

パルスファイバレーザ用光アイソレータ

光電子技術研究所 応用電子技術研究部 大道 浩 児¹・高橋 行 彦²・下 平 幸 輝³・佐 藤 潤³
環境エネルギー研究所 先進技術研究部 木 寄 剛 志⁴・船 木 秋 晴⁵・蒲 山 和 紀⁵

Optical isolator for pulsed fiber lasers

K. Omichi, Y. Takahashi, K. Shimohira, J. Sato, T. Kizaki, A. Funaki, and K. Kabayama

高出力パルスファイバレーザでは、加工対象物からの反射戻り光を遮断してファイバレーザを安定発振させるための光アイソレータが必須である。1 μm帯ファイバレーザ用のアイソレータでは、Tb₃Ga₅O₁₂ (TGG) 単結晶が広く用いられているが、当社は、TGGよりもベルデ定数に優れる Tb₃(Sc,Lu)₂Al₃O₁₂ (TSLAG) 単結晶を開発し、世界で唯一、TSLAGを用いた光アイソレータを製品化している。本稿では、TSLAG単結晶の特長と製品化した光アイソレータの特性を紹介する。

Optical isolators are required for high power pulsed fiber lasers to block reflection light from objects to be processed. Fujikura has realized an isolator using Tb₃(Sc,Lu)₂Al₃O₁₂ (TSLAG) single crystal for the first time. In this paper, we report unique features of TSLAG single crystal and typical optical quality of the new isolator.

1. ま え が き

マーケティング用途で市場拡大を続けるパルスファイバレーザは、新たなニーズを取り込むために高出力化が技術トレンドとなっている¹⁾。レーザの高出力化にともない加工対象物からの反射戻り光量も大きくなるため、レーザ出力部に光アイソレータを取り付け、反射戻り光を遮断することが重要となる。これにより、安定したレーザ発振を得るとともにレーザ内部の光部品損傷を防ぐことができる。光アイソレータは、古くから光通信の分野で利用されており、構造、動作原理ともに広く知られている。このアイソレータを構成する最も重要な部品がファラデー回転子であり、光通信分野では Y₃Fe₅O₁₂ (YIG) に代表される鉄系磁性ガーネット単結晶が用いられている。しかしながら、鉄系磁性ガーネットは高出力ファイバレーザの発振波長である 1 μm帯での光透過性が不十分なため、使用することができない。そこで、この波長域で高い光透過性を持つファラデー回転子の開発が進められ、現在では Tb₃Ga₅O₁₂ (TGG) 単結晶が広く用いられている。しかしながら、TGG単結晶は、ファラデー回転子の重要な特性であるベルデ定数が小さいという課題があり、TGGに代わる新たなファラデー回転子の実用化が望まれている。そこで当社は、TGGよりもベルデ定数が大きく、また、結晶の大型化

が容易な Tb₃(Sc,Lu)₂Al₃O₁₂ (TSLAG) 単結晶の開発に着手した²⁾。そして現在では、世界で唯一、TSLAG単結晶を用いた光アイソレータを製品化し、パルスファイバレーザに搭載している。本稿では、TSLAG単結晶の特長と製品化した光アイソレータの特性を紹介する。

2. T S L A G 単 結 晶

TSLAG単結晶は、当社と独立行政法人物質・材料研究機構 (NIMS) が共同開発した新規ファラデー回転子である。ファラデー回転子に磁界を印加すると、回転子に入射した直線偏光が磁界の強さに応じて回転する。単位磁束・単位光路長あたりの偏光回転角をベルデ定数と呼び、このベルデ定数が大きいほど、光アイソレータで必要となる偏光回転角度を得るための磁束密度を小さくすることができる (あるいは、ファラデー回転子を短尺化することができる)。

TSLAGの結晶構造を図1に示す。この結晶は、前述

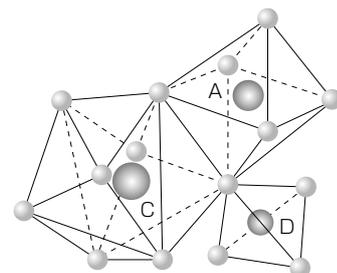


図1 TSLAGの結晶構造
Fig. 1. Crystalline structure of TSLAG.

1 応用電子技術研究部 グループ長
2 応用電子技術研究部 主席技術員
3 応用電子技術研究部
4 先進技術研究部 グループ長
5 先進技術研究部

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
ファラデー回転子	—	媒質に磁界を印加したとき、この媒質に直線偏光が通過すると、磁界の強さに応じて偏光面・振動面が回転する（ファラデー効果）。このファラデー効果を積極的に発現させ、光・磁気デバイスに活用する媒質（物質）。
ベルデ定数	—	ファラデー回転子の光路長を L 、回転子に印加する磁界を H 、回転子に生じる偏光回転角を θ_r としたとき、 $V = \theta_r / L \cdot H$ で示されるファラデー回転子（物質）固有の比例定数。
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。引き上げ法とも呼ばれ、大型結晶を育成することができる。
AR膜	反射防止膜 (Anti-Reflection coating)	屈折率の異なる媒質間（光アイソレータの場合、光学結晶と空気）の界面に生じるフレネル反射を抑制するため、一方の媒質（光アイソレータの場合、光学結晶）表面にコーティングする透明薄膜。

したYIGやTGGと同じガーネット構造を取り、一般組成式 $\{C\}_3\{A\}_2\{D\}_4O_{12}$ で表される。ここで、Cは8配位、Aは6配位、Dは4配位のカチオン元素である。表1にTSLAGを構成するカチオン元素名とそのイオン半径を示す。{C}サイトはTb、[A]サイトはScとLu、(D)サイトはAlで構成されるので、分子式は $Tb_3(Sc,Lu)_2Al_4O_{12}$ と表される。このTSLAG単結晶では、{C}サイトを占めるTbと[A]サイトを占めるSc、Luとのイオン半径差が比較的小さいため、イオン半径バランスの観点から大型結晶を育成しやすいと考えられている²⁾。当社では、チョクラルスキー（CZ）法により、図2に示す大型TSLAG単結晶をマクロクラックフリー（目視観察可能な欠陥なし）で育成することに成功している。

表2は、作製したTSLAG結晶とTGG結晶のベルデ定数を比較した結果である。測定波長1080 nm、測定温度22℃の条件におけるTGGのベルデ定数を1と規格化すると、同じ測定条件におけるTSLAGの規格化ベルデ定数は1.28であり、TGGより1.2倍以上高いベルデ定数を有

することが確認できた。図3は、TSLAG結晶の透過スペクトル（結晶厚み10 mm）である。ファイバレーザで使用する1 μm帯はもちろん、500 nm付近を除いた可視光領域でも高い透明性を有するため、ファイバレーザ用途のみならず、可視光レーザ用のアイソレータにも応用可能である。なお、最も透過率が高い550～1300 nmの波長範囲でも透過率が約80%に留まっているのは、測定したTSLAG結晶と空気の界面で生じるフレネル反射の影響であり、フレネル反射による光損失を除くと、ほぼ100%の透過率となることが確認されている。

3. 光アイソレータ

TSLAG単結晶を用いた光アイソレータ製品の外観写真を図4に示す。ファイバレーザから出力した光は、大きな光損失なくアイソレータから出射することができる。一方、加工対象物からの反射戻り光がアイソレータへ入力された場合、アイソレータ筐体内で反射戻り光を遮断してファイ

表1 TSLAG結晶を構成するカチオン元素とそのイオン半径

Table 1. Cations composing TSLAG crystal and their ion radii.

カチオン配位サイト	元素	イオン半径 (Å)
{C} サイト (8 配位)	Tb (テルビウム)	1.04
	Sc (スカンジウム)	0.745
[A] サイト (6 配位)	Lu (ルテチウム)	0.861
	Al (アルミニウム)	0.390



図2 TSLAG単結晶

Fig. 2. A Photograph of TSLAG single crystal.

表2 TSLAG結晶とTGG結晶のベルデ定数比較
Table 2. Verdet constants of TSLAG and TGG crystals.

結晶	ベルデ定数 (a.u.)
TGG	1.00
TSLAG	1.28

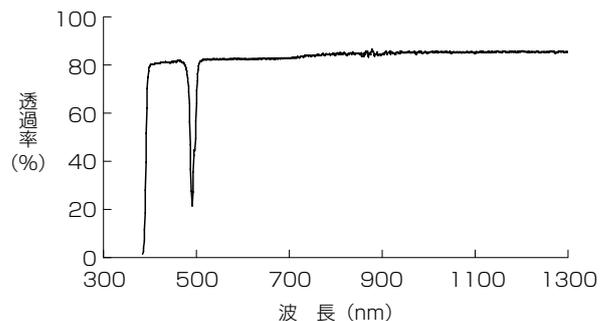


図3 TSLAG結晶の透過スペクトル

Fig. 3. Transmission spectrum of TSLAG crystal.



図4 光アイソレータの外観写真

Fig. 4. A photograph of newly developed optical isolator.

表3 パルスファイバレーザ用光アイソレータの代表特性
Table 3. Specifications of an optical isolator for pulsed fiber lasers.

項目	特性	単位	備考
中心波長	1085	nm	適用ファイバレーザに合わせてチューニング可能
順方向出力パワー	80	W	
逆方向入力パワー	40	W	
順方向光損失	0.1	dB	
アイソレーション	38	dB	

パレーザへ再入力することを防止する。ファイバレーザからの出力光を順方向、加工対象物からの戻り光を逆方向と定義すると、順方向の光損失が0に近く、逆方向の光損失が大きいほど望ましい。逆方向と順方向の光損失の比はアイソレーションと呼ばれ、最も重要な光学特性である。

光アイソレータ製品の代表特性を表3に示す。当社パルスファイバレーザ製品の高出力化に対応するため、順方向80Wの出力でも使用可能であり、順方向出力の50%に相当する40Wの逆方向入力があっても、アイソレータが故障することなく光遮断可能である。順方向光損失は0.1dBであり、ファイバレーザから出力した光をほとんど減衰させることなく出射できることが確認できた。また、アイソレーションは38dBであり、反射戻り光を、およそ1/10,000にまで減衰できることが確認できた。以上の結果より、当社の光アイソレータは、低い順方向光損失と高いアイソレーション性能を有することが実証された。

光アイソレータには、ファラデー回転子を含む複数の光学結晶が用いられており、これら光学結晶には反射防止（Anti-reflection：AR）膜がコーティングされている。光学結晶に対して高いパワー密度のレーザ光が通過すると、AR膜および光学結晶自身が損傷して順方向光損失が増加したり、出力ビーム形状が劣化する場合がある。さらに、最悪の場合には光学結晶が破損してアイソレータ故障に至ることもある。光学結晶の耐レーザパワー性能を評価するために、高出力パルスファイバレーザに光アイソレータを取付け、2,000時間の連続運転をおこなった。図5は2,000時間の連続運転中に順方向光出力を常時計測した結果である。また図6は、2,000時間運転前後のビーム形状を測定した結果である。2,000時間の連続運

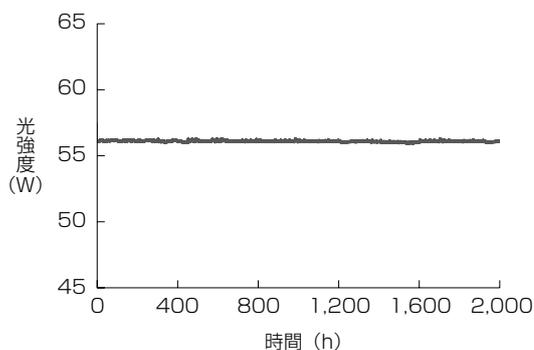


図5 連続2,000時間運転時の光出力変動

Fig. 5. Optical output fluctuation of optical isolator in 2000 hour continuous operation.

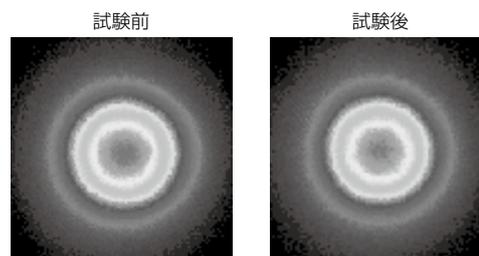


図6 連続2,000時間運転前後のビーム形状

Fig. 6. Output beam patterns before and after 2000 hour continuous operation.

転中、順方向光出力に有意変動は認められず、また、運転前後のビーム形状も一定であることから、AR膜および光学結晶自身の損傷はないと判断した。事実、2,000時間運転後に本アイソレータを分解し、光学結晶を顕微鏡観察しても、レーザ損傷は認められなかった。以上の結果より、当社の光アイソレータは、高出力、長時間の連続運転に対して高い信頼性を有することが実証された。

4. まとめ

当社は、世界で唯一、TSLAG単結晶を用いた光アイソレータの製品化に成功し、パルスファイバレーザに搭載している。本アイソレータは、低い順方向光損失と高いアイソレーション特性を示し、さらに、高出力、長時間のレーザ連続運転に対して高い信頼性を有する。パルスファイバレーザの高出力化にともない、光アイソレータの重要度はさらに増していることから、今後も光学特性と信頼性の向上に努めていく。

参考文献

- 1) 姫野邦治：「ファイバレーザと先進的光技術」フジクラ技報、第123号、pp. 33-37、2012。
- 2) ガルシア・ビジョラ、島村清史、畑中翼、船木秋晴、直江邦浩：「光アイソレータ用単結晶」フジクラ技報、第120号、pp. 39-41、2011。