

ナノ秒ファイバ型パルスレーザーの開発

Development of Nano Second Pulsed Laser using Polarization Maintaining Fibers

松下 俊一^{*、*2}
Shun-ichi Matsushita

宮戸 泰三^{*、*2}
Taizo Miyato

橋本 博^{*、*2}
Hiroshi Hashimoto

大谷 栄介^{*2}
Eisuke Otani

内野 竜嗣^{*2}
Tatsuji Uchino

藤崎 晃^{*、*2}
Akira Fujisaki

概要 物質に入力する光エネルギーを時間的に制御できるパルスレーザーは、レーザー加工分野のマーキングや微細加工で活用が進んでいる。近年、ファイバ型パルスレーザーの登場により、高信頼、高輝度、メンテナンスフリーなどの特長から、これまで主流であったCO₂レーザーやYAGレーザーからファイバ型パルスレーザーへ置き換えが急速に進んでいる。スループットの向上や加工材料の適用範囲拡大のため、平均出力の増大や直線偏光出力、パルス幅や繰り返し周波数の可変性が求められる。当社では、これらの要請を満たすため、外部変調型と直接変調型のパルス光源を用い、その出力を偏波保持型YDF光増幅器で増幅するMOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 構成の偏波保持ファイバ型パルスレーザーを開発した。波長1064 nm、繰り返し周波数1 MHz、パルス幅は100 ns及び10 nsにおいて、最大出力70 W及び13 Wを実現した。

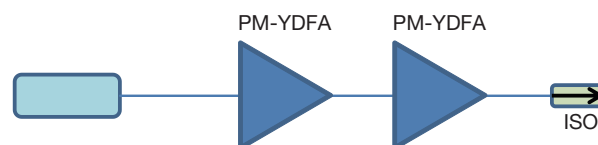
1. はじめに

近年、ファイバレーザーの高出力化が進み^{1)~3)}、CO₂レーザーやYAGレーザーが主流であった金属の溶接や切断、マーキング、半導体やセラミックのスクライビングなど、レーザー加工分野でその置き換えが進んでいる。これらレーザー加工の多くは、光が物質に吸収されて発生する熱による溶融や材料の物性変化及び変質を利用する。セラミックスや半導体、シリコン、特にプラスチックなどの樹脂や複合材料は、熱の影響により加工部周辺の材料が劣化しやすく、加工品質の低下がおこる。加工品質を向上するには、入力する熱量を高精度に制御する必要があるため、光エネルギーを時間的に制御できるパルスレーザーが利用される^{4),5)}。ファイバ型パルスレーザーとして、共振器のQ値を変化させて光パルスを発振させるQ-Switch方式により、数10~100 kHz、数10 W出力が実用化されており、小型、簡易かつメンテナンスフリーなどのメリットから、マーキング用に多く使われている。チタンやステンレスなどの金属のマーキングでは、光パルスの時間幅やエネルギーなどの諸条件を高精度に制御することで金属表面に彩色ができるため、携帯電話やカメラなどの印字や装飾など、パルスレーザーを用いた加工応用が広がり始めている。

ファイバ型パルスレーザーは、ファイバ中の非線形効果や部品の入力パワー制限のため、平均パワーや光パルスのエネルギーを上げることが難しい。加工のスループット向上や加工条件範

囲を拡大するには、平均パワーの向上のほか、繰り返し周波数の高速化や波長変換のため定偏波出力が必要である。また、加工技術の進展や応用範囲の拡大のため、パルス幅やパルスエネルギーのみならず繰り返し周波数などの光学パラメータの制御性の向上が求められている。

上述の要請を満たすため、当社では、外部変調型と直接変調型のパルスSeed光源を用いた、MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 構成^{図1}の高繰り返し、高出力の偏波保持ファイバ型パルスレーザーを開発した。



Seed pulsed laser (PM)
Fiber laser + external mod.
Direct modulated Laser Diode

PM-YDFA : Polarization Maintaining double clad Ytterbium Doped Fiber Amplifier

ISO : Isolator

図1 ファイバ型パルスレーザー (MOPA) の基本構成
Configuration of a Pulsed Fiber Laser
(MOPA : Master Oscillator Power Amplifier)

* 情報通信カンパニー次世代レーザー事業推進チーム

*2 研究開発本部ファイバフォトニクス研究所 光伝送部品開発部

2. ファイバ型パルスレーザ

光パルス発生方法は主に、光変調器などの光学シャッタを光共振器内に配置し、時間的に共振器のQ値を変化させ光パルスを発振させる Q-switch発振方式、CWレーザからの出力をAOM (Acousto-Optical Modulator) やLN (LiNbO₃:ニオブ酸リチウム) 光強度変調器などで光パルスを切り出す外部変調方式、Seedレーザの励起電流を直接変調し発振を時間的に制御する直接変調方式がある。表1にファイバ型パルスレーザの光パルス発生方法と特長を示す。

表1 ファイバ型パルスレーザのパルス発生方法 (代表例)
Methods of optical pulse generation of pulsed fiber laser (typical example)

	Q-Switch方式	外部変調方式 (AOM)	直接変調方式
パルス幅	数10 ns ~ 数100 ns	約30 ns ~	数100 ps ~
繰り返し周波数	数10 kHz ~ 50 kHz	数10 kHz ~	数10 kHz ~
特徴	高パルスエネルギー	パルス幅も繰り返し周波数可変	

Q-Switch発振方式は、共振器中にAOMなどの光スイッチング素子を配置することで光パルス発振が行えるため、部品点数が少なく、比較的エネルギーの高い光パルスを発生させやすい。一方、繰り返し周波数やパルス幅は共振器の特性に依存するため、それらの値はある範囲に制限される。

外部変調方式は、レーザ発振とパルス生成が物理的に切り離されるため、これらを上手に組み合わせることで、出力波長やスペクトル特性、時間波形や繰り返し周波数などのレーザの特性を目的に合わせた柔軟な設計が可能である。

直接変調方式は、半導体レーザの駆動電流を直接変調するため、外部変調方式と同等の特性を有しながら、部品点数の削減が行える利点がある。これら外部変調方式や直接変調方式のSeedレーザから出力される光パルスのパワーは、Q-Switch発振方式と比較して小さい。レーザ加工に必要なパワー及びパルスエネルギーを得るには、高利得、高出力のファイバ型光増幅器が必要になる。そのため、光増幅器に使うファイバ長が長くなりやすく、ファイバ中の非線形効果によるエネルギー拡散や波形歪などを回避する技術開発が必要である。

3. Seedパルスレーザの開発

3.1 外部変調方式

CWレーザを種光源とし、AOMやLN光強度変調器により時間的に光を切り出すことで光パルスを生成する外部変調方式は、CWレーザと外部変調器の組み合わせで、パルスの波形や時間幅、繰り返し周波数などの基本特性が決まる。

光シャッタとして一般的に用いられるAOMは、比較的高出力に対応するものの、動作帯域を高くすると開口が小さくなる

トレードオフの関係がある。ファイバインライン型の場合、AOMへの入出力に用いるコリメータのパワー耐性や、開口の大きさに起因する結合損失の量で入出力パワーの上限が決まる。現状、変調周波数が数100 MHz、光入力为数W、光パルス時間幅が数10 ns ~ 100 ns程度が、実用的な値である。外部変調器は、AOMの他、LN光強度変調器がある。光情報通信の高速化により、10 GHz程度の高速度電気信号発生器やドライバICなどが入手可能になり、100 psレベルのパルス生成が比較的容易になった。しかし、入力パワーが数100 mW程度とAOMと比較すると一桁低く、後段の光増幅を考慮するとASE (Amplified Spontaneous Emission) 発生によるSNR (Signal to Noise Ratio) の低下が否めない。

以上を踏まえ、本開発では、高出力・高エネルギー光パルス出力を目的に、ファイバレーザからのCW光を、ファイバインライン型のAOMで時間的に切り出す方式を、外部変調方式のSeedパルス光源に利用する。

図2に外部変調方式のファイバ型パルスレーザの光学構成を示す。ファイバレーザの共振器は偏波保持型イットリビウムダブルクラッドファイバ (PM-YDF: Polarization Maintaining Double Clad Ytterbium Doped Fiber) をFBG (Fiber Bragg Grating) で作成したHR (High Reflection Mirror) 及びOC (Output Coupler) で挟むことで構成されている⁶⁾。中心波長の安定化のためFBGは温度補償パッケージに収められている。FBGの中心波長の温度依存性 (赤線)、温度補償後の特性 (青線) を図3に示す。温度補償を行うことで、-40℃ ~ 80℃の領域で中心波長がほぼ一定であることがわかる。

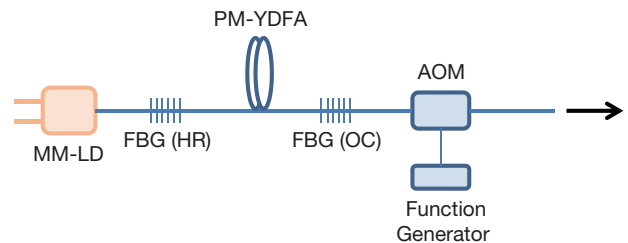


図2 外部変調方式のSeedパルス光源の基本構成
Configuration of pulsed seed laser using external modulation.
MM-LD: Multi Mode Laser Diode

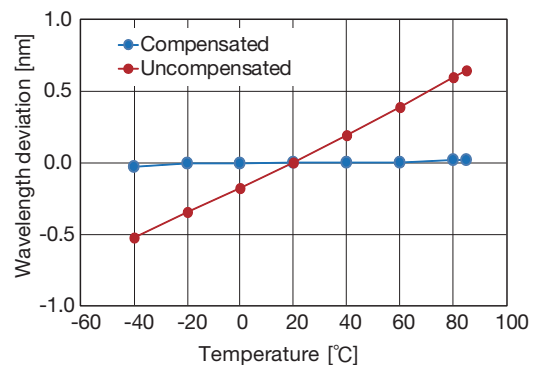


図3 FBGの中心波長の温度依存性 (赤線) と温度補償パッケージによる中心波長の温度依存性 (青線)
Temperature dependence of center wavelength of FBG. Uncompensated (Red), Compensated (Blue)

偏波保持イットリビウムファイバレーザからの出力は、150 MHzの帯域を持つAOMに入力され、100 ns程度の光パルスに切り取られる。繰り返し周波数は1 MHz、光パルスのピークパワーは約1.5 Wである。電気信号と光パルス波形を図4に示す。100 nsの矩形電気信号に対し、約88 nsの光パルスが生成されている。

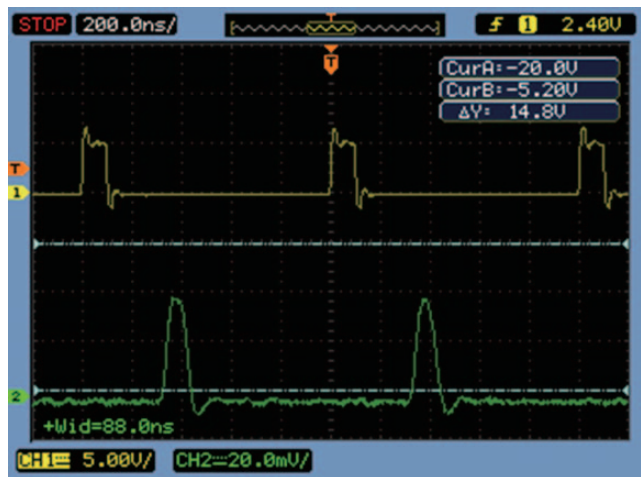


図4 外部変調方式のSeedレーザからの出力波形特性 (黄色:変調電気信号, 緑色:光パルス波形)
Output pulse shape from pulsed seed laser using external modulation. Pulse shape, modulation signal (Yellow), Optical pulse shape (Green).

3.2 直接変調方式

半導体LDの駆動電流を直接変調する直接変調方式は、外部変調器と同様に、GHz帯域のドライバICや半導体LDにより、10 ns以下の光パルス発生が簡易かつ安価にできるようになった。直接変調方式はDuty比が小さい場合でも、LN変調器のようにゼロレベルのドリフトを制御する必要がない。更に、半導体LDは高速応答特性に優れるため、主に100 ns以下のパルス生成や、光パルスの任意波形成形、GHz帯域までの高繰り返し化が可能である。LDの制御温度を調整することで、中心波長の調整も可能である。図5に半導体LDの直接変調による光パルスの時間波形を示す。

パルス幅、5 ns ~ 100 nsの範囲で制御性良く光パルスが出力されていることがわかる。パルスピークパワーは約100 mWである。

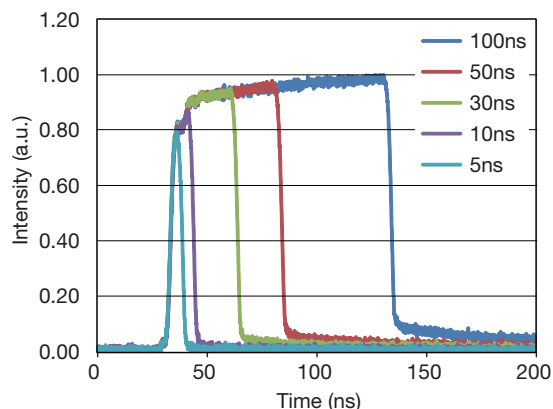


図5 直接変調方式による光パルスの時間波形 (パルス幅 5 ns ~ 100 ns, 繰り返し周波数100 kHz時)
Optical pulse shape from direct modulated Laser Diode. (5 ns - 100 ns at 100 kHz)

3.3 パルスレーザ駆動用制御回路

AOMやLN強度変調器、半導体LDを制御するため、プログラム可能なデジタル電気信号を発生し、Seed用LDや励起用LDの駆動電流を制御する制御基板を開発した。図6に制御ブロック図を示す。

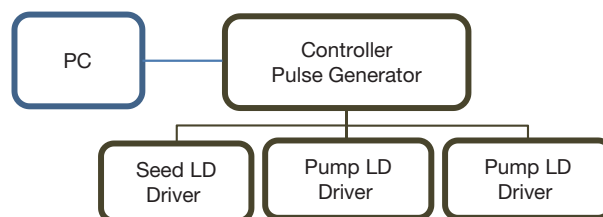


図6 パルスレーザ制御基板の制御ブロック図
Control block diagram of pulsed laser control board.

制御基板は、各モジュール制御基板に制御信号を送り、変調信号や、LD駆動電流、温度を制御する。各光出力はモニタされ、出力一定制御やシャットダウンなどの安全機能、外部からのON/OFF信号、PCからのコマンド入力に対し、動作ルーチンを安全に遂行する機能を有する。

4. 光パルス増幅器

開発した2種類のパルスSeedレーザは、図1に示すように、2段の偏波保持イットリビウムダブルクラッドファイバ光増幅器で所望の出力まで増幅する。光パルス増幅器の構成を図7に示す。

入力光パルスは、PM-TFB (Tapered Fiber Bundle) を介し、イットリビウム添加ファイバに入力される。励起光にはマルチモードレーザダイオード (MM-LD) を使い、TFBにより最大18台まで接続可能である。本構成の光パルス増幅器では、プリアンプに1台、ブースタアンプに6台の25 W MM-LDを接続している。ブースタアンプは最大150 Wの励起が可能である。各アンプは、ファイバ中のSRS (Stimulated Raman

Scattering) の発生を最小限に抑えるため、ファイバ長と利得を最適化した。

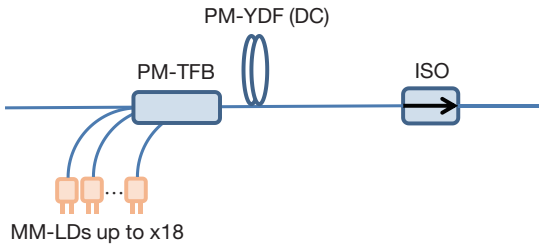


図7 イットリビウムファイバ光増幅器の構成
Configuration of the Polarization Maintaining Ytterbium Doped double clad Fiber Amplifier.

4.1 外部変調方式パルスの増幅

図8に外部変調方式パルスSeed光を増幅した結果を示す。

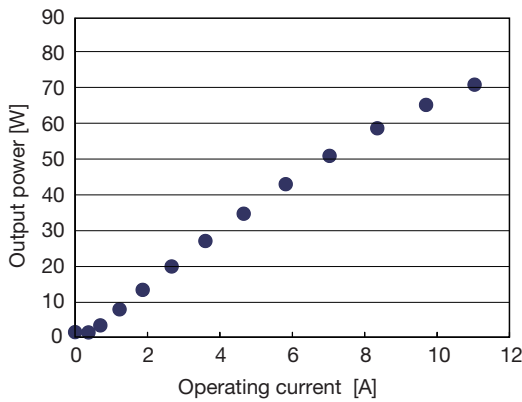


図8 外部変調方式パルスレーザの出力特性 100 ns, 1 MHz
Output Power from MOPA using External Modulation. 100 ns, 1 MHz.

パルス時間幅は100 ns, 繰り返し周波数は1 MHzである。出力は70 W超を示している。出力パワーの最大値を制限する一つの要因は、ラマン散乱光の増加であるが、光増幅器の特性を最適化することにより、信号出力に対しおおよそ-19 dBに抑えられた。図9に70 W出力時の光スペクトルを示す。70 W出力時の励起光-信号光エネルギー変換効率率は、約45%である。

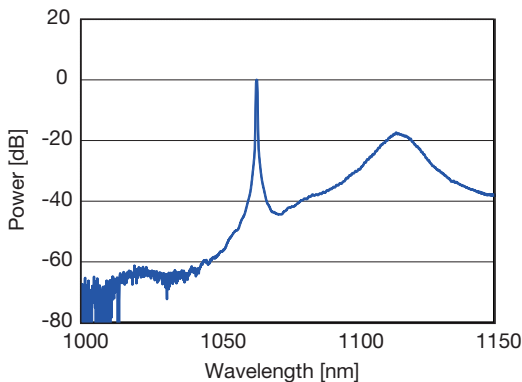


図9 外部変調方式パルスレーザの出力スペクトル (70 W出力時)
Spectrum of output from an MOPA using External Modulation (70 W).

4.2 直接変調方式パルスの増幅

直接変調方式光パルスSeed光を増幅した結果を図10に示す。パルス幅10 ns, 繰り返し周波数1 MHzで、出力は13 W以上を得た。出力7 Wにおけるスペクトルを図11に示す。

ブースタンプの利得やファイバ長の最適化を行うことで、信号-SRS比50 dB以上を実現した。この時の励起光-信号光エネルギー変換効率率は、約29%である。

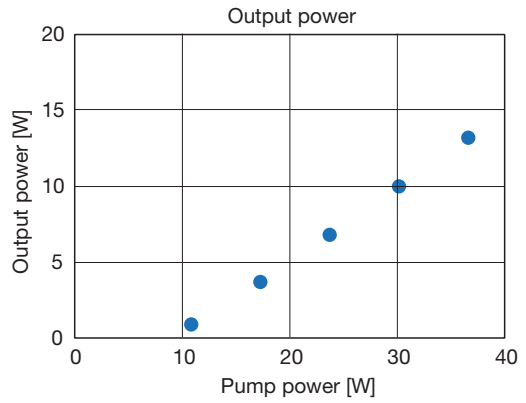


図10 直接変調方式パルスレーザの出力特性 10 ns 1 MHz
Output power from an MOPA using direct modulation. 10 ns, 1 MHz.

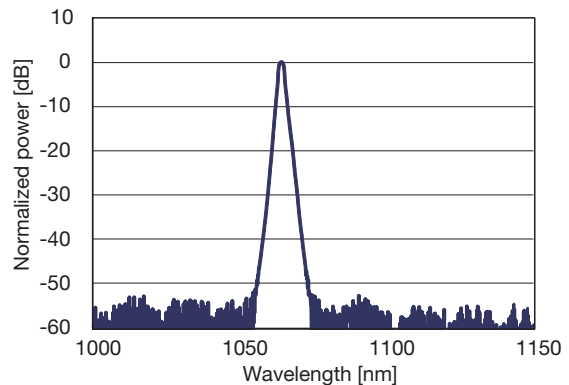


図11 直接変調方式パルスレーザの出力スペクトル 10 ns, 1 MHz 7 W時
Spectrum of output from an MOPA using direct modulation. 10 ns, 1 MHz, 7 W.

5. 出力安定性とビームプロファイル

図12に外部変調方式のパルスレーザの出力安定性を示す。平均出力70.5 Wに対し出力安定度は±1.6%と良好な結果を示した。これは、Seedパルスの出力及び光増幅が安定しているほか、ファイバ中の偏波変動も小さいことを示している。出力光の偏光消光比は20 dB以上であった。

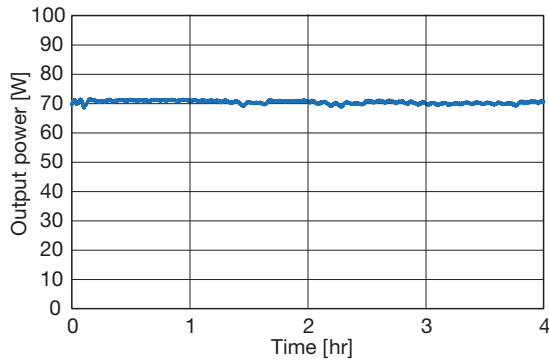


図12 外部変調方式の出力安定性 100 ns, 1 MHz 70 W時連続測定 4 h, 出力安定度 $\pm 1.6\%$
Power stability of an MOPA using external modulation. 4 hours operation, The deviation from the mean is $\pm 1.6\%$ at 100 ns, 1MHz, 70 W.

出力アイソレータからの出力光ビームプロファイルを図13に示す。ビームはほぼガウシアン形状を示し、ビーム品質を表す M^2 は1.33以下であった。レーザー加工向けのファイバ型パルスレーザーとして十分な性能を示している。

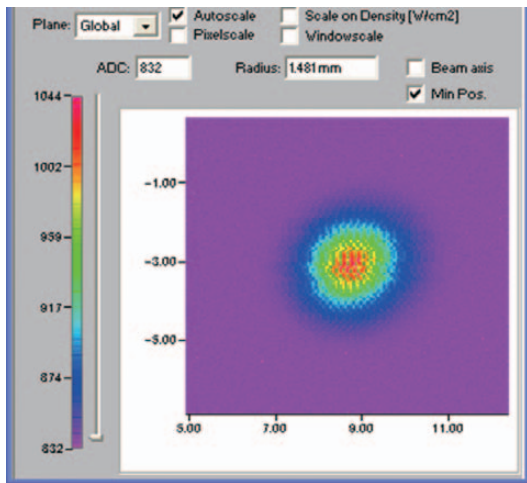


図13 外部変調方式パルスレーザーの出力光のビームプロファイル (アイソレータから100 cm)
Beam profile of the output from the MOPA using external modulation. (100 cm from the Isolator.)

6. おわりに

高光出力・高繰り返しを目的として、外部変調方式、直接変調方式を用いた2種類の偏波保持ファイバ型パルスレーザーを開発した。

ここで用いられた技術は、光通信分野で飛躍的な発展を遂げている高速光変調技術、高出力光ファイバ増幅技術、偏波保持型ファイバや光部品の高出力化及び接続技術、各種非線形効果抑圧技術がその背景にある^{7),8)}。

非線形効果の抑圧や利得を含めた光ファイバ増幅パラメータの最適化により、外部変調方式では、100 ns, 1 MHz時に平均70 Wを超える出力を実現した。出力は平均値に対し $\pm 1.6\%$ の安定度を有し、偏光消光比は20 dB以上を示した。また、直接変調方式では、10 ns, 1 MHz時に13 W超の出力を実現した。

レーザーの一つのパラメータであるレーザー出力の偏光は、これまで多くのファイバレーザーでは時間的に変動するものであった。本パルスレーザーは、偏波保持ファイバや接続技術を駆使することにより、安定した直線偏光出力を実現している。ファイバ出力による高輝度特性もあり、例えば波長変換技術と組み合わせることで、532 nm帯や355 nm帯への波長領域の拡大につながる。今後、レーザー加工応用にとどまらず、バイオ・医療などの検査装置やエネルギー分野などで、新しい応用技術を実現するツールになることを期待する。

謝辞

本研究開発は、NEDO「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」の一部で実施した。

参考文献

- 1) D.J. DiGiovanni and M. H. Muendel, "High-power fiber lasers and amplifiers." Optics & Photonics News, 26, (1999)
- 2) Y. Jeong, J.K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson. "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW continuous-wave output power" ASSP, PDP, (2004)
- 3) A. Tunnermann T. Schreiber, J. Limpert, "Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution" Appl. Optics, Vol. 49, No.25, (2010)
- 4) レーザー加工ハンドブック, オプトロニクス
- 5) レーザーハンドブック, レーザー学会
- 6) 藤崎晃, "ファイバーレーザーの線幅制御と50 W出力偏波保持出力" 電工時報 123号 (2009)
- 7) 田代至男, "高出力光アンプの開発" 電工時報 104号 (1999)
- 8) 松下俊一 "ファイバ型繰り返し周波数可変超短パルス光源の開発" 電工時報 122号 (2008)