



Y. Koyama

## Yb-Mg 添加ファイバによる 超短パルスファイバーレーザーの開発

小山 勇也\*

### 1. まえがき

近年、GHz 帯の繰り返し周波数で動作する超短パルスレーザーは、光周波数コム、バイオイメージング、次世代光通信、微細加工など、広範な分野で利用が進んでいる<sup>1-9)</sup>。こうした応用では、より高い出力と変換効率を兼ね備えた光源の実現が強く求められる。Yb 添加シリカガラスファイバーレーザーは、高いエネルギー変換効率と産業的実用性から、広く用いられているパルスレーザー光源の一つである。しかしながら、Yb イオンのクラスター形成によるフォトダークニング (PD) 効果が問題となっており、長期動作時の出力低下や信頼性の劣化を引き起こす<sup>9)</sup>。この現象は、高強度光の照射下における Yb<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup>イオンペアの価数変化に起因するとされており<sup>7)</sup>、高出力化における制約となっている。PD 効果の抑制に向けた試みとして、Al<sup>8)</sup>、P<sup>9, 10)</sup>、Ce<sup>11)</sup>などを共添加することで Yb イオン対の形成を制御する手法が提案されている。しかし、実用的に安定に動作するファイバーレーザーの構築には至っていない。一方、リン酸ガラスは Yb イオンの均一分散を可能にする母材媒質<sup>12)</sup>として注目されている。短尺の共振器構造では、10 GHz 級の高繰り返しレーザーが報告されている<sup>13-16)</sup>。しかし、リン酸ガラスは湿度の影響を強く受け、長期安定性や機械的強度に課題を抱える<sup>11)</sup>。

一方、ゼオライト法は、シリカガラス中に希土類イオンを高濃度かつ均一に分散可能とする製造手法である<sup>17)</sup>。本手法により作製されたシリカガラスは、機械的強度と長

期安定性に優れたシリカガラスの特長と、均一分散による PD 効果の抑制を併せ持ち、高出力レーザー用の増幅媒体として期待されている。

我々の研究グループではゼオライト法により作製された Nd 添加シリカガラスファイバを用いて短尺共振器を構成し、2.6 GHz の繰り返し周波数でのレーザー動作が達成されている<sup>18)</sup>。さらに、Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を 1.0 mol% で高濃度に添加し、Mg を共添加した Yb 添加シリカガラスファイバー (以下、YbMgSGF) の開発<sup>19)</sup>が試みられた。このファイバは、Yb イオンペアの形成と Yb の価数変動を同時に抑え、PD 効果を抑制することが確認されている。本研究では、この YbMgSGF を用いて短尺共振器を構成し、高出力な GHz 高繰り返しパルスレーザーの実現を目的として行った。

### 2. 実験方法

本研究で使用した Yb-Mg 共添加シリカガラスファイバ (YbMgSGF) は、ゼオライト法<sup>19)</sup>により作製されたコアガラスを用いたプリフォームから、ロッド・イン・チューブ法により製造された。YbMgSGF の Yb 添加濃度は 5.46 wt% である。ファイバの直線形状を維持するために、ニッケルフェルール内に YbMgSGF を挿入し、端部はジルコニアフェルールと紫外線硬化樹脂で固定しハウジングした。図 1 のように、ファイバ両端面には研磨処理を施した。全長は 102 mm であった。YbMgSGF はコア径 5.3 μm およびクラッド径 125 μm であり、屈折率は  $n_{\text{core}} = 1.4684$ ,

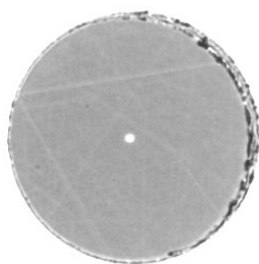


図 1 作製したファイバの端面

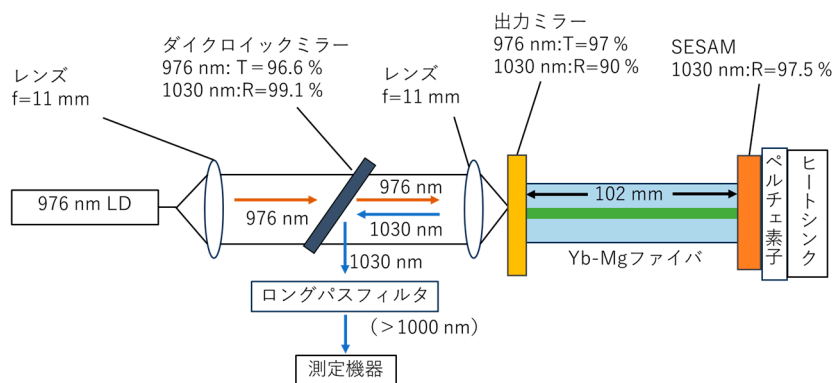


図 2 実験構成図

\* 千葉工業大学 准教授

$n_{\text{clad}} = 1.4498$  である。そのため開口数 (NA) は 0.233, 1030 nm における V パラメータは 3.77 と算出され, YbMgSGF はマルチモードファイバ伝送と確認した。

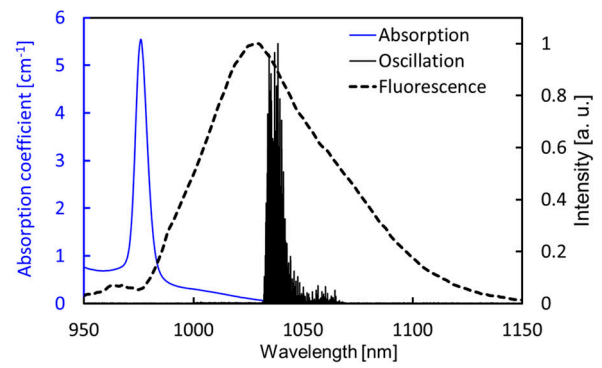
図 2 に実験装置の概略図を示す。図 2 より, 励起源に波長 976 nm の LD を使用した。共振器は出力ミラー ( $T=97\% @ 976 \text{ nm}$ ,  $R=90\% @ 1030 \text{ nm}$ ) と半導体飽和吸収ミラー (SESAM) を使用して構築され, これらのミラーは YbMgSGF ファイバの端面と突き合わせて結合した。また, SESAM は変調度 1.2%, 非飽和損失 0.8%, 緩和時間 1 ps, 飽和フルエンス  $60 \mu\text{J}/\text{cm} @ 1040 \text{ nm}$  のものを使用した。SESAM の温度はペルチェ素子により一定に保たれた。コリメートされた励起光はダイクロイックミラーを透過した後に出力ミラーに集光され, ファイバ共振器に結合された。出射光は, 励起源側方向に直進し, ダイクロイックミラーで反射された後, ロングパスフィルタを通過し, フォトディテクタ, 光スペクトラムアナライザ, オシロスコープ, RF スペクトラムアナライザで測定された。

### 3. 研究成果

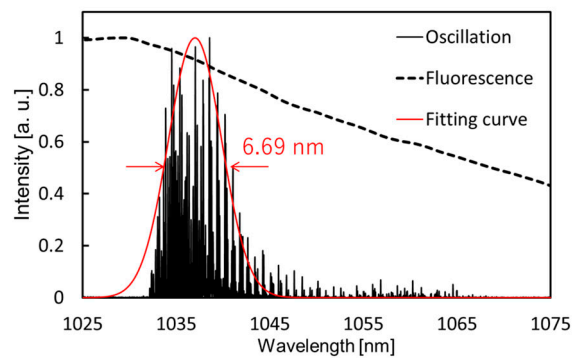
図 3 に, YbMgSGF の吸収・蛍光スペクトル, および出力パワー 5.13 mW におけるレーザー発振スペクトルを示す。図 3 より, ピーク波長は 1039 nm, 半値全幅 (FWHM) は 6.69 nm であった。

図 4 に, 入出力特性を示す。図 4 より, 励起パワー 167 mW に対する最大出力は 5.93 mW と確認した。スロープ効率 3.6%, 閾値は 5.3 mW と算出された。

図 5 (a), (b) に, 出力電力 5.13 mW ( $P_{\text{pump}}: 147 \text{ mW}$ ) における時間波形を示す。図 5 (a) に示すように, パルスエンベロープが 200 ns の時間スケールで発生し, 1.02  $\mu\text{s}$  間隔であることを確認した。図 5 (b) に示すように, 10 ns 範囲では, 図 5 (a) のパルスエンベロープ内に 1.000 ns 間隔のパルス列があることを確認した。これらの結果は YbMgSGF パルスレーザーが Q スイッチドモードロック (QML) 状態<sup>20)</sup>で動作していることを示している。また, 測定された平均パルス列間隔 1.000 ns は, 1.002 GHz の繰り返し率に対応する。図 5 (c) に, 出力パワー 5.13 mW における RF スペクトル (周波数幅: 3 GHz, RBW: 3 MHz) を示す。図 5 (c) より, RF スペクトルには 2 つのピーク (1.005 GHz, 2.007 GHz) が観測された。本研究で使用した共振器長 (ファイバ長) は 102 mm, コアの屈折率は  $n_{\text{core}} = 1.4684$  であるため, 基本周波数の理論値は 1.01 GHz である。そのため, 観測された最初のピーク (1.005 GHz) はパルスの基本繰り返し周波数に対応していると考えられる。また, 基本繰り返し周波数 (1.005 GHz) における信号対雑音比は 40 dB であった。尚, 2 つ目のピーク (2.007 GHz) は 2 次高調波成分であると考えられる。結果より, 短尺ファイバの共振器長が反映された基本繰り返し周波数のパルスを得ることが可能であると確認した<sup>21)</sup>。また, [16]では短尺共振器の構成による 12.5 GHz の繰返し周波数のパルス発振が報告されているが, YbMgSGF も同様に,



(a) スペクトル全体



(a) の波長範囲 1025-1075 nm の拡大図

図 3 吸収・蛍光スペクトルと発振スペクトル (Elsevier の許可を得て, 文献<sup>21)</sup>より転載)

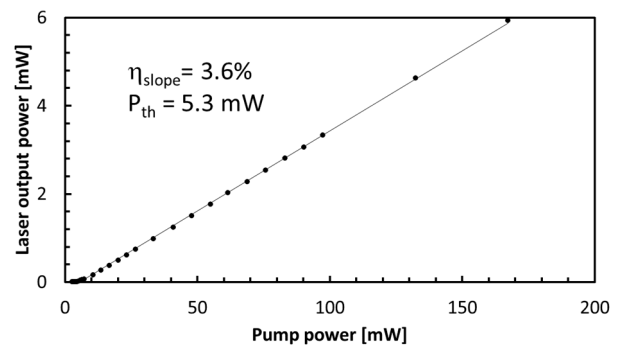


図 4 入出力特性 (Elsevier の許可を得て, 文献<sup>21)</sup>より転載)

共振器長の短縮により繰り返し周波数を増加したパルス発振も可能であると推察できる。

レーザー発振の安定性を調べるため, 一定時間にわたって観測した出力強度の変化を図 6 に示す。図 6 より, 発振開始直後から出力は低下し, 10 分経過後には約 6 割程度になることを確認した。また, パルス発振動作は開始直後から数十秒程度までしか保持されないことを確認した。YbMgSGF はフォトダークニングを抑制することから, 図

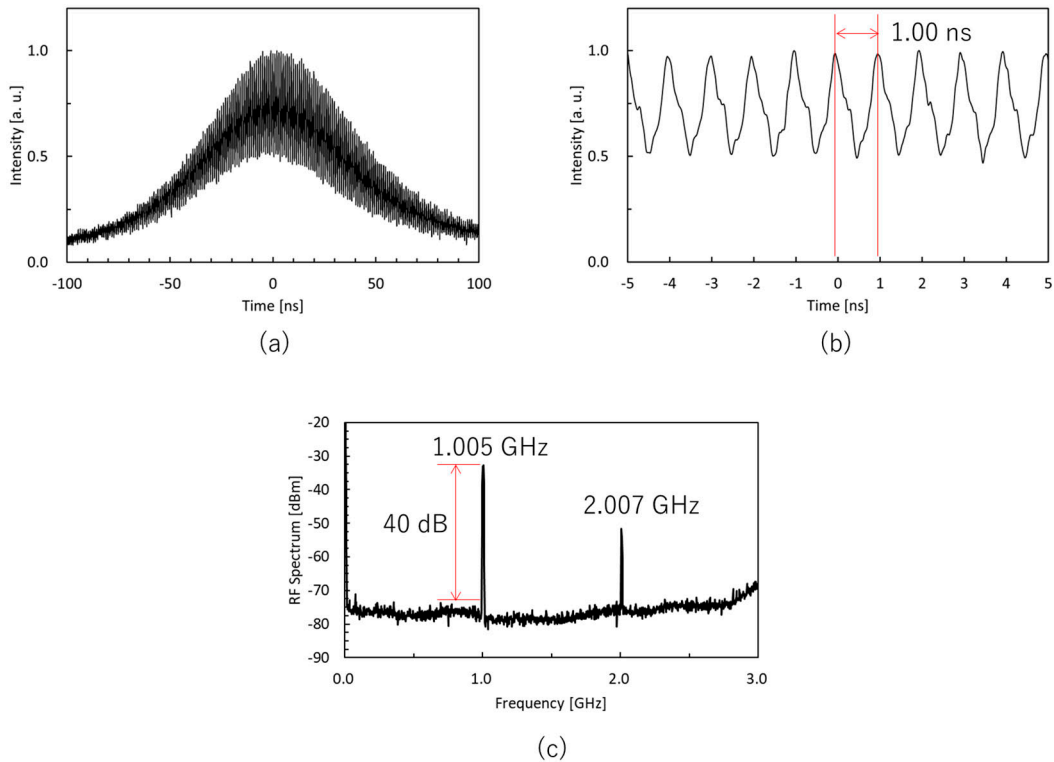


図5 出力パワー5.13 mWにおける時間波形 (a) 200 ns および (b) 10 ns スケール, (c) RF スペクトル (Elsevier の許可を得て, 文献<sup>21)</sup>より転載)

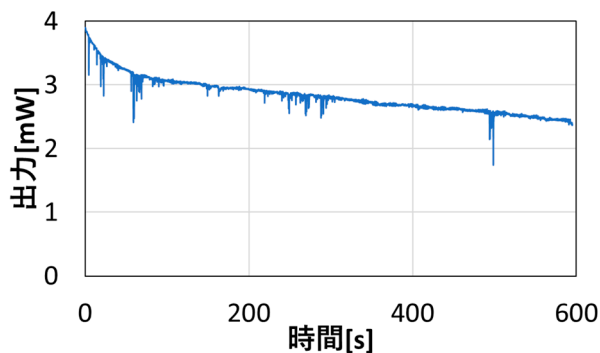


図6 レーザー出力の時間変化

6 の出力低下およびパルス発振動作の停止はファイバの熱膨張や共振器のアライメント変動が主要因であると考えられる。そのため、継続的なパルス発振のためには共振器自体の温度制御が不可欠であると考えられる。

本レーザー構成では、QML 動作のパルス発振が達成されたが、励起パワーを増加しても CW モードロック (CML) は観測されなかった。従来の研究では、Nd<sup>3+</sup>添加シリカガラスファイバと SESAM を使用した短尺共振器<sup>18)</sup>において、QML から CML 動作への移行条件が考察されている。特に、CML 動作を実現するためには、共振器内のモードロックパルスのエネルギーが特定の閾値を超える必要があり、この閾値以下では QML 動作に留まってしまう

ことが示されている。一方、現在の本パルスレーザーの共振器構成では、CML 閾値が高いため、共振器内エネルギーが閾値を超えることは困難である。これを改善するためには、出力ミラーの反射率やビームの MFD の最適化が有効である。但し、出力を増加させると YbMgSGF の温度変化がより顕著に引き起こされ、ファイバ端面とミラーの位置が影響を受け、結果的に出力が低下するという問題が想定される。そのため、適切な冷却構成を設計する必要があると考えられる。我々の最新の報告<sup>22)</sup>では、共振器の光学系および温度制御機構の改良により、CML 発振を達成している。これによりシード光源の構築が達成されたことから、今後は増幅器の構築ならびに FROG 等を用いた波形取得とパルス特性の詳細な評価を進める予定である。

#### 4. まとめ

ゼオライト法によって作製された Yb-Mg シリカガラスを短尺の共振器構造として適用し、パルス発振する手法を開発した。共振器内には半導体可飽和吸収ミラー (SESAM) を組み込み、受動 Q スイッチモードロック動作を実現した。また、将来的な高出力発振器の実現に向け、CW モードロック動作への移行条件や課題について考察した。本成果は、次世代のパルスレーザー光源の基盤技術として期待される。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの奨励研究助成のご支援を受けて実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。また共同研究者である千葉工業大学 教授 藤本靖先生に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) A. Bartels, R. Gebs, M.S. Kirchner, S.A. Diddams, Spectrally resolved optical frequency comb from a self-referenced 5 GHz femtosecond laser, *Opt. Lett.* 32 (2007) 2553-2555.
- 2) N. Ji, J.C. Magee, E. Betzig, High-speed, low-photodamage nonlinear imaging using passive pulse splitters, *Nat. Methods* 5 (2008) 197-202.
- 3) S. Liu, X. Wu, D. Jung, J.C. Norman, M.J. Kennedy, H.K. Tsang, A.C. Gossard, J.E. Bowers, High-channel-count 20 GHz passively mode-locked quantum dot laser directly grown on Si with 41 Tbit/s transmission capacity, *Optica* 6 (2019) 128-134.
- 4) C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, B. Çetin, D.K. Kesim, Ö. Akçaalan, S. Yavaş, M.D. Aşık, B. Öktem, H. Hoogland, R. Holzwarth, F.Ö. Ilday, Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses, *Nature* 537 (2016) 84-88.
- 5) P. Elahi, Ö. Akçaalan, C. Ertek, K. Eken, F.Ö. Ilday, H. Kalaycıoğlu, High-power Yb-based all-fiber laser delivering 300 fs pulses for high-speed ablation-cooled material removal, *Opt. Lett.* 43 (2018) 535-538.
- 6) R. Paschotta, J. Nilsson, P.R. Barber, J.E. Caplen, A.C. Tropper, D.C. Hanna, Lifetime quenching in Yb-doped fibres, *Opt. Commun.* 136 (1997) 375-378.
- 7) A.D. Guzman Chávez, A.V. Kir'yanov, Y.O. Barmenkov, N.N. Il'ichev, Reversible photo-darkening and resonant photobleaching of Ytterbium-doped silica fiber at in-core 977-nm and 543-nm irradiation, *Laser Phys. Lett.* 4 (2007) 734-739.
- 8) T. Kitabayashi, M. Ikeda, M. Nakai, T. Sakai, K. Himeno, K. Ohashi, Population inversion factor dependence of photodarkening of Yb-doped fibers and its suppression by highly aluminum doping, in: *Proc. OFC/NFOEC*, (2006), p. OThC5.
- 9) S. Jetschke, S. Unger, A. Schwuchow, M. Leich, J. Kirchhof, Efficient Yb laser fibers with low photodarkening by optimization of the core composition, *Opt. Express* 16 (2008) 15540-15545.
- 10) T. Deschamps, H. Vezin, C. Gonnet, N. Ollier, Evidence of AIOHC responsible for the radiation-induced darkening in Yb doped fiber, *Opt. Express* 21 (2013) 8382-8392.
- 11) M. Engholm, P. Jelger, F. Laurell, L. Norin, Improved photodarkening resistivity in ytterbium-doped fiber lasers by cerium codoping, *Opt. Lett.* 34 (2009) 1285-1287.
- 12) Y.W. Lee, S. Sinha, M.J.F. Digonnet, R.L. Byer, S. Jiang, Measurement of high photodarkening resistance in heavily Yb<sup>3+</sup>-doped phosphate fibres, *Electron. Lett.* 44 (2008) 14-16.
- 13) H.W. Chen, G. Chang, S. Xu, Z. Yang, F.X. Kärtner, 3 GHz, fundamentally mode-locked, femtosecond Yb-fiber laser, *Opt. Lett.* 37 (2012) 3522-3524.
- 14) H. Cheng, W. Wang, Y. Zhou, T. Qiao, W. Lin, Y. Guo, S. Xu, Z. Yang, High-repetition-rate ultrafast fiber lasers, *Opt. Express* 26 (2018) 16411-16421.
- 15) H. Cheng, W. Wang, Y. Zhou, T. Qiao, W. Lin, S. Xu, Z. Yang, 5 GHz fundamental repetition rate, wavelength tunable, all-fiber passively mode-locked Yb-fiber laser, *Opt. Express* 25 (2017) 27646-27651.
- 16) W. Wang, W. Lin, H. Cheng, Y. Zhou, T. Qiao, Y. Liu, P. Ma, S. Zhou, Z. Yang, Gain-guided soliton: Scaling repetition rate of passively modelocked Yb-doped fiber lasers to 12.5 GHz, *Opt. Express* 27 (2019) 10438-10448.
- 17) Y. Fujimoto, M. Nakatsuka, A novel method for uniform dispersion of the rare earth ions in SiO<sub>2</sub> glass using zeolite X, *J. Non-Cryst. Sol.* 215 (1997) 182-191.
- 18) Y. Yamasaki, Y. Kagebayashi, T. Hiraishi, K. Fujioka, Y. Fujimoto, 2.6-GHz fundamental repetition rate, Q-switched mode-locking Nd<sup>3+</sup>-doped single-mode silica fiber laser, fabricated by zeolite method, *Opt. Commun.* 497 (2021) 127151.
- 19) Y. Sakaguchi, Y. Fujimoto, M. Masuda, N. Miyanaga, H. Nakano, Suppression of photo-darkening effect in Yb-doped silica glass fiber by co-doping of group 2 element, *J. Non-Cryst. Sol.* 440 (2016) 85-89.
- 20) C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, U. Keller, Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking, *J. Opt. Soc. Am. B* 16 (1999) 46-56.
- 21) Y. Koyama, Y. Matsui, and Y. Fujimoto, "Passively Q-switched mode-locked fiber laser with 1-GHz fundamental repetition rate based on zeolite-fabricated Yb-Mg-doped silica glass", *Optics Communications*, 535, 2023, 129335.
- 22) 松本 悠暉・藤本 靖・小山 勇也：高濃度 YbMg 共添加ファイバを用いた連続モード同期パルス発振，レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会 (2026) B08-14p-I-05.