

# ファラデー効果を示す $Tb_3Al_5O_{12}$ 単結晶育成と光特性評価

株式会社 村田製作所

藤井 高志・下方 幹生

## Crystal growth and optical properties of $Tb_3Al_5O_{12}$ with Faraday-effect

Takashi Fujii, Mikio Geho

Murata Manufacturing Co., Ltd.

### Abstract

我々は分解溶融型化合物である  $Tb_3Al_5O_{12}$  単結晶を独自に開発したレーザ FZ 法を用い、 $Tb_3Al_5O_{12}$  組成の原料を直接溶融・凝固して育成することに世界で初めて成功した。 $Tb_3Al_5O_{12}$  単結晶は可視光域で透明であり、かつ大きなファラデー効果を有することは知られていたが、これまでは光デバイスに適用できる大きさの単結晶は得られていなかった。我々の育成した結晶は直径 3 mm、長さ 40 mm の円柱状であり、光デバイスとして十分に使用可能な大きさである。本稿では、 $Tb_3Al_5O_{12}$  単結晶の育成とこの単結晶を利用した光デバイスについて紹介する。

### 1. はじめに

$Tb_3Al_5O_{12}$  (Terbium Aluminum Garnet : 以下 TAG と略称する) 単結晶はガーネット構造で立方晶系に属している。結晶構造としては、光通信システムに用いられている赤外波長帯アイソレータの材料である  $Y_3Fe_5O_{12}$  (Yttrium Iron Garnet : 以下 YIG と略称する) と同じで、光学的に等方性である。しかし、図 1 の状態図<sup>1)</sup>に示すように、TAG も YIG と同様に分解溶融型化合物であるために、単結晶育成はこれまでフラックス法で行われていた。そして、TAG 単結晶は可視光域で透明であり、かつ大きなファラデー効果を有していることが報告されている<sup>2)</sup>。しかしながら、光学用途に用いる

ためには光軸方向に少なくとも 10 mm 程度の結晶長が必要であるが、結晶の大型化が困難で光デバイスに利用可能な大きさの単結晶は得られていなかった。

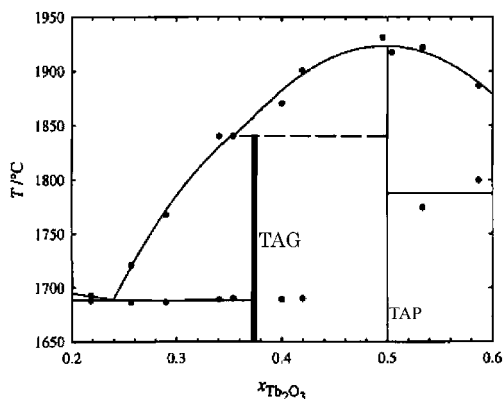


図 1  $(1-x)Al_2O_3-xTb_2O_3$  系状態図

〒617-8555 京都府長岡京市天神 2 丁目 26 番 10 号  
 TEL 077-586-8769  
 FAX 077-587-1923  
 E-mail: fujii@murata.co.jp

我々は、これまでレーザを用いた Floating Zone 法（以下レーザ FZ 法と略称する）により、YIG 原料を直接熔融・凝固して単結晶を得ることに成功している<sup>3)</sup>。今回、この手法を発展させて、光学材料として使用可能な大きさの TAG 単結晶を育成することに成功した<sup>4)</sup>。得られた TAG 単結晶の透過率、ファラデー効果等の光学特性はこれまでの報告と一致し、特にヴェルデ定数は、現状の可視光帯のファラデー材料として使用されている  $Tb_3Ga_5O_{12}$  (Terbium Gallium Garnet : 以下 TGG と略称する) 単結晶の約 1.3 倍の値を示した。

TAG 単結晶は、可視光から近赤外域での光吸収がほとんどなく、高融点材料のため耐熱性が高く、さらに、育成プロセスにおいても、育成結晶中の成分においても環境負荷物質をまったく使用していないなど、優れた特徴を持っている。これらの特徴から、高出力レーザである 808 nm 用偏波依存型光アイソレータと、現在、精力的に開発の進められている青色レーザを用いた光記録用 408 nm 用 45 度偏波光ローテータを試作し、特性を評価した。今回は TAG 単結晶育成と、この単結晶を用いて試作したアイソレータおよびローテータについて報告する。

## 2. 単結晶育成

単結晶育成は、図 2 に示すように FZ 装置に高出力レーザを装着した育成炉を新たに開発した。赤外線ランプをアフターヒータとして用い、レーザにより狭い熔融帯域幅を保持させて育成する。育成に用いたレーザ光源としては、波長 1064 nm の YAG レーザでは TAG 単結晶は光をまったく吸収しないため、波長 10600 nm の炭酸ガスレーザを使用した。TAG 単結晶育成の出発原料には、3N の  $Tb_4O_7$  と 4N の  $Al_2O_3$  を化学量論組成に調合し、混合してロッド状に成型後仮焼したものを用いた。結晶育成にはシード結晶は使用せず、上下 2 本の原料ロッドを同軸状に装着し、レーザで熔融した

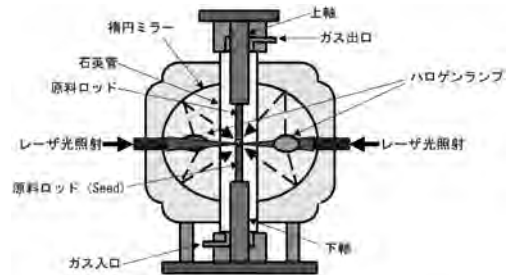


図 2 レーザ FZ 法による育成装置の概略図



図 3 レーザ FZ 法で育成した TAG 単結晶の例

後、接触させて単結晶を育成した。このようにして得られた単結晶を図 3 に示す。現在得られている大きさは直径 3 mm、長さ 40 mm であるが、育成装置の大型化によりさらに大口径、長尺化は可能である。

図 1 の状態図からわかるとおり、TAG 原料を直接熔融し凝固させると、はじめに  $TbAlO_3$  (Terbium Aluminum Perovskite : 以下 TAP と略称する) が析出し、TAG 単結晶は得られない。しかし、この TAP の析出により、育成熔融液組成が自己調整されて Al リッチとなり、その結果 TAG 単結晶が育成できるものと推定している。このことから、レーザ FZ 法を用いた TAG 単結晶育成は見かけ上は熔融・凝固により育成されているが、育成の機構としては溶液成長であると考えている。そのため、融液が凝固した時に初相として析出する TAP をいかに排除するかがこの育成のポイントとなる。レーザ FZ 法は、固液界面の温度勾配を非常に急峻

にできるために、析出した TAP を効率的に排除し TAG 単結晶の育成が可能となっていると考えている。

### 3. TAG 単結晶の光学特性

育成した TAG 単結晶を育成軸に垂直に切断し、長さ 3 mm のロッド状にした後、透過率を測定した。この透過率の波長依存性を図 4 に示す。この測定においては反射防止膜をつけていない。483 nm にある  $Tb^{3+}$  イオンの 4f 電子の内核遷移に由来するすどい吸収を除き、400 nm から 1500 nm の範囲で高い透過率を示している。TAG 単結晶の屈折率はプリズムカプラの測定から 633 nm で 1.8615 である。この屈折率から理論的に算出される界面反射の影響を考慮すると吸収係数は非常に小さいことが推定できる。図 5 に育成された TAG 単結晶の 408 nm と 633 nm におけるファラデー回転角の外部磁界依存性を示す。この直線の傾きが、ファラデー効果の性能指数であるヴェルデ定数である。表 1 に代表的な波長でのヴェルデ定数の値を示す。参考として TGG 単結晶の 633 nm におけるヴェルデ定数の値を示す。このように、TAG 単結晶は TGG 単結晶と比較して大きなファラデー効果を示すことがわかる。ヴェルデ定数は光の波長が短くなると大きくなっていく。このことから、短波長、特に青紫の領域での光特性に優位点があると考えている。さらに、屈折率が約 1.86 のため、反射防止膜としては、 $MgF_2$  の単層膜で十分な反射防止効果が得られることも、光デバイスに適用する上では重要なポイントである。

### 4. 光デバイスの試作と評価

レーザー FZ 法で育成された TAG 単結晶を用いて、808 nm 用偏波依存型光アイソレータと 408 nm 用 45 度偏波光ローテータを試作し特性を評価した<sup>5)</sup>。808 nm 用偏波依存型光アイ

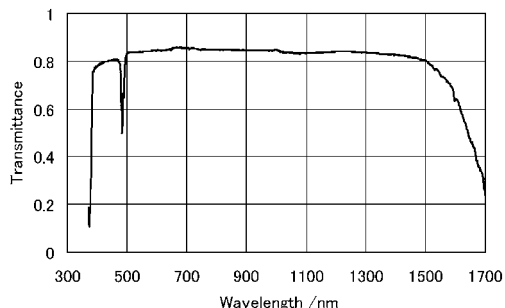


図 4 TAG 単結晶の透過率の波長依存性

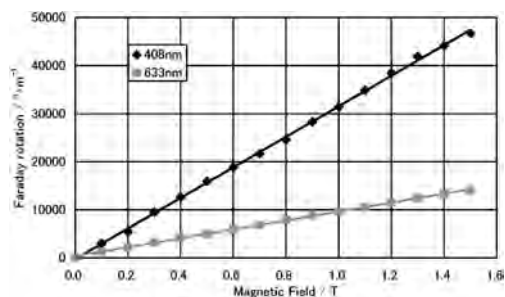


図 5 ファラデー回転能の外部磁界依存性

表 1 TAG 単結晶のヴェルデ定数

波長 / nm	ヴェルデ定数 / $^{\circ} \cdot T^{-1} \cdot m^{-1}$
408	$3.2 \times 10^3$
633	$9.2 \times 10^2$
808	$5.4 \times 10^2$
1064	$3.0 \times 10^2$
参考: TGG (633)	$7.5 \times 10^1$

ソレータは YAG レーザの  $Nd^{3+}$  イオンの励起光源である高出力 808 nm 半導体レーザーの戻り光防止を目的としたものである。一方、408 nm 用 45 度偏波光ローテータは、現在活発に開発が進められている青紫色レーザーを用いた次世代 DVD の光学系を念頭において試作したものである。光アイソレータの基本的な構成の概念図を図 6 に示す。図 6 のなかで偏光子と検光子を取り除いたものが光ローテータである。図 7 に 808 nm 用偏波依存型光アイソレータ、図 8 に 408 nm 用 45 度偏波ローテータの試作品を示す。磁石にはネオジウム-鉄-ボロン系の

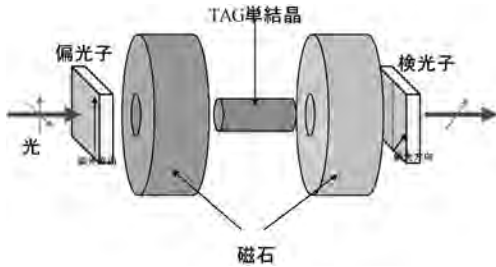


図6 808 nm 用偏波依存型アイソレータ構成図

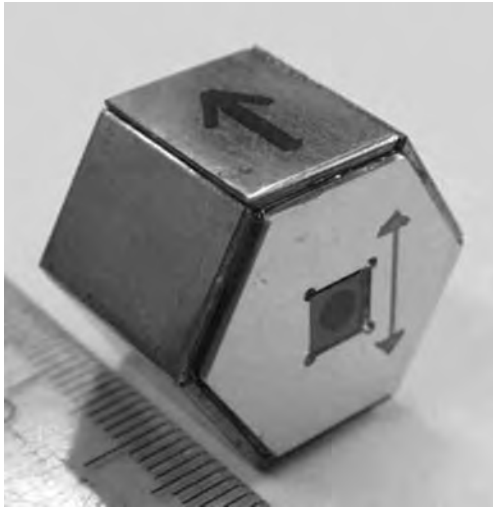


図7 808 nm 用偏波依存型光アイソレータ試作品の外観

永久磁石を用い、TAG単結晶への印加磁界を最適化するために、磁石形状は六角形としている。そのために、デバイス形状としては両者とも六角柱形状である。

808 nm 用偏波依存型光アイソレータの偏光子と検光子には Ag 粒子を拡散したガラス偏光板を用いている。この光アイソレータの光学有効径は 2.5 mm、デバイスの大きさは六角形の対角長 24 mm (対辺長 21 mm)、全長は 20 mm と従来にない小型化が達成できている。デバイス特性としては、挿入損失が 0.74 dB、アイソレーション比が 22.4 dB であった。また、408 nm 用 45 度偏波光ローテータは光学有効径が

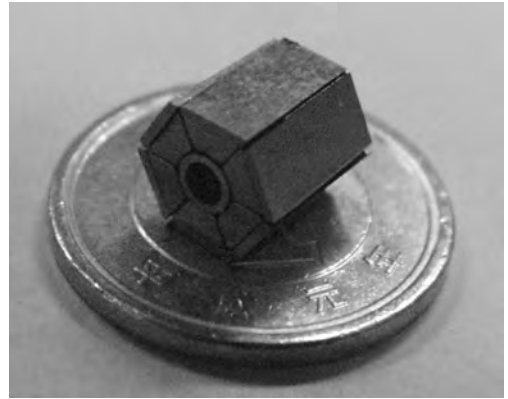


図8 408 nm 用 45 度偏波光ローテータ試作品の外観

2.0 mm で、デバイスの大きさは六角形の対角長 8.0 mm (対辺長 7.0 mm)、全長は 7.0 mm である。このローテータの特性としては、挿入損失が反射防止膜をつけていない状態で 1.5 dB、光偏波に対して光軸が 90°回転した場合の消光比が 22.0 dB であった。808 nm 用偏波依存型光アイソレータと 408 nm 用 45 度偏波光ローテータとも挿入損失、アイソレーション比、消光比などの特性としては十分に実用に耐えうるものと考えている。

このように、TAG単結晶を用いることにより、可視光、近赤外での光アイソレータの小型化が実現できることを示した。また、新しい用途として、今後の発展が期待される青紫レーザーを用いた光記録の光学系にも適用できる可能性を示すことができた。

## 5. まとめ

今回紹介した TAG 単結晶は、可視光から近赤外光の波長域において透明で、かつ大きなファラデー効果を示す材料である。そして、この単結晶を用いた光アイソレータ・光ローテータは、従来にない小型化を達成できることを示した。これまで、この波長帯域では、いわゆる民生品に搭載できるような小型の光アイソレー

タが存在していなかった。TAG 単結晶は、今後開拓が進むと思われる可視光域から近紫外域でのレーザの高出力化に対して、その戻り光を防止するために重要な材料であることを示すことができ、今後広く適用されることを期待している。現在は、結晶の直径は 3 mm であるが、単結晶のより大口径化、長尺化を検討している。併せて、TAG 単結晶を用いた新しい用途への展開も検討している。

#### 参考文献

- 1) S. Ganschow et al., Crystal Research Technologies 34 (1999) 615.
- 2) C. B. Rubinstein et al., J. Appl. Phys., 35 (1964) 3069.
- 3) T. Sekijima et al., J. Crystal Growth 193 (1998) 446.
- 4) 下方他, 第 64 回応用物理学会学術講演会 (2003 年秋季) 30a-P1-16 講演予稿集 p. 240.
- 5) 下方他, 第 64 回応用物理学会学術講演会 (2003 年秋季) 31p-W-2 講演予稿集 p. 881.