

光アイソレータ用単結晶

独立行政法人物質・材料研究機構 ガルシア・ビジョラ¹・島村 清史²
環境・エネルギー研究所 畑中 翼³・船木 秋晴³・直江 邦浩⁴

Single Crystal for Optical Isolator

E. G. Villora, K. Shimamura, T. Hatanaka, A. Funaki, and K. Naoe

現在、レーザー加工機に使用される波長 $1 \mu\text{m}$ 帯において、光アイソレータ用ファラデー回転子には $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (TGG) 単結晶が使用されている。しかし、ファラデー回転角不足、結晶育成が比較的困難、さらに非常に高価などの問題点も指摘されており、それらの問題を解決すべく、 $\text{Tb}_3(\text{Sc,Lu})_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ (TSLAG) 単結晶に注目し結晶の育成・評価を行った。本論文では、TSLAG は結晶育成が容易であり、透過率、ファラデー回転角、消光比といった光アイソレータ用ファラデー回転子として重要な特性が全て TGG と同等以上であることが確認された。

Currently, $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (TGG) single crystal is used as Faraday rotator in the laser machinery the wavelength of which is $<1100 \text{ nm}$. However, TGG has problems of not enough Faraday rotation angle, difficult crystal growth, very high price, and so on.

In order to overcome these problems, we focused on $\text{Tb}_3(\text{Sc,Lu})_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ (TSLAG) single crystal and developed and characterized TSLAG crystals. In this paper, we report that TSLAG can be grown easily and has higher transparency, bigger Faraday rotation angle, and extinction ratio, which are very important properties for Faraday rotator.

1. ま え が き

近年、光ファイバケーブルを用いた光通信や精密加工用レーザー加工機の普及に伴い、光源となる各種レーザーは今後ますます高出力化していくといわれており、光源の安定化と破壊防止への対応が必要とされている。光アイソレータは光源の安定化と破壊防止をになう重要なデバイスであり、従来は鉄系磁性ガーネット薄膜単結晶が主として用いられてきたが、光源の高出力化に伴う薄膜単結晶の劣化、光を透過する波長域が狭いため使用できる波長領域が限定されるといった点などが問題となってきた。特にファイバレーザーなどのレーザー加工機に使用される波長 $1 \mu\text{m}$ 帯において、鉄系磁性ガーネット薄膜単結晶の透過性は十分でなく、光アイソレータとして利用可能な波長域の拡大が必要とされてきている。

そのような背景の中、可視から近赤外まで適度な透過率とファラデー回転角を有する $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (TGG) 単結晶が波長 $1 \mu\text{m}$ 帯において使用されているが^{1),2)}、ファ

ラデー回転角不足、酸化ガリウムの蒸発などにより結晶育成が比較的困難³⁾、非常に高価などの問題点も指摘されており、代替品がないために仕方なく使用している側面がある。

また、 $\text{Tb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (TAG) はファラデー回転角も大きく、透過率も申し分ないが⁴⁾、インコングレント組成のため⁵⁾、大型の結晶を得ることが困難という大きな問題を抱えている。そこでこれらの問題を解決すべく、本研究では高特性である TAG を出発材料としてカチオンのイオン半径に注目して組成を変え、 $\text{Tb}_3\text{Sc}_{2-x}\text{Lu}_x\text{Al}_3\text{O}_{12}$ (TSLAG) 単結晶の育成・評価を行った。

2. ガーネット構造におけるカチオンのイオン半径

一般的にガーネット構造は $\{\text{C}_3\} [\text{A}_2] (\text{D}_3) \text{O}_{12}$ の組成式で表され、 $\{\text{C}\}$ は 8 配位、 $[\text{A}]$ は 6 配位、 (D) は 4 配位を表している。また、ガーネット構造を模式的に表すと図 1 のようになる。

TAG の各カチオンのイオン半径を表 1 に示す。ここで、イオン半径は Shannon の有効イオン半径のことを指している⁶⁾。表 1 より、 $[\text{A}]$ サイトの Al のイオン半径が 0.535 \AA なのに対し、 $\{\text{C}\}$ サイトの Tb のイオン半径は 1.04 \AA と一気に 2 倍程度になってしまっているこ

1 光材料センター 光周波数変換グループ主任研究員 (理学博士)

2 光材料センター 光周波数変換グループグループリーダー (理学博士)

3 先進技術研究室

4 先進技術研究室室長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語

ファラデー回転

正式表記

説明

ある偏光面を持った光が磁場中の物体を通過する際に、偏光面が回転すること

消光比

結晶のひずみを評価するパラメータのひとつ。値が大きいかほどひずみが小さく、光アイソレータ用結晶として優れている。

インコングルエント組成

ある組成の融液から温度を下げていくと異なる組成の固体が晶出してしまう組成のこと

カチオン

プラスの電荷を帯びたイオンのこと

CZ法

チョクラルスキー法

融液からの単結晶育成方法のひとつ。引上げ法とも呼ばれ、大型結晶を育成することができる。

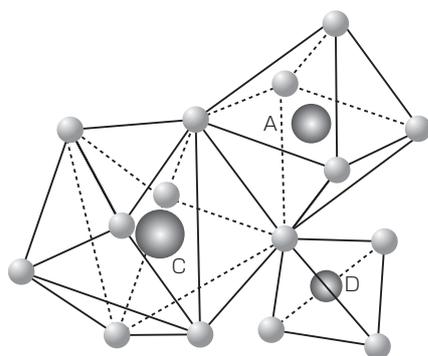


図1 ガーネット構造の模式図

Fig. 1. Schematic of garnet structure.

表1 TAGの各カチオンのイオン半径
Table 1. Ionic radii of cations of TAG.

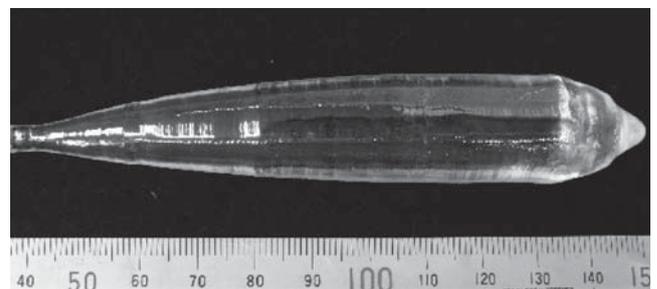
[Tb ₃] [Al ₂] (Al ₃) O ₁₂ (TAG)	元素	イオン半径 (Å)
(D) サイト (4 配位)	Al	0.39
[A] サイト (6 配位)	Al	0.535
{C} サイト (8 配位)	Tb	1.04

表2 TSLAGの各カチオンのイオン半径
Table 2. Ionic radii of cations of TSLAG.

[Tb ₃] [Sc _{2-x} Lu _x] (Al ₃) O ₁₂ (TSLAG)	元素	イオン半径 (Å)
(D) サイト (4 配位)	Al	0.39
[A] サイト (6 配位)	Sc	0.745
[A] サイト (6 配位)	Lu	0.861
{C} サイト (8 配位)	Tb	1.04

とがわかる。このイオン半径のアンバランスさによりTAGは安定したガーネット構造を保つことができなくなっていると考えられる。

そこで本研究では、TAGの[A]サイトのAlをScとLuで置換したTb₃Sc_{2-x}Lu_xAl₃O₁₂(TSLAG)を考案した。表2にTSLAGの各カチオンのイオン半径を示す。これ

図2 TSLAG単結晶 (x = 0.05)
Fig. 2. TSLAG single crystal (x = 0.05).

らより、TSLAGのイオン半径バランスはTAGより改善されていることがわかる。

3. 実験方法

Tb₄O₇, Sc₂O₃, Al₂O₃, Lu₂O₃の粉末試料(全て純度は99.99%)を原料としてTb₃Sc_{2-x}Lu_xAl₃O₁₂(0.05 ≤ x ≤ 0.2)の組成となるよう秤量した後、Irるつぽに入れてチョクラルスキー(CZ)法により単結晶を育成した。育成は大気圧N₂雰囲気中において、引上げ速度を1.0 mm/h、種結晶の回転速度を10 rpmとして行った。種結晶には<111>方向に切り出したY₃Al₅O₁₂(YAG)単結晶を用いた。

得られた結晶の評価として分光透過率測定、ファラデー回転角測定を行った(株光学技研殿による測定)。また、粉末X線回折による相同定を行った。

4. 結果

育成したTSLAG(x = 0.05)の外観写真を図2に示す。直径約1インチのクラックフリーの単結晶を育成することに成功した。

また、得られた各TSLAG単結晶の粉末X線回折の結果を図3に示す。どの組成のTSLAGもガーネット相

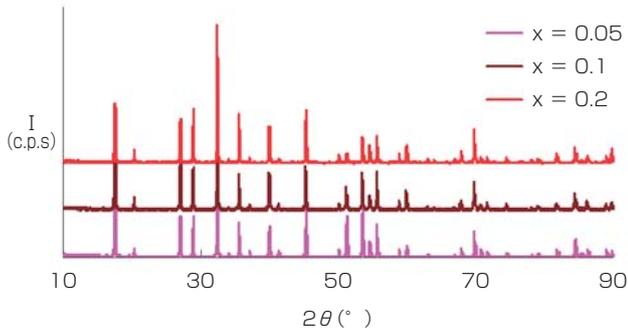


図3 各 TSLAG 単結晶の粉末 X 線回折結果
Fig. 3. Powder X-ray diffraction pattern of TSLAG.

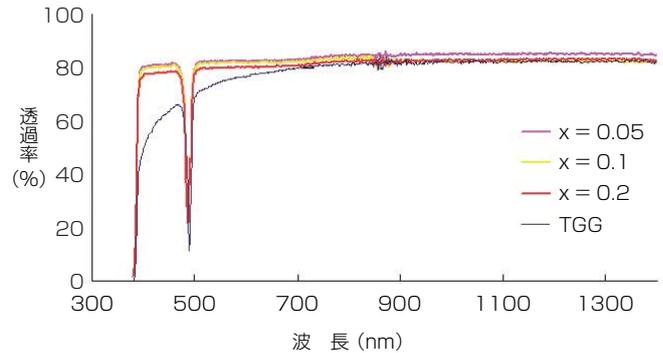


図4 各 TSLAG の分光透過率測定結果
Fig. 4. Transmittance spectrum of TSLAG and TGG.

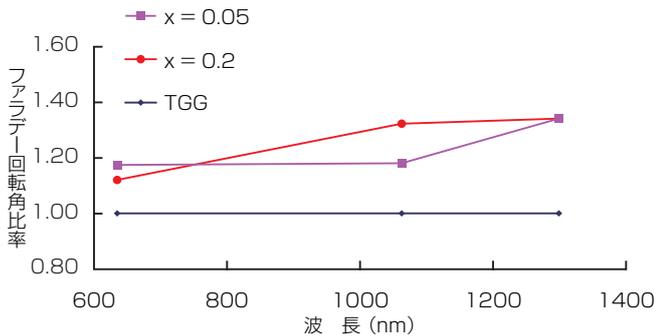


図5 ファラデー回転角の測定結果
(TGG を 1 とした場合の相対比較)
Fig. 5. Faraday rotation angle ratio of
TSLAG and TGG (TGG value is 1) .

単相であることが確認された。

図4に各 TSLAG の分光透過率測定結果を示す。ここで、測定はノンコーティングで行った。

測定波長全域で TGG より高い透過率を持つことが分かり、可視域全域 (400 ~ 800 nm) で特に高い透過率を示した。つまり、TGG では透過率が低いために不可能だった短波長領域でも、TSLAG を使用することで光アイソレータを提供することが可能である。

また、ファラデー回転角の測定結果を図5に示す。ここで、測定面は (111) 面で、測定用サンプル長は 20 mm とした。図5より、波長によっては TGG の 1.3 倍を超える大きなファラデー回転角を持つことがわかった。このことは同じファラデー回転を起こすために必要な磁界が TGG より小さくて済むため磁石を小さくでき、光アイソレータの小型化が可能であることを意味している。特にレーザー加工機に組み込まれているインライン型光アイソレータにおいては、サイズが大きいと他部品のレイアウトやサイズに影響するため小型化が望まれており、ファラデー回転角が大きいことは大きな利点となる。

5. む す び

本報告のように直径約 1 インチの TSLAG 単結晶を育成した。分光透過率は測定波長全域で TGG 以上と良好で、特に 400 ~ 800 nm の可視域全域において高い透過率を示した。また、同一磁場におけるファラデー回転角は最大で TGG の 1.3 倍程度と大きいことが確認された。

今後は更なる高品質化、大型化を目指していく予定である。

参 考 文 献

- 1) Khazanov, et al. : "Faraday isolators for high average power : State of the art". Proceedings of the Lasers and Electro-Optics, 2008 and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science CLEO/QELS, San Jose, CA, May 4-9, 2008
- 2) M. Y. A. Raja, et al. : "Room-temperature inverse Faraday effect in terbium gallium garnet", Appl. Phys. Lett., 67, 2123-2125, 1995
- 3) R. C. Linares : "Growth of garnet laser crystals", Solid State Commun., 2, 229-231, 1964
- 4) Rubinstein, et al. : "Magneto-Optical Properties of Rare Earth (III) Aluminum Garnets", J. Appl. Phys., 35, pp.3069-3070, 1964
- 5) S. Ganschow, et al. : "On the Crystallization of Terbium Aluminium Garnet", Cryst. Res. Technol., 34, 615-619, 1999
- 6) R. D. Shannon : "Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides", Acta Cryst., A32, 751-767, 1976