

kW 級レーザー加工のためのファラデー素子の開発

自然科学研究機構 核融合科学研究所

助教 安原 亮

(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013211)

キーワード：高出力レーザー加工，戻り光，光アイソレーター

1. 研究の目的と背景

近年の加工用レーザー光源の高出力化に伴い、加工対象物からレーザー光源装置への戻り光が問題となってきた。戻り光は加工対象物での反射や散乱から生じるが、わずかな戻り光もレーザー出力の高出力、高ピークパワー化に伴って、光ファイバーの出射端面や伝送用光学素子の損傷を招いてしまう。このような戻り光によるレーザー光源や光学素子の損傷を防ぐために光アイソレーターが非常に重要となる。光アイソレーターは、光学媒質の複屈折、磁気光学効果、電気光学効果などを利用してレーザー光の偏光を制御することによるものが一般的である。中でも磁場中に置かれた光学媒質に光を入射すると偏波面が回転する現象であるファラデー効果を利用したファラデー素子で構成される光アイソレーターが最も利用されている。

ファラデー素子を用いた光アイソレーターを用いることで、レーザー加工対象物からの戻り光の影響除去が可能である。これはレーザー光源の長寿命化、故障によるダウンタイムの減少、レーザー取り扱いの容易化（未熟練者の取り扱いによる戻り光でのレーザー故障を防止できる。）といった効果が期待でき、多くのレーザー装置に導入されている¹⁻³⁾。

しかしながらファラデー素子を高平均出力レーザーに用いると、ファラデー素子を構成するファラデー媒質（磁気光学媒質）がレーザー光を吸収し、熱レンズや熱複屈折といった熱光学効果を生じてしまう。熱光学効果は、消光比低下や透過波面歪みを誘起して、ファラデー素子の性能を著しく劣化させる。結果として高出力レーザーでは、通常のファラデー素子を使用することができない。

このような状況のもと、ファラデー素子の高出力レーザー入射時の動作特性に関する研究や素子内の光学配置や偏光の制御方法及び素子の冷却方法を工夫することによって使用可能なレーザーパワーの拡大が図られている⁴⁻⁷⁾。このような努力のもと、現在では kW 級のレーザー光をファラデー素子で扱うことが可能になってきた。

高出力レーザーでファラデー素子を使用するためにはファラデー媒質に少なくとも 3 つの条件が必要となる。すなわち (1) 適度な磁場強度で望むべき偏光回転性能を得るために大きなヴェルデ定数を持つこと、(2) 高平均出力動作に耐えうる熱特性を有すること、(3) 媒質内部での発熱や光学損失を低減するため適応波長での低い吸収係数を持つことである。

近年開発された透光性セラミックスである Terbium

Gallium Garnet (TGG) セラミックスは、優れた磁気光学特性と TGG 単結晶と同等の良好な熱物性値を持ち、高出力レーザー用のファラデー媒質の上記 3 条件を満たしている⁸⁻¹³⁾。その上、セラミック技術を用いた製造技術により大型材料を製作することが可能である。光学損傷を避けるための大口径ファラデー素子を構築できるため高平均出力動作のみならず大パルスエネルギー動作にも適応できる。

本論文では、この新規磁気光学媒質である TGG セラミックスの磁気光学特性、熱光学特性評価について紹介した後、TGG セラミックスの kW 級高平均出力レーザー用ファラデー材料としての有用性を述べる。

2. TGG セラミックスの評価

2.1 TGG セラミックスの磁気光学効果温度依存性

大きなヴェルデ定数を持つことは、磁気光学媒質に求められる一番の条件である。TGG 単結晶は、可視域から $1\mu\text{m}$ 程度の波長領域で、比較的大きなヴェルデ定数を持っており、この波長域で現在最も広く利用されているファラデー媒質である。TGG セラミックスも単結晶同様良好な磁気光学特性を得ることができる。

図 1 に TGG セラミックスのヴェルデ定数の温度依存性と比較のために測定した TGG 単結晶のヴェルデ定数の温度依存性の測定結果を示す。

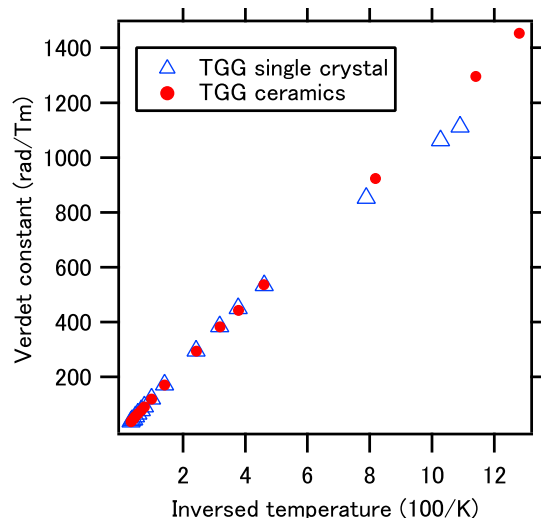


図 1 TGG セラミックスと TGG 単結晶のヴェルデ定数の温度依存性⁸⁾。

測定は回転検光子法で行った。室温 (300K) のヴェルデ定数を比較すると波長 1053nm で TGG セラミックス、TGG 単結晶ともに 36 rad/Tm と同等な値を示している。これは、TGG セラミックスのグレインが密に充填されており、セラミックスの品質が良好であることを示している。またセラミックスと単結晶のヴェルデ定数は、ほぼ測定温度領域全体に亘って同等な値を示していることを確認している。

2.2 TGG セラミックスの磁気光学効果波長依存性

ファラデー効果は、波長の関数となっていることが知られている。使用するレーザーの波長で、正確なファラデー効果の大きさを知ることはファラデー素子を設計するために非常に重要である。図2に TGG セラミックスの磁気光学効果の波長依存性を測定するための実験装置概略を示す。ここでは、キセノンランプより出力された光をコリメートレンズ (L1) によって平行光にして開口アイリスを透過したのちに一つのポラライザーへ入射する。その後、イメージリレー用のレンズ (L2) を透過後、永久磁石で磁場をかけることが可能な TGG セラミックスサンプルへと光を入射する。その後、イメージリレー用レンズ (L3) によって光が検光子へと導かれ、検光子を透過した光は光スペアナに接続された光ファイバーへと集光される。

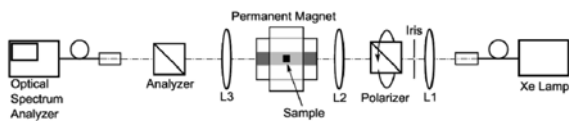


図2. ヴェルデ定数の波長依存性測定用実験装置概略

図3に、TGG セラミックスの透過率と吸収係数を示す。図中のクロスと丸印はTGGセラミックスとTGG結晶の吸収係数の値をレーザー照射より導いたものである。TGGセラミックスは488nmに Tb^{3+} イオンに起因したおう用意吸収を持っている。波長 $1\mu m$ 付近では、非常に吸収が小さくなっており $1cm$ あたり 10^{-3} から 10^{-2} の吸収係数となっている。

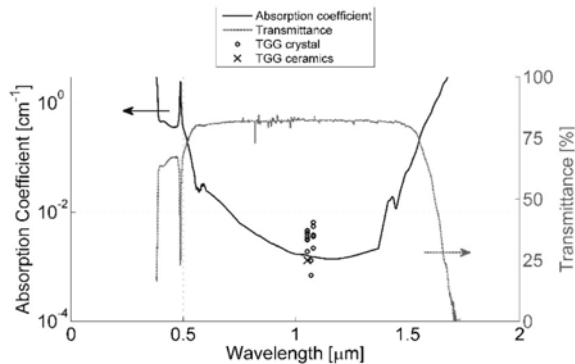


図3 TGG セラミックスの透過率、吸収係数⁽¹⁴⁾

図4に TGG セラミックスのヴェルデ定数の波長依存性の測定結果を示す。TGG セラミックスのヴェルデ定数は波長の二乗に反比例していることがわかる (14)。図中の黒○プロットは、それぞれ 633nm の He-Ne レーザーと 1064nm の Nd : YAG レーザーを用いて測定した結果で、今回の白色光での測定結果と一致している。また測定誤差も 500nm から $1.2\mu m$ の範囲で 5%以下であり信頼性の高いデータといえる。

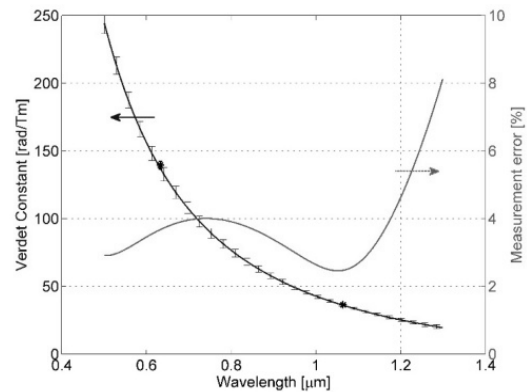


図4 TGG セラミックスのヴェルデ定数の波長依存性⁽¹⁴⁾

3. kW 級のファラデー素子試験

TGG セラミックスは、高平均出力レーザー用ファラデー素子に必要な、3条件(高いヴェルデ定数、良好な熱特性、低い吸収係数)を満たしている。そこでTGGセラミックスを用いて実際にファラデーアイソレーターを構成してレーザー照射試験を行い、性能を評価した。2つのTGGセラミックス媒質を円筒状の磁気回路内に設置し、ファラデーアイソレーターを作成した。媒質温度を一定に維持するために水冷却を行い、2つのTGGセラミックス媒質と結晶水晶回転子を用いることによってTGGセラミックスで発生する熱複屈折による偏光解消を補償した。

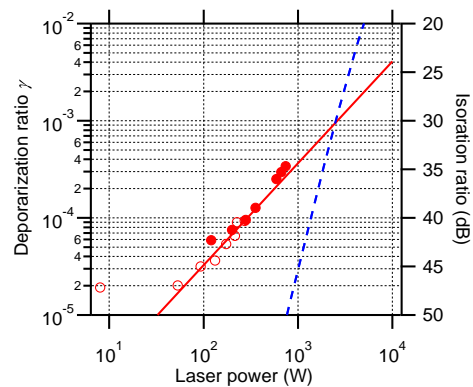


図5 TGG セラミックスを用いたファラデーアイソレーターの偏光解消度とレーザーパワーの関係⁽¹⁵⁾

図5に実験結果を示す。丸プロットが実験結果、点線がファラデーアイソレーターで生じる熱複屈折損失の理論式から求めた計算結果を示す。実線は実験結果のフィッティング曲線である。実験結果から740Wのレーザー入射時に 3.4×10^{-4} の偏光解消度が計測されていることがわかる。これは偏光解消度から求まる消光比に直すと35dBとなる。kW級のレーザー入射にもかかわらず非常に高い消光比を維持している。実験結果のフィッティング曲線は、ほぼレーザーパワーに対して1次の比例関係を示している。理論ではこのアイソレーターはレーザーパワーに対して4次に比例して偏光解消度が増加することが予想されている。実験したレーザーパワーの範囲では、残留応力による影響が熱複屈折による影響よりも大きいためこのような結果となっていると考えられる。図2の理論曲線とフィッティング曲線の交点は2kWのレーザー照射時となっている。本アイソレーターは2kWまでは熱複屈折による影響よりも、残留応力による偏光解消が支配的であることを示している。熱複屈折が支配的になる2kW以上においても、理論曲線から外装すると2.7kW入射時の消光比はおおよそ30dBと良好な値が予想される。実験では同時に熱レンズの測定を行った。レーザー照射時の熱レンズ焦点距離を測定したところ、740W照射で40cmの焦点距離となった。球面レンズや補償光学系を用いた熱レンズ補正が必須となるが、補償可能なレベルの熱レンズである。また今回は直径1.5mmのレーザー光をTGGセラミックスに入射しているが、ロッド上でビーム径を拡大することで熱レンズを緩和可能である。

4. まとめ

TGGセラミックスは、磁気光学特性、熱光学特性がTGG単結晶と同等で高平均出力レーザー用ファラデー素子に適したものであることを示した。さらにTGGセラミックスを用いて、kWレーザー用ファラデーアイソレーターを実証した。その結果、740Wのレーザー入射で35dBという高い消光比を実現した。TGGセラミックスは、セラミックスの製造技術によって大型化が可能のため、本研究で用いたようなCWレーザーのみならず、高繰り返しのパルスレーザーでも使用可能である。本研究で実証したTGGセラミックスを用いたkWレーザー用のファラデーアイソレーターは、高平均出力レーザー、大エネルギー繰り返しレーザーの開発と応用技術の発展に貢献するものと期待される。

最後に、直近の動向について報告する。我々の研究グループでテルビウムスカンジウムアルミニウムガーネット(TSAG)結晶が極めて高出力レーザー用のファラデー素子に適した、磁気光学材料であるということを見出した。詳しくは最新の論文⁽¹⁶⁾を参照していただきたいが、TSAG結晶の光弾性効果の異方性を利用することによって、特別な冷却や光学的な補償技術を用いることなく、平均出力1.5kWのレーザー出力で使用できるファラデー素子を構成できるということを実証した。今後も研究を進めること

で更なるファラデー素子の高性能化が見込まれる。



図6 高性能なファラデー素子への応用が期待されるTSAG結晶

謝辞

本研究の一部をサポートしていただいた天田財団(AF-2013211)に感謝いたします。

参考文献

- (1) Saumyabrata Banerjee, Klaus Ertel, Paul D. Mason, P. Jonathan Phillips, Mathias Siebold, Markus Loeser, Cristina Hernandez-Gomez, and John L. Collier, "High-efficiency 10 J diode pumped cryogenic gas cooled Yb:YAG multislabs amplifier," *Opt. Lett.* 37, 2175-2177 (2012).
- (2) Ryo Yasuhara, Toshiyuki Kawashima, Takashi Sekine, Takashi Kurita, Tadashi Ikegawa, Osamu Matsumoto, Masahiro Miyamoto, Hirofumi Kan, Hidetsugu Yoshida, Junji Kawanaka, Masahiro Nakatsuka, Noriaki Miyana, Yasukazu Izawa, and Tadashi Kanabe, "213 W average power of 2.4 GW pulsed thermally controlled Nd:glass zigzag slab laser with a stimulated Brillouin scattering mirror," *Opt. Lett.* 33, 1711-1713 (2008)
- (3) J.-C. Chanteloup and D. Albach, "Current Status on High Average Power and Energy Diode Pumped Solid State. Lasers [Invited]," *IEEE Photon. J.* 3(2), 245-248 (2011).
- (4) E. A. Khazanov, N. F. Andreev, A. N. Mal'shakov, O. V. Palashov, A. K. Poteomkin, A. M. Sergeev, A. A. Shaykin, V. V. Zelenogorsky, I. Ivanov, R. S. Amin, G. Mueller, D. B. Tanner, and D. H. Reitze, "Compensation of thermally induced modal distortions in Faraday isolators," *IEEE J. Quantum Electron.* 40(10), 1500-1510 (2004).
- (5) E. Khazanov, N. Andreev, A. Babin, A. Kiselev, O. Palashov, and D. Reitze, "Suppression of

- self-induced depolarization of high-power laser radiation in glass-based Faraday isolators," *J. Opt. Soc. Am. B* 17(1), 99–102 (2000).
- (6) Ilya Snetkov, Ivan Mukhin, Oleg Palashov, and Efim Khazanov, "Compensation of thermally induced depolarization in Faraday isolators for high average power lasers," *Opt. Express* 19(7), 6366 (2011).
- (7) D. S. Zheleznov, V. V. Zelenogorskii, E. V. Katin, I. B. Mukhin, O. V. Palashov, and E. A. Khazanov, "Cryogenic Faraday isolator," *Quantum Electron.* 40(3), 276–281 (2010).
- (8) Ryo Yasuhara, Shigeki Tokita, Junji Kawanaka, Toshiyuki Kawashima, Hirofumi Kan, Hideki Yagi, Hoshiteru Nozawa, Takagimi Yanagitani, Yasushi Fujimoto, Hidetsugu Yoshida, and Masahiro Nakatsuka, "Cryogenic temperature characteristics of Verdet constant on terbium gallium garnet ceramics," *Opt. Express* 15, 11255–11261 (2007)
- (9) R. Yasuhara, et al., *The Review of Laser Engineering*, 35, 806 (2007).
- (10) Ryo Yasuhara and Hiroaki Furuse, "Thermally induced depolarization in TGG ceramics," *Opt. Lett.* 38, 1751–1753 (2013)
- (11) R. Yasuhara, H. Nozawa, T. Yanagitani, S. Motokoshi, and J. Kawanaka, "Temperature dependence of thermo-optic effects of single-crystal and ceramic TGG," *Opt. Express* 21(25), 31443–31452 (2013).
- (12) Ryo Yasuhara, Ilya Snetkov, Alexey Starobor, Dmitry Zheleznov, Oleg Palashov, Efim Khazanov, Hoshiteru Nozawa, and Takagimi Yanagitani, "Terbium gallium garnet ceramic Faraday rotator for high-power laser application," *Opt. Lett.* 39, 1145–1148 (2014)
- (13) R. Yasuhara, et al., *Advanced Solid-State Lasers Congress* (Optical Society of America, 2013), post deadline paper JTh5
- (14) Ondrej Slezak, Ryo Yasuhara, Antonio Lucianetti, and Tomas Mocek, "Wavelength dependence of magneto-optic properties of terbium gallium garnet ceramics," *Opt. Express* 23, 13641–13647 (2015).
- (15) Ryo Yasuhara, Ilya Snetkov, Alexey Starobor and Oleg Palashov, *Appl. Phys. Lett.* 105, 241104 (2014).
- (16) Ryo Yasuhara, Ilya Snetkov, Aleksey Starobor, Evgeniy Mironov, and Oleg Palashov, "Faraday rotator based on TSAG crystal with $\langle 001 \rangle$ orientation," *Opt. Express* 24, 15486–15493 (2016)