2μmツリウム添加ファイバレーザでピークパワー 10kW達成

シービン・チャン

ツリウム高濃度添加ケイ酸塩ガラスファイバを使用して、1.9～2.1μm動作波長の単一周波数ファイバレーザ、Qスイッチファイバレーザ、自動起動パッシブモードロックファイバレーザを開発することができる。ピークパワーは10kW。

ツリウム（Tm）添加ファイバレーザのスロープ効率はストークスリミットを超えることができ、Tmイオン間のいわゆる交差緩和エネルギー転移により、$^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$転移の量子効率が約200%となる。ロッド・イン・チューブ法で製造した当社のTm^{3+}高濃度添加（3～7wt%）ケイ酸塩ガラスファイバを使うと、68.2%の高いスロープ効率、単位長あたりの利得が>2dB/cmとなるレーザ利得ファイバが得られる。これを用いて当社はQスイッチファイバレーザおよびモードロックファイバレーザを実証した。これは、Tm添加ケイ酸塩ファイバベースとしたもので、動作波長1.9～2.1μm、ピークパワー10kWを達成した。

シングルモードファイバからの高いピークパワーと高いビーム品質を持つ2μmファイバレーザの一般的な用途の1つは、非線形光変換による中赤外（mid-IR）周波数生成のための励起光源である。その他の新しいアプリケーションとしては、中赤外スーパーコンティニウム生成がある。

Tm^{3+}高濃度添加ケイ酸塩ファイバ

1μmおよび1.55μm光源と比べると、2μmレーザ光源の方が中赤外生成用の励起光源として有利である。理由はいくつかあって、まず2μmでは量子欠陥が低いので、中赤外波長生成で量子効率が高くなる。次に、中赤外生成に使用する非線形結晶の多くは、2μmよりも短波長の励起波長ではトランスペアレントではなく、吸収が遙かに高い。3番目に、非線形結晶の中には短波長で分散が高くなりすぎるものがあり、非線形パラメトリック過程に向けた位相整合ができない。最後に、2μmファイバはコアサイズが大きく、非線形閾値が高いので、ハイパワー2μmファイバレーザが実現可能になり、結果的にハイパワーの中赤外出力が得られる。

これまで、多くの異なるガラスホスト材料を利用して2μmレーザ動作向けにTm^{3+}添加光ファイバを作製してきた。シリカ（石英）、ゲルマニウム酸塩テルライトベースのノンシリカガラスファイバなどだ[(1)～(3)]。よく知られているように、シリカファイバへの希土類添加濃度には限界がある、これはガラス固有の網目構造による。添加濃度を高めるために様々なアプローチが開発されてきた。Al_2O_3, B_2O_3, P_2O_5など酸素との共添加、ナノパーティクル技術を用いるものなどがある。シリカガラスへの最高添加レベルは、約2wt%が限界となっている。Tm^{3+}添加濃度に限界があるため、Tm^{3+}添加シリカファイバレーザの量子効率にも限界がある。

幸い、多成分ノンシリカガラスでは網目構造があまり確定的ではないため、Tm^{3+}イオンの添加濃度を高くすることができる、つまり相対的に短い

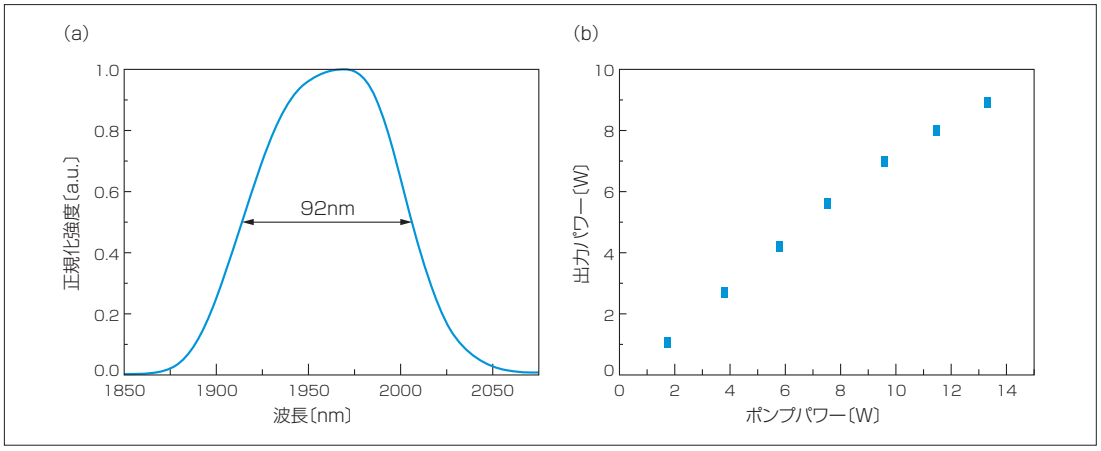


図1　Tm^{3+}添加ケイ酸塩ガラスファイバのASE（a）によって、クラッドポンプの2μm Tm^{3+}添加ケイ酸塩ガラスファイバレーザ（20－cm長、18μmコア径ファイバ）で798nmポンプ光吸収に応じた出力（b）を持つレーザの作製が可能になる。

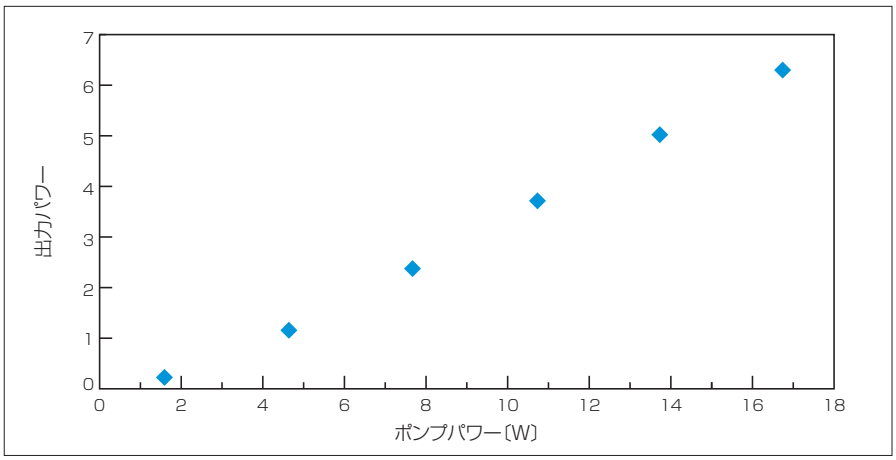


図2　出力パワーは、Qスイッチツリウムパルス増幅器のポンプパワーの関数で示している。

アクティブファイバで高い励起吸収が得られる。したがって、高濃度ドープのTm^{3+}システムでは1回の交差緩和プロセスを2倍に利用することができる。アドバリュー・フォトニクス社（AdValue Photonics）は、Tm^{3+}高濃度ドープ（約3～7wt%）の多成分ケイ酸塩ガラスとファイバを製造する独自の技術を開発した。ガラス網目構造の主要部は二酸化ケイ素（SiO_2）であり、これは標準シリカガラスファイバと同じ材料であるので、ドープファイバは機械的強度が改善され、他の多成分ガラスファイバと比べるとシリカファイバとの親和性が向上するため、アクティブファイバと標準パッシブシリカファイバとの融着接続がより強固になる。

シングルモードとラージ・モード・エリア（LMA）ダブルクラッドケイ酸塩ガラスファイバのいずれもロッド・イン・チューブファイバ線引技術を用いて製造する。これらアクティブファイバの内部クラッドは、周囲にNA0.6の外部クラッドケイ酸塩ガラス層を持ち、マルチモード励起レーザビームを内部クラッド域に閉じ込める。外部クラッドにより、標準的なポリマベースのダブルクラッドシリカファイバよりもパワー耐性が高くなっている。

通常、低屈折率のケイ酸塩ロッドを内部クラッドに挿入してクラッドの励起光吸収を高めている。同じ製法で、Tm^{3+}高濃度ドープ偏波保持ケイ酸塩ガラスファイバも製造している。これは、68%以上のスロープ効率のクラッドポンプレーザ動作をターゲットにしている（**図1**）。

Qスイッチ単一周波数ツリウムファイバレーザ

2011年、アドバリュー・フォトニクス社は、波長2μm近傍で初のオールファイバQスイッチ単一周波数レーザを実証した。これは、応力誘導複屈折を用いた短キャビティファイバレーザ偏光変調をベースにしている[(4)～(6)]。Qスイッチモードの単一周波数レーザ動作は、内製のファイバベーススキャニングファブリペロ干渉計を用いて確認した。また、スペクトル線幅は計測によりフーリエトランスフォームリミットとなっていた。

現在、Qスイッチパルスの出力を高めるためにシングルモードTm^{3+}添加ファイバ増幅器（ファイバコア7.8μm、NA=0.153）を用いて、オールファイバTm^{3+}添加光源からキロワット級単一周波数レーザパルスを生成しようとし

Every image is a work of art!
The **pco.dimax HD** unites innovative CMOS and electronics technology – for exceptional results in industrial applications and in off-board use for automotive safety tests!
The **pco.dimax HD** offers an amazing frame rate (1547 images/s), dynamic range (12 bit) with high resolution (1920×1080 pixel) and exceptional image quality.

pco.
www.pco.de
in America: www.pco-tech.com

ている[7]。励起光吸収もレーザ利得も高いので、2μmファイバ増幅器の実現には数10センチメートル長のアクティブファイバで足りる。20cm長のアクティブファイバで、トータル励起パワーに応じた増幅レーザパルスのスロープ効率は繰り返しレート50kHzで約64%、繰り返しレート10kHzで40%となっている。

低い繰り返しレート(10kHz以下)では、増幅器のパルス幅はそのままにして、マルチキロワットのピークパワーも可能。短尺アクティブファイバとすることで、多くの非線形効果が抑圧される。また、単一周波数のパルス幅が短くなることで誘導ブリルアン散乱(SBS)の始まりを抑える。ファイバ増幅器の中だけでなく、増幅器に接続した長いパッシブファイバでもSBSが抑制される。

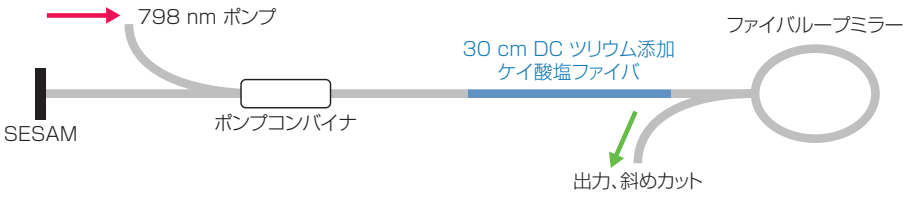


図3 概略図はモードロックTm^{3+}添加ケイ酸塩ガラスファイバレーザを示す。

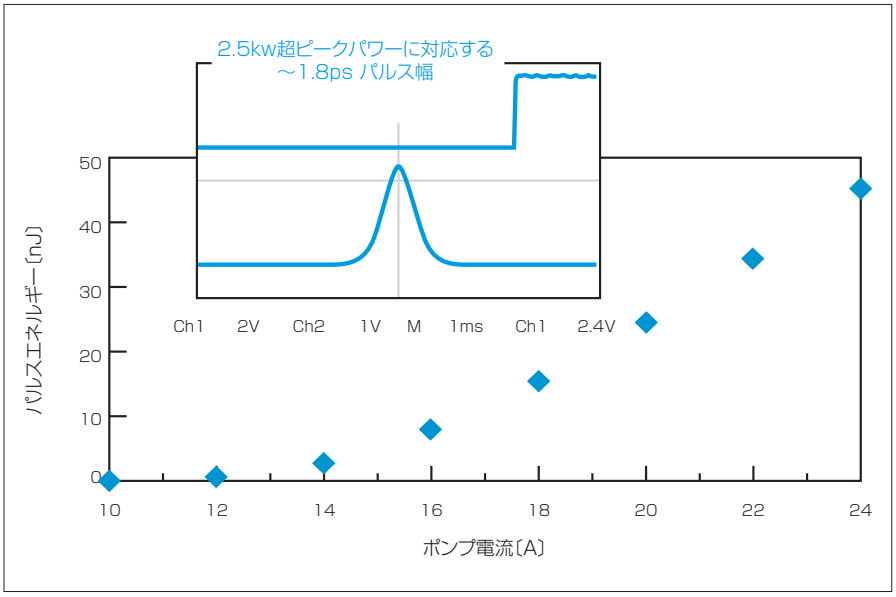


図4 出力パルスエネルギーは、ツリウム添加増幅ファイバを用いたパルス増幅励起のための電流の関数で示している。挿入図は、自己相関量。

Qスイッチツリウムファイバ増幅器

この実験では、Qスイッチシード光に、オールファイバアクティブQスイッチTm添加ファイバレーザを用いている。シード光は、1950nmで動作し、繰り返しレートは1~100kHz可変。繰り返しレート10kHzで、平均出力は30mW、パルス幅は約30ns。パルスエネルギーを高くするために、パワーアンプの前にプリアンプを設置している。

プリアンプからの出力が、10kHzで200mWの時、パルス幅は26.4ns。50kHzで増幅パルスのスペクトラムは、10kHzの時のシード光と同じパルス幅であるが、繰り返しレート減少(プリアンプの励起パワーは不変)にしたがって、スペクトラム幅は広がる。これは、繰り返しレート減によりピークパワーが高くなるためである。

パワーアンプは、55cm長のTm^{3+}添加(5wt%)偏波保持ファイバを使用している。コアと内側クラッド径は、それぞれ21μm、127μm。コアNAは0.08で、これはポンプコンバイナの出力ファイバ(コア径20μm、NA0.08)と整合するように設計している。10kHz、20μJ入力で、パワーアンプ出力のスロープ効率は約40%、最大出力でパルス幅は21.4ns。

16Wの励起光を吸収したパワーアンプ後のレーザスペクトラムは、スペクトラムアナライザを用いて様々な繰り返しレートで確認している。これにより、40kHzのパルスで、増幅自然放出光(ASE)が非常によく抑制されていることが示されている。ASEは、20kHzで増え始め、10kHzでは非常に強くなるが、それでもパルスよりも40dB下にある。ASE抑制が大きいのは、短尺ラージコア高濃度Tm添加ケイ酸塩ファイバによるものである。10kHzで計測したスペクトラムをベースにして計算したASEパワーは、総出力の5%以下となる。したがって、増幅器から得られる最大パルスエネルギーは、ピークパワー28kWまでで約600μJとなる。

モードロックファイバレーザ

モードロックTm^{3+}添加ケイ酸塩ガラスファイバレーザのモードロック動作を開始し、維持するために用いる重要エレメントは、共振アンチモン(Sb)-ベース半導体可飽和吸収ミラー(SESAM)である(**図3**)。このレーザは、SESAM、ポンプコンバイナ、コア径10μmの30cm長ダブルクラッドTm^{3+}添加ケイ酸塩ファイバおよびファイバループミラ

ーで直線キャビティを形成している。マルチモードポンプコンバイナは波長798nmの励起レーザダイオードからの励起光をTm^{3+}添加ファイバに0.22NA、105μm/125μmのファイバピグテールを用いて注入している。ファイバループミラーは、2μmで反射率が推定約90%となる。

パッシブファイバ(市販のシングルモードシリカファイバ)とTm^{3+}添加ケイ酸塩ファイバの屈折率が違うので、モードロック動作に有害なスプリアス反射を防ぐために異種の2本のファイバを斜めカットし融着接続している。ファイバ出力端も斜めカットして後方反射が出ないようにしている。励起効率向上のために、コンバイナ出力ファイバとTm^{3+}添加ケイ酸塩ファイバの融着箇所に低屈折率再被覆を施している。また、ポンプコンバイナ信号ファイバの入力端はSESAMに直接バットジョイントしている(図3)。

励起パワー増加にしたがい、ファイバレーザの動作は何段階かに分けられる。先ず、レーザ閾値に達したところで連続波(CW)動作となる。次に、QスイッチまたはQスイッチモードロックが観察される。さらにポンプパワーが強まるとCWモードロックとなる。ポンプパワーが一段と高くなると、レーザはシングルパルスからマルチパルス域に移行する。これは、ソリトンファイバレーザのパルスエネルギーの上限に達していることによるものである。この上限はレーザキャビティのパラメータによって決まる。つまり、可飽和吸収の飽和エネルギー、変調深度、キャビティの分散および自己位相変調(SPM)によって決まる。

このパルスエネルギーの上限を超えたところで、モードロック動作の安定性から、シングル短パルスよりもエネルギーが下がり、パルス幅が長くなったマルチパルスの方が有利であると言える。シングルパルス域で10mWの最大平均出力パワーを得るには、パルスエネルギーは約0.76nJとなる。市販のオートコリレータで計測したパルス幅は、半値全幅(FWHM)が約340fsであった。

当社は、モードロックパルス増幅用に数種の高濃度Tm添加ケイ酸塩ファイバを開発しており、その1つを用いてモードロックシードパルスを増幅した。用いたのは、コア径22μm、0.06NAの45cm長Tm添加ケイ酸塩ファイバ(**図4**)。パルス歪なしで最大パルスエネルギー46nJ、それに対応するパルス幅は1.8psで、この時のピークパワーは2.5kW超となる。これは傑出した実験値であるが、当社の現在のハイパワーモードロックファイバレーザ製品は、この構成を用いて規定通りに10kWを超えるピークパワーを出している。

参考文献

(1) S.D. Jackson and T.A. King, Opt.Lett., 23, 18, 1462-1464(1998).
(2) J.Wu et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 18, 334-336(2006).
(3) J.Wu et al., Appl. Phys. Lett., 87,211118-211120(2005).
(4) J. Geng et al., Opt. Lett., 34,23,3713-3715(2009).
(5) Y. Kaneda et al., Proc. Advanced Solid-State Photon., Vol.94 of 2004 OSA Trends in Optics and Photonics Series, post-deadline paper PD5, Santa Fe, N<M(2004).
(6) M. Leigh et al., Opt. Lett., 32,8, 897-899(2007).
(7) J. Geng et al., Opt. Lett., 36, 12, 2293-2295(2011).
(8) Q. Wang et al., Opt. Lett., 34,23,3616-3618(2009).

著者紹介

シービン・チャン(Shibin Jiang)、アドバリュー・フォトニクス社(AdValue Photonics)社長/CEO。アリゾナ州タクソン(Tucson)、3708 E. コロンビアSt., Suite 100。85714; e-mail:sjang@advaluephotonics.com; www.advaluephotonics.com

LFWJ

ACCENDO SYSTEMS

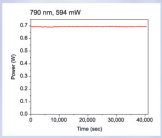
Volcanシリーズ

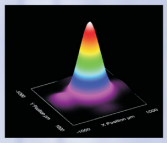
Ti:Sapphireレーザーが身近になりました

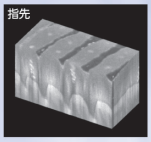
アライメント不要!
キー操作だけで極短パルス(20 fsec)が発生!

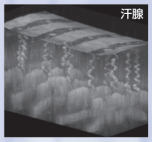
- 励起光源組み込み済(グリーンDPSSレーザー)
- 小型・空冷

- 高い出力安定
- 高出力・広帯域
- ターンキーシステム









Volcanを使用した
OCTイメージング

モデル名	出力
Volcan SF2	>250 mW
Volcan SF4	>500 mW
Volcan SF5	>600 mW
Volcan SF6	>700 mW

波長	800 nm
波長幅	40~80 nm
繰り返し	100 MHz
出力安定度	<0.5%
サイズ	ヘッド(mm) 407×204×122
	電源(mm) 356×280×121

オーテックス株式会社
URL.http://www.autex-inc.co.jp
E-mail sales11@autex-inc.co.jp

東京本社 〒162-0067
東京都新宿区富久町16-5新宿高砂ビル
TEL.03(3226)6321 FAX.03(3226)6290

大阪支店 〒530-0004
大阪市北区堂島浜2-1-29古河大阪ビル
TEL.06(6344)6328 FAX.06(6344)6342