

小型超短パルスレーザー

山添 昇吾*, 加藤 雅紀*, 笠松 直史*

Ultra-compact Laser-diode-pumped Femtosecond Solid-state Laser

Shougo YAMAZOE*, Masaki KATOU*, and Tadashi KASAMATSU*

Abstract

We demonstrate a novel practical femtosecond laser source, which is, to our knowledge, the smallest in size and of potentially low cost. The innovation is the simple linear-cavity design utilizing soliton mode-locking induced by precise group velocity dispersion control. Average output power of 680 mW and pulse width of 162 fs were obtained at around 1,045 nm from a 980-nm laser-diode-pumped Yb³⁺: KY (WO₄)₂ laser. The pulse repetition rate was 2.8 GHz, leading to a pulse peak power of 1.5 kW, which is sufficient for biomedical imaging. The laser module including the laser diode pump system has a footprint of only 8×5 cm². Stable operation of 4000 hours was demonstrated with fluctuation of less than 10%.

1. はじめに

近年、パルス幅がフェムト秒 (10⁻¹⁵sec) 領域にある超短パルス光を用いたさまざまな応用研究が、医療・バイオ・電子産業分野を中心に活発に行なわれている。超短パルス光は、パルス幅の長い光や連続波に比べ、同じ平均出力 (繰り返し) では、より高いピークパワーを実現することができ、さまざまな非線形光学効果を誘起することが可能である。医療・バイオ分野では、多光子顕微鏡¹⁾、コヒーレント反ストークスラマン散乱 (CARS)²⁾、光コヒーレンス・トモグラフィ (OCT)³⁾ などの形態・機能イメージングや、近視治療手術⁴⁾、光線力学療法⁵⁾ などの治療の研究も活発に行なわれている。電気・電子産業などの加工分野においては、金属の高精細な穴あけ加工⁶⁾ やガラス等の難加工材への内部加工など、従来のナノ秒 (10⁻⁹sec) 程度の長パルスでは不可能な高品位な加工も実証されている。

しかしながら、超短パルスレーザーは、いまだ生産や臨床の現場に本格導入されていない。その大きな理由は、2つあると考えている。(1) 上述のような応用自体が、まだ試験研究の段階であり、競合技術に対する価値の評価が定まっていないこと、(2) 超短パルスレーザーの実用性が低いこと、である。ここで、ハードウェア起因である (2) に注目する。通常の超短パルスレーザーは、Ti:Sapphire結晶を用いたモード同期という動作形態の

レーザー装置であり、①光学定盤1台を占有する大型装置であること、②出力の安定性が低く、定期的な光学アライメント調整が必要であること、③価格も高価 (1台3,000万円程度) であること、という実用化をはばむ大きな課題を有している。これらの課題を仔細に検討した結果、われわれは、複雑で多くの光学部品で構成されたTi:Sapphire共振器光学系がそれら課題の根本原因であると判断した。

そこで、われわれは、上述の課題を解決し、さまざまな応用展開が可能な、簡素で小型 (手のひらサイズ) 共振器構造の超短パルス固体レーザーの研究開発に着手した。すでに当社では、写真印刷機「Frontier」用の露光光源として、連続波の緑・青色の超小型高安定固体レーザーを開発・製品化してきた^{7), 8)}。この開発過程において構築した固体レーザー精密実装技術をベースに、小型・高安定・低コストの世界最小の超短パルス固体レーザーを提案・原理実証した。本論文では、小型化のキーポイントと動作原理、および、レーザー動作特性について述べる。ピークパワーの目標は1kWとし、従来のTi:Sapphireレーザー (100kW ~ 1MW) よりは低いものの、生体および有機材料などに非線形光学現象 (多光子吸収・第2高調波発生・CARSなど) を誘起可能なレベルとして設定した。さらに、最低限の光学部品点数で構成された簡素な直線型レーザー共振器構造を基に、手のひらサイズの大きさ (共振器長<5cm) を目標仕様とした。

本誌投稿論文 (受理2008年11月11日)

* 富士フイルム (株) R&D 統括本部

先端コア技術研究所

〒258-8577 神奈川県足柄上郡開成町牛島577

* Frontier Core-Technology Laboratories

Research & Development Management Headquarters
FUJIFILM Corporation

Ushijima, Kaisei-machi, Ashigarakami-gun, Kanagawa
258-8577, Japan

Table 1に目標仕様を示す。

Table 1 Specifications of Ultra-compact Femtosecond Solid-state Laser.

ピークパワー	> 1kW
パルス幅	< 200fsec
平均出力	> 600mW
共振器長	< 5cm
縦返し	~ 3GHz

2. 小型超短パルスレーザーのコンセプト

Fig. 1のような構成のLD (laser diode) 励起レーザー発振器を創案した。可飽和吸収ミラーにより、モード同期動作を始動・安定化させることにより短パルス化する。小型化のキーポイントは大きく3つある。(1) 小型LD励起レーザー発振器, (2) 超短パルスレーザー制御技術, (3) 負分散出力ミラーの開発である。(1), (2) により, 小型化に伴う物理的課題を解決し, 共振器長5cmでも安定な超短パルス動作を可能とする。(3) は, レーザモジュールとして直線型共振器を構成する上で必須のキー部品である。

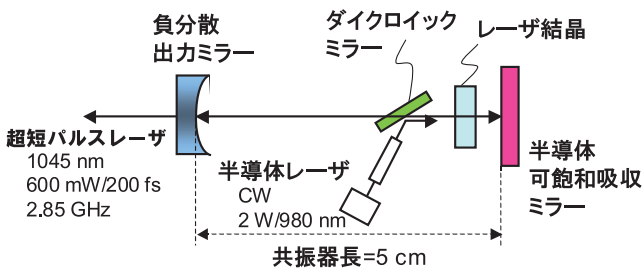


Fig. 1 Schematic diagram of ultra-compact femtosecond diode-pumped solid-state laser.

2.1 小型LD励起レーザー発振器

レーザー結晶として、励起光源に大型で高価な緑色固体レーザーを必要とするTi:Sapphire結晶に代わり、安価な半導体レーザーで直接励起が可能なYb系結晶を用いる。Yb系結晶は、蛍光帯域幅が広く超短パルス動作が可能で、高い量子効率 (>90%)、低い熱発生から高密度励起においても安定で高効率動作が可能である⁹⁾。ホスト結晶として、すでに200 fsec以下の超短パルス動作の報告がある、YAG [Y₃Al₅O₁₂], YVO₄, KYW [KY(WO₄)₂], KGW [KG(WO₄)₂], Y₂O₃, Sc₂O₃などを候補材料とし、発振出力特性を理論計算により比較した。数値モデルとして、下準位の分布数密度と励起分布と共振器モードのモード整合を考慮したレート方程式モデルを用いた¹⁰⁾。その結果、誘導放出断面積が大きく (>1 × 10⁻²⁰ cm²)、下準位Stark準位が比較的高いKYW, KGW, Y₂O₃が、励起パワー2Wにおいて目標平均出力600mW以上、およびパルス幅200fsec以下をクリアし得る有望結晶であ

ることがわかった。本論文ではYb:KYW結晶の動作特性にしばって議論する。

励起光学系は、セルフロックレンズ1枚で半導体レーザーの発光ビームをレーザー結晶におよそ光学像倍率1:2でしばり込む構成を採用した。共振器内に、レーザー発振波長に対し無反射 (R<0.1%), 励起波長に対し高反射 (R>95%) を呈するダイクロイックミラーを配置し、励起光を導入する。

2.2 超短パルスレーザー制御技術

本研究で最もキーとなったのはモード同期動作の安定制御である。小型化に伴い、繰り返し周波数が高くなり、同じ平均出力を仮定すると、1パルス当たりのエネルギーは小さくなっていく。パルスエネルギーがある閾値を下回ると、モード同期動作がきわめて不安定な動作様式に入り込むことが理論・実験の両側面から指摘されている¹¹⁾。パルスエネルギーが低くなると利得飽和が不十分となり、モード同期パルス列に長周期 (~ msecあるいはランダム) の望ましくない強度変動が重畳されることが確認されている。これをQスイッチモード同期と呼ぶ^{11), 12)}。

本研究においてもこの問題に直面し、共振器長30cm以下では安定したモード同期動作が困難であった。そこで、われわれはソリトン型モード同期法を採用することにより、上述の閾値エネルギーを低減させ、小型化することを試みた。ソリトン型モード同期とは、共振器内に負の群速度分散を導入し、光パルスが共振器を一周中にレーザー結晶や光学部品で生ずる正の群速度分散と自己位相変調による正チャープとを補償し、パルスの急峻化を図る手法である。すでに、フェムト秒パルス発生に適用されてきた手法であるが、本研究で初めて小型化の限界追及に積極的に利用した。

Fig. 2に、モード同期閾値のQスイッチパラメータ (QML) 依存性¹¹⁾を示す。QMLとは、レーザー結晶と可飽和吸収ミラーの特性から算出されるQスイッチ化しやすさの指標である。非ソリトン型モード同期では、可飽和吸収ミラーによるモード同期の自己開始は可能であるが、閾値エネルギーは80 ~ 140nJと大きく、共振器長は30cm程度が限界であることがわかった。ソリ

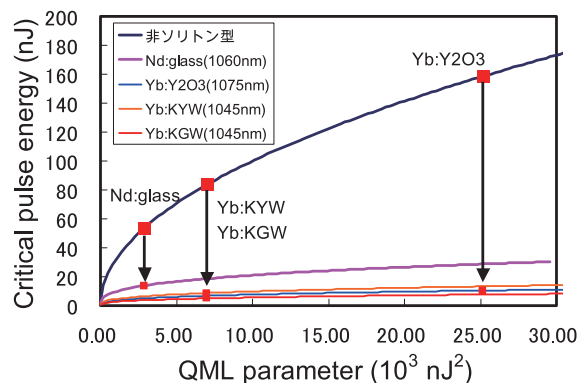


Fig. 2 Stable mode-locking critical energy as a function of Q-switched mode-locking parameter.

トン型を採用することで、閾値エネルギーは非ソリトン型の1/10以下(=共振器長で3cm以下に相当)にまで低減できることが理論的に判明した。Fig. 1の直線型共振器を想定し、材料物性(誘導放出断面積, 上準位寿命, 下準位数密度), 共振器内部損失, 可飽和吸収ミラー特性(反射深さ ΔR , 飽和フルエンス)から、適切な分散量は $-600 \sim -1,000 \text{fsec}^2$ 程度であることが算出できた。予備実験から、この分散量で所望のモード同期特性が得られることを確認している。

2.3 負分散出力ミラーの開発

Fig. 1のような直線型共振器を構成するには、分散補償と出力抽出の2つの機能を兼備したミラーが必要である。このようなミラーは市販されていないため、われわれは所望の分散量と透過率を実現するミラーの開発に新たに取り組んだ。その結果、干渉層を複数設けるタイプのGTIミラー(Gires-Tournois干渉計)にて分散量 -800fsec^2 , 透過率1.8%をレーザ発振の中心波長 $1045 \text{nm} \pm 10 \text{nm}$ で実現した。

2.4 超短パルス特性の原理実証

2.1節から2.3節の技術を統合し、Fig. 1の構成で、共振器長5cmにおいて平均出力680mW, パルス幅162fsec, 繰り返し2.85GHz, ピークパワー1.5kWの超短パルス動作を原理実証した。Fig. 3にパルス波形(自己相関波形), Fig. 4に光スペクトル波形を示す。スムーズなパルス波形が実現できている。

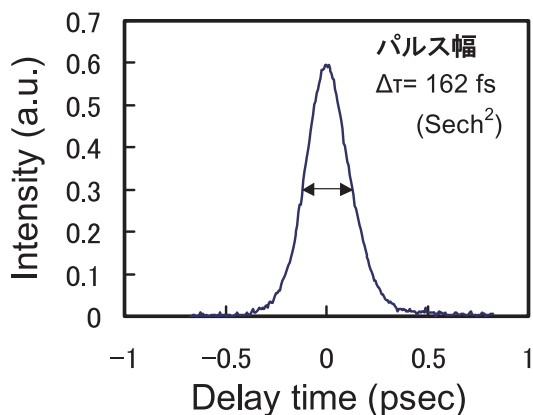


Fig.3 Auto-correlation trace of mode-locked pulse. Pulse width is measured to be 162 fsec.

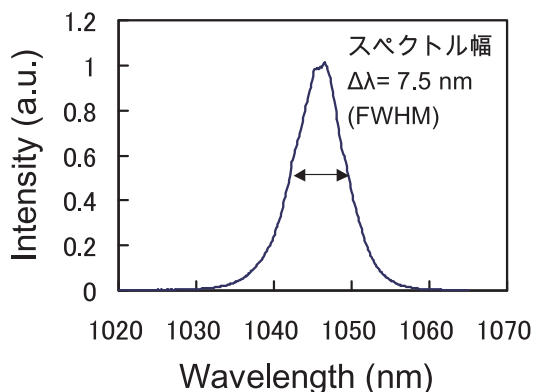


Fig. 4 Optical spectrum.

3. レーザモジュール試作と超短パルス特性

2章にて原理実証された構成を、より実用的なモジュールとしてパッケージ化した。共振器は銅製の一体型とし、レーザ結晶, 可飽和吸収ミラー, 負分散出力ミラーが共振器に接着固定されている。ここでは、可飽和吸収ミラーの吸収深さを $\Delta R=0.7\%$ とした。接着層の厚みと硬化収縮を厳密に管理することにより、温度変動や経時変化にきわめて強い共振器ミラーの保持が実現できる。

Photo 1に外観を示す。8cm(長さ)×5cm(幅)×3cm(高さ)のパッケージ内に、励起光学系を含むレーザ共振器を配置してある。このモジュールの出力特性は、平均出力740mW, パルス幅210fsec, 繰り返し2.85GHz, ピークパワー1.2kWであった。Fig. 5にパルス波形, Fig. 6にビームプロファイルを示す。ビーム品質は $M^2=1.4(x) \times 1.05(y)$ と良好であった。

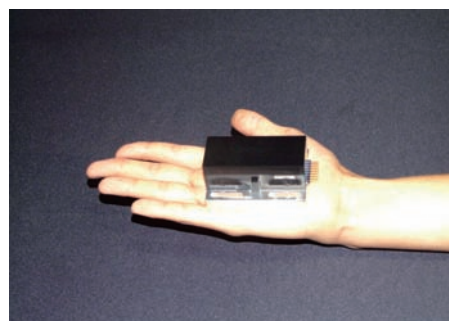


Photo1 Photograph of the exterior of ultra-compact diode-pumped femtosecond solid-state laser module.

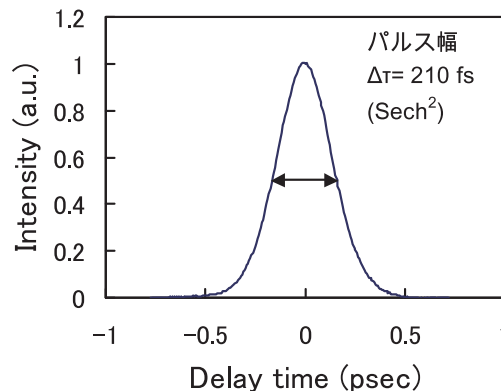


Fig. 5 Auto-correlation trace of mode-locked pulse of the laser module. Pulse width is measured to be 210 fsec.

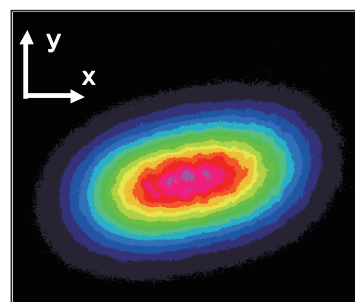


Fig. 6 Beam profile of mode-locked pulse.

このモジュールの電流一定駆動 (Automatic Current Control) による長期ランニング試験の結果を Fig. 7 に示す。この図から、駆動経過時間4,000時間において出力低下は20%程度に抑えられていることがわかった。一般的なモード同期レーザーでは、毎日または1週間程度の頻度での光学系のアライメント調整が前提の運用がなされている。本モジュールは、それら従来のモード同期レーザーに比べ、ミラーアライメントなどは一切行なっておらず、格段の安定度を示している。なお、出力低下の主原因は、外部より混入する塵埃、湿度に起因するミラーコーティングの劣化などと考えられ、パッケージの完全封止により、一層向上することも確認できている。

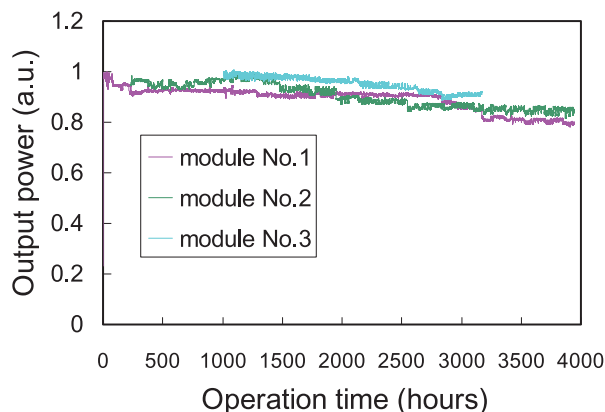


Fig. 7 Long-time operation of ultra-compact femtosecond laser module with automatic-current control.

さらに出力パワーをフォトダイオードでモニタすることで、出力パワー一定制御 (Automatic Power Control) で駆動した (Fig. 8)。駆動時間2,000hまで出力変動 $\pm 1\%$ で制御できており、きわめて高い安定性を実証した。

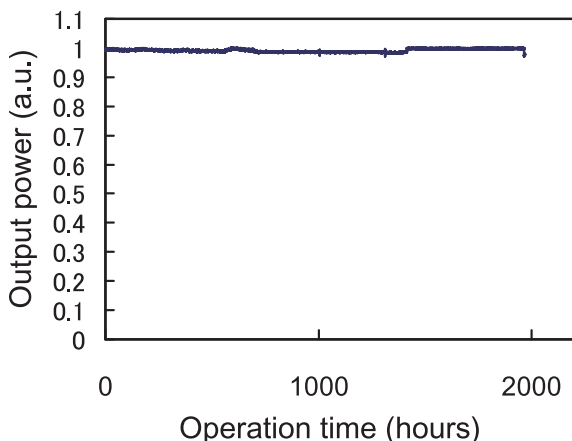


Fig. 8 Long-time operation of ultra-compact femtosecond laser module with automatic-power control.

4. まとめと今後の展望

超短パルスレーザーの実用性を飛躍的に高めるため、小型化に主眼を置いて研究開発を進めてきた。小型化において課題となるモード同期の不安定動作を、ソリトン型モード同期法を採用し、分散補償を精密に行なうことと、負分散出力ミラーの新規開発により解決し、きわめて安定な小型モジュールを実現した。サイズは世界最小であり、生体・有機材料に非線形光学効果を起こし得るピークパワー (>1kW) と、通常モード同期レーザー (80 MHz) の30倍の2.9GHzにも達する高繰り返しという特徴を有する。今後、この特徴を活かし、本モジュールのさまざまな応用展開を図っていく予定である。

参考文献

- 1) W.R. Zipfel; R.M. Williams; W.W. Webb. *Nature Biotech.* **21**, 1369-1377 (2003).
- 2) J.-X. Cheng; Y. K. Jia; G. Zheng; X.S. Xie. *Biophys. J.* **83**, 502-509 (2002).
- 3) W. Drexler; U. Morgner; F.X. Kärtner; C. Pitris; S.A. Boppart; X.D. Li; E.P. Ippen; J.G. Fujimoto. *Opt. Lett.* **24**, 1221-1223 (1999).
- 4) T. Juhasz; F.H. Loesel; R.M. Kurtz; C. Horvath; J.F. Bille; G. Mourou. *IEEE J. Sel. Topics in Quant. Electron.* **5**, 902-910 (1999).
- 5) M. Khurana; H.A. Collins; A. Karotki; H.L. Anderson; D.T. Cramb; B.C. Wilson. *Photochem. Photobiol.* **83**, 1441-1448 (2007).
- 6) 藤田雅之, 橋田昌樹. *J. Plasma Fusion Res.* **81**, 195-201 (2005).
- 7) 大谷薫明, 梅本真, 松本正幸. 富士フイルム研究報告. No.42, 1-9 (1997).
- 8) 原田明憲, 二瓶靖和, 岡崎洋二, 神山宏二. 富士フイルム研究報告. No.48, 22-27 (2003).
- 9) P. Lacovara; H.K. Choi; C.A. Wang; R.L. Aggarwal; T.Y. Fan. *Opt. Lett.* **16**, 1089-1091 (1991).
- 10) W.P. Risk. *J. Opt. Soc. Am. B.* **5**, 1412-1423 (1988).
- 11) C. Hönninger; R. Paschotta; F. M.-Genoud; M. Moser; U. Keller. *J. Opt. Soc. Am. B.* **16**, 46-56 (1999).
- 12) H. A. Haus. *IEEE J. Quant. Electron.* **12**, 169-176 (1976).