBiIG 中の Bi 置換量はすくい上げ温度が低くなるに従って増加し 925°C で $x=1.6$ 程度のものが得られた。

2.2 GdBiIG の磁気光学的特性

厚さ d の試料に I_0 の光が入射して透過光強度が I になったとすると吸収係数 α は一般に次式で表される。

$$\alpha = \frac{1}{d} \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

一方、吸収損失を L とすると

$$Ld = 10 \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (2)$$

Fig. 2 Faraday rotation and optical absorption coefficient of GdBiIG .

と書けるので、損失は (1) 式から $L = 4.34 \cdot \alpha [\text{dB/cm}]$ として求められる。また、性能指数 F はファラデー回転角を θ_F とすると

$$F = \frac{\theta_F}{L} \quad (3)$$

で表される。

本論文では吸収係数は $[\text{cm}^{-1}]$ で性能指数は $[\text{deg/dB}]$ で表示した。

ファラデー回転角の波長依存性と吸収スペクトルは磁気旋光分散計と赤外分光器、ケリー分光器をそれぞれ使用した。光アイソレータ用のファラデー素子の特性は半導体レーザを光源として検光子を回転する方式のファラデー回転測定装置を使用して測定した。

Fig. 2 に $x=1.2$ の試料の吸収スペクトルと $x=1.2$ と 0.95 の試料のファラデー回転角 θ_F の波長依存性を示す。 θ_F の測定は $\pm 5 \text{ kOe}$ の磁場を印加し、十分に磁化が飽和した状態で行った。 θ_F はログプロットしてあり波長が長くなるに従って直線的に減少するが 0.95 と $1.6 \mu\text{m}$ の波長で勾配が変化し、長波長側では緩やかに減少する。 $0.9 \mu\text{m}$ における変化は鉄の結晶場遷移による吸収位置とほぼ一致していてこの吸収もファラデー回転に寄与しているものと考えられる。半導体レーザの発振波長 $0.78 \mu\text{m}$ における $x=1.2$ の試料のファラデー回転角 θ_F は $-11,000 (\text{deg/cm})$ で吸収係数は 73 cm^{-1} 程度である。これを光アイソレータ用のファラデー素子として使用すると $0.78 \mu\text{m}$ の波長で $41 \mu\text{m}$ の厚さになる。この厚さは従来の光アイソレータのファラデーガラスの $1/1200$ 程度になる。

Fig. 3 は育成条件を変えたいくつかの代表的な試料の性能指数の波長依存性を示す。図中、曲線 (a) は攪拌すくい上げ法で育成した結晶、(b) はすくい上げのみ

Fig. 3. Figure of merit of GdBilG grown by the improved method (a) and (b), and a conventional flux method (c).

をして取り出した結晶、(c)は普通のフラックス法で育成した結晶の性能指数の波長変化である。これらの単結晶の磁区を偏光顕微鏡で観察したが、フラックス法で育成した結晶には微細なクラックが多く、かつ一様性が悪かった。このような結晶性の悪さが吸収損失増加の原因になり性能指数が劣化したと考えられる。

なお、攪拌すくい上げ法で育成した結晶を $0.78 \mu\text{m}$ 用のファラデー素子に加工し、無反射コートをした結果、性能指数が約 44 (deg/dB) に達するものがあつた。この値も Fig. 3 にプロットした。

また、参考のために YIG の性能指数の波長依存性⁵⁾も示した。YIG の $0.8 \mu\text{m}$ における性能指数は 1.5 (deg/dB) 程度であるので、これでファラデー素子を作ると挿入損失は 30 dB にもなるが良質の GdBilG の場合、損失は約 1 dB と非常に低損失になる。

3. GdBilG を使用した $0.8 \mu\text{m}$ 用光アイソレータ

Fig. 4 に偏光顕微鏡を使用して観測した GdBilG ファラデー素子の磁区パターンを示す。磁場を印加してないときは (a) 図に示すようにストライプ状の磁区が観測されるが、1 kOe 以上の磁場を加印すると (b) 図に示すように飽和して単磁区になる。ここで磁場印加用の磁石として試作した光アイソレータに用いたリング状のサマリウムコバルト系磁石 (中心の磁場の強さ 1.5 kOe) を使用した。

Fig. 5 (a), (b) に $0.8 \mu\text{m}$ 用の光アイソレータの基本

Fig. 4 Domain patterns of GdBilG Faraday rotator. (a): $H=0$, (b): $H=1.5 \text{ kOe}$

(a)

(b)

Fig. 5 Schematic diagram of an optical isolator (a), and an external view of the optical isolator (b).

構成図とその外観写真を示す。偏光子と検光子には無反射コートをした方解石製のロジヨンプリズムや偏光ビームスプリッターを使用した。ケース寸法は約 $7 \times 7 \times 6 \text{ mm}$ で全重量は 1.6 グラムである。使用可能なビーム径は $1.5 \text{ mm}\phi$ である。順方向損失 (挿入損失) と逆方向損失は半導体レーザとパワーメータを使用し、アイソレータの順方向と逆方向から光を入射して測定した。その際に光アイソレータの偏光子の偏光方向が平行になるように合わせた。数個の光アイソレータを試作し特性を測定した結果挿入損失は 1.5~2.5 dB で逆方向損失は約 32 dB あつた。Table 1 には試作した光アイソレータの特性を示した。この光アイソレータにはファラデー回転係数の大きい GdBilG を使用したので従来のファ

Table 1 Characteristics of an optical isolator using a GdBiIG single crystal

Terms	
Faraday material	GdBiIG single crystal
Magnetic saturation field	1 kOe
Max. beam diameter	1.5 mm ϕ
Dimensions	$\sim 7\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 6\text{ mm}$
Center wavelength	0.78 μm
Insertion loss	1.5 dB
Backward loss	32 dB

Fig. 6 Isolation test signals of the isolator. Transmitted signals of normal direction (a), backward direction (b), and a modulation signal (c).

ラデーガラスを使用したものの 1/65 程度の体積まで小型化することができた。

Fig. 6 は正弦波信号で強度変調した 0.83 μm 用の半導体レーザの光をアイソレータの順方向と逆方向から入射して透過光信号をフォトダイオードで検出してオシロスコープに出力した波形である。順方向に進む光は通すが逆方向の光はほとんど通さないことがわかる。また、放送衛星からの TV 電波を受信し、その第 1 中間周波数 (1.3 GHz) で半導体レーザを変調し光信号に変換し光ファイバーで伝送する実験と高品位テレビ信号伝送実験に、試作した小型光アイソレータを使用して良好な結果を得た⁶⁾。この光アイソレータは非常に小型であるので

半導体レーザの発振光を 1 個のセルフロックレンズを使用することによりファイバーに効率良く結合することができる。

4. 結 論

Gd₂O₃ と Bi₂O₃, Fe₂O₃ の組成比を変えて GdBiIG 単結晶の成長する条件を決め、融液を攪拌し適当な温度で単結晶をすくい上げる改良したフラックス法で良質の単結晶を育成した。

Gd_{1.8}Bi_{1.2}Fe₃O₁₂ 単結晶の磁気光学測定を行った結果、0.78 μm の波長におけるファラデー回転角度は -11,000 (deg/cm) で性能指数は 44 (deg/dB) と非常に高性能だった。

ビスマス置換量 $x \approx 1.2$ の単結晶をファラデー素子としてケース寸法約 7×7×6 mm, 重量 1.6 グラムの非常に小型の光アイソレータを試作した。これは従来のファラデーガラスを使用した光アイソレータの 1/65 程度の体積である。挿入損失は約 1.5 dB, で、逆方向損失は 32 dB 程度であった。試作した光アイソレータを高品位テレビ信号を伝送する実験に使用して良好な結果を得た。

謝辞 この研究で信光社の鈴木, コパル電子の沼尻, 東京電機大学の鈴木, 東京理科大学の原の各氏にお世話になったのでお礼を申し上げます。

文 献

- 1) A. Shibukawa, A. Katsui, H. Iwamura, and S. Hayashi: *Electron. Lett.*, **13**, 721 (1977).
- 2) 玉城孝彦, 対馬国郎: 日本応用磁気学会誌, **8**, 125 (1984).
- 3) 関雅文, 小林功郎, 植木敦史: 信学技報 OQE 78-133, 25 (1978)
- 4) H. Takeuchi, S. Ito, I. Mikami, and S. Taniguchi: *J. Appl. Phys.*, **44**, 4789 (1973).
- 5) J. F. Dillon, Jr.: *J. Appl. Phys.*, **39**, 922 (1968).
- 6) 小山田公之, 千葉孝雄, 玉城孝彦, 対馬国郎: 信学光電波部門全大予稿集 2-75 (1984).

1984 年 12 月 27 日受理, 1985 年 2 月 19 日採録