

高パルスエネルギーのファイバレーザ、ライダーやセンシングに対する目に優しいレーザ源に

ジホン・ジェング、シビーン・ジャン、アンソニー・W・ユ

エルビウム添加の特殊な光ファイバは、1550nm周辺の目に優しい波長域で、1mJ以上、ライダー対応、変換限界線幅のレーザパルスを実現するための重要な役割を担うことができる。

ファイバレーザは、連続波(CW)モードと小型パッケージで、数kWの平均出力レベルを確実に達成し、産業や軍事分野における適用可能範囲を拡大している⁽¹⁾。しかし、パルスファイバレーザは多くの実用的な用途において、CWファイバレーザと同等の評価は受けていない。端的に言って、十分に高エネルギーで高ピーク出力の短い光パルスを供給することができれば、その潜在能力は大幅に向上するはずである。

そのようなパルスの重要な応用分野の1つが、風計測、化学物質のリモートセンシングを行うためのレーザ分光法、

目標測距または識別に用いられるコヒーレントライダーである。コヒーレントライダーには、パルス幅が比較的長い(数百ns)変換限界線幅のレーザパルスと、ほぼ回折限界のレーザビームにおける高いパルスエネルギーが必要である。

コンパクトで堅牢で柔軟なパルス調整が可能という点において、ファイバベースのパルスレーザは、地上または空中でフィールド実装されるコヒーレントライダーシステムに搭載する上で、フリースペースオプティクスよりもはるかに望ましい。それらのメリットは、ファイバレーザのオールファイバのモ

ノリック設計に起因している。主発振器出力増幅器(Master Oscillator Power Amplifier: MOPA)構成において、ファイバ結合のシードレーザが、用途に合わせて適切に調整されたレーザパルスフォーマットを提供し、ファイバ増幅器チェーンが、必要なレーザエネルギーを提供する。

類似のファイバベースのパルスMOPAプラットフォームを、シードレーザのフォーマットを変えることにより、コヒーレントライダーまたはダイレクトToF(Time of Flight)ライダーに使用することができる。コヒーレントライダー

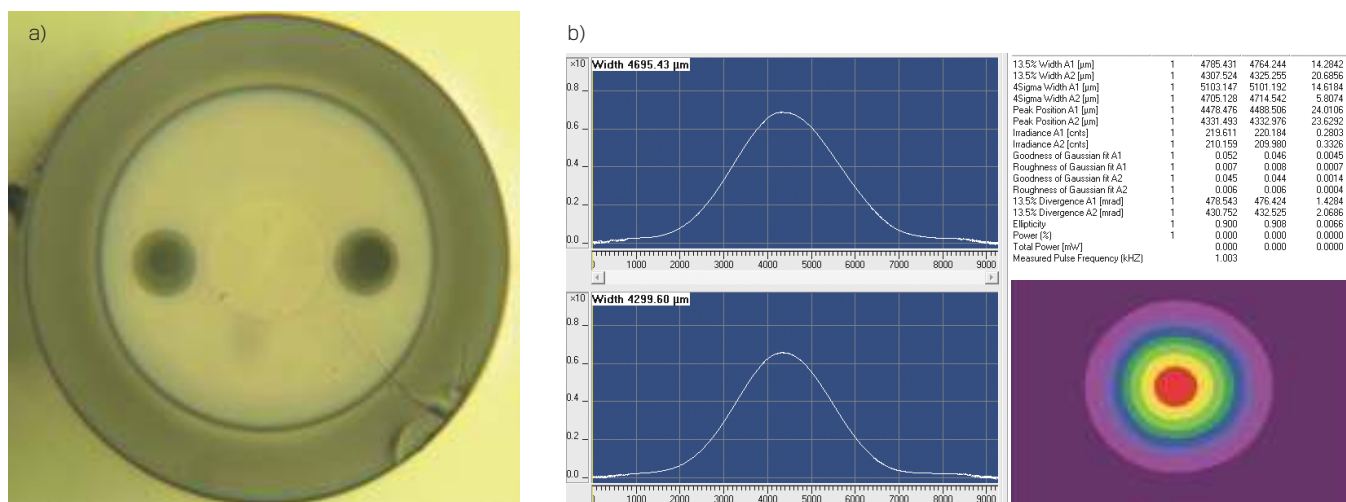


図1 mJレベルのパルスレーザシステムにおいて、最終段のファイバ増幅器に採用されている、ラージモードエリア、極性維持、Er/Yb添加のシリケートガラスファイバ(a)は、ほぼ回折限界の出力を生成する(b)。

の場合、シードレーザは一般的にCWモードで動作し、ファイバピグテール付きの外部振幅変調器(音響光学[AOM]変調器または電気光学[EOM]変調器)との組み合わせによって、コヒーレント検出のための変換限界線幅のレーザパルス(パルス幅は数百ns)を生成する。ToFライダの場合は、直接変調レーザダイオードによって、直接検出のための非常に短いシードレーザパルス(<5ns)を供給することができる。

しかし、そうした顕著なメリットがあるにもかかわらず、モノリシック型パルスファイバレーザをライダに採用することを阻む最大の障害は、それらのレーザ源の中心にある光ファイバからの非線形効果に起因する、パルスエネルギーとピーク出力の限界である。

ファイバレーザのパルス出力の増加商用化されている高出力パルスファイバレーザ/増幅器は一般的に、シリカガラスをベースとする、ファイバ長が数メートルのステップインデックス(SI)型、ラージモードエリア(LMA)のゲインファイバを、最終段のファイバ出力増幅器に使用することにより、所望の出力パルスエネルギーを生成する。残念ながら、この長さ数メートルの最終段ゲインファイバの誘導ブリルアン散乱(Stimulated Brillouin Scattering: SBS)効果によって、変換限界線幅のレーザパルス(パルス幅は100ns程度)の最大出力エネルギーが、ある程度のビーム品質を維持する場合に、およそ200 μ J未満に制約される。

コア径が非常に大きな(80~100 μ m)ロッド状のフォトニック結晶ファイバ(Photonic Crystal Fiber: PCF)は、最大パルスエネルギーをmJレベルまで高められる可能性が実証されているが、PCFは、商用パルスファイバレーザシステムにおいて広く受け入れられては

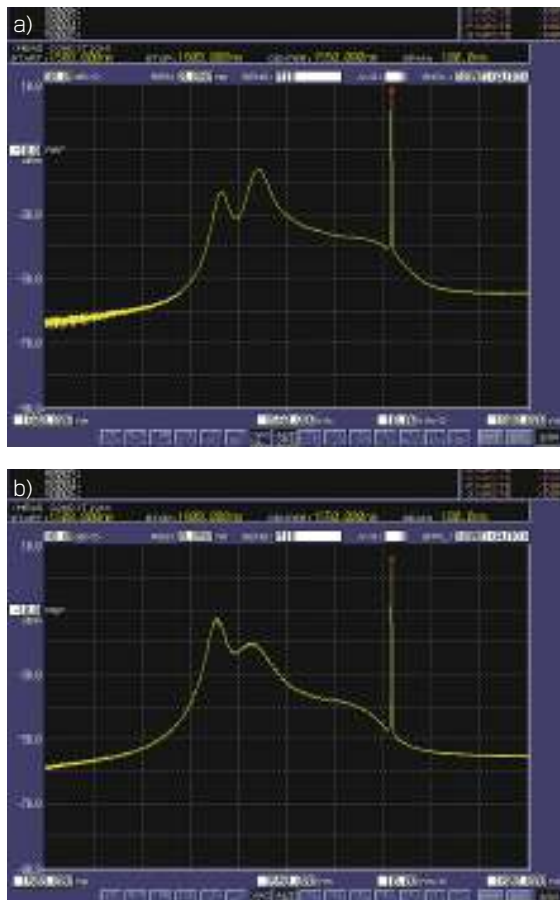


図2 クラッド励起構成において波長1572 nmの弱い信号をシードとして入力する場合に、Er/Yb添加のシリケートゲインファイバ(a)は、商用のシリカガラスゲインファイバ(b)よりもはるかに高い性能を発揮する。

いない⁽²⁾。PCFはそもそも、その脆弱な freespace 信号/励起光結合要件により、固体コアファイバが備える堅牢性とコンパクト性に欠けている。

米アドバリュー・フォトニクス社(AdValue Photonics)はこの数年間で、パルス幅が数百nsの変換限界線幅のレーザパルスから、1mJを超えるパルスエネルギーを達成する、プロプライエタリなマルチコンポーネントのガラスファイバレーザ技術を開発した。複数の波長域(1 μ m、1.55 μ m、2 μ m)でその性能を達成することが実証されている。また、比較的広いスペクトル帯域幅を持つオールファイバのレーザシステムによって、ToFライダに有効である可能性がある、はるかに短いパルス幅(2~5ns)の高いパルスエネルギーを生成することも可能である⁽³⁾。

アドバリュー・フォトニクス社は、短いラージモードエリアファイバから非常に高い光増幅とシングルモード出力を生成する、希土類イオン添加のシリケートガラスファイバを量産することにより、この高エネルギーのパルスファイバレーザを、リモートセンシングやライダの用途を対象に、産業分野の企業や政府の研究施設に納入している。このファイバレーザは、ファイバコア径を拡大し(30~50 μ m)、ゲインファイバ長を短縮し(数十cm)、添加濃度を高くすることによって、非線形光学効果の発生しきい値を増加させつつ、シングルモード動作を維持する。

目に優しい1550nmの波長域

上述の3つの波長域のうち、1550nmの通信波長域で動作するファイバペー

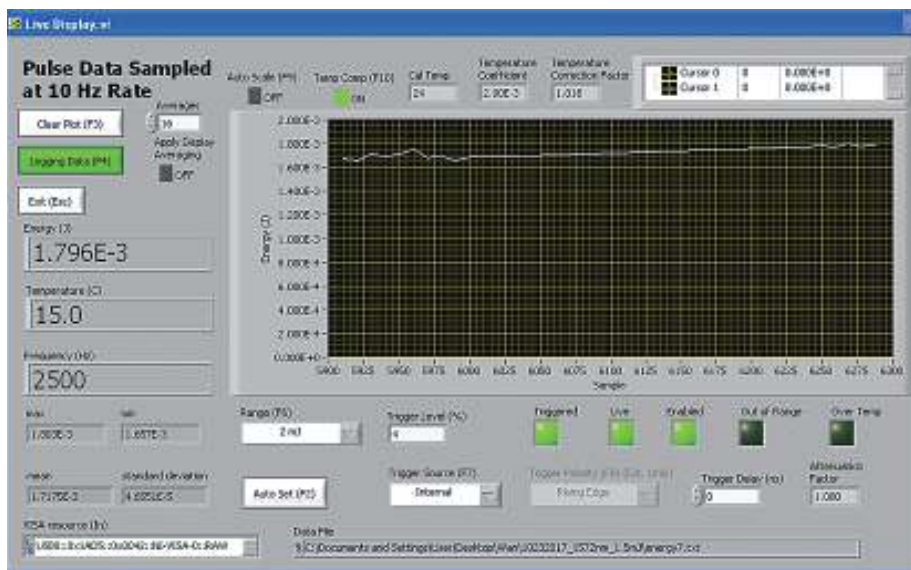


図3 1572nmにおけるオールファイバレーザシステムからのパルス出力のエネルギーを測定したところ、パルスエネルギーは2.5kHzで最大1.8mJであることが示された。

スのパルスレーザ源は、ライダに対して特に望ましい。目に優しく大気減衰が低いという明らかな性質以外にも、1550nm域では、比較的低いコストで(能動的な冷却機構なしで)高速、高分解能、高感度の通信グレードのイメージングセンサが商用提供されている。

波長1550nmのファイバベースのレーザ源は、イッテルビウム(Yb)からエルビウム(Er)イオンへの効率的なエネルギー移動プロセスの存在を活用し、Er添加ファイバにYbイオンを共添加することによって作製できる。つまり、Ybイオンはまず、波長980nmの光を吸収することにより、 $2F7/2$ の基底状態から $2F5/2$ の励起状態に光励起される。 $2F5/2$ の励起状態にあるこのYbイオンは、その周囲の最初は $4I15/2$ の基底状態にあるErイオンと効率的にエネルギーを交換することができる。

エネルギー交換/移動の過程で、Ybイオンはエネルギーを失い、 $2F7/2$ の基底状態に戻る。その一方で、Erイオンは等量のエネルギーを得て、 $4I11/2$ の励起状態に遷移する。YbイオンからErイオンへの急速なエネルギー移動プロセスによって、Erイオンの

励起が著しく促進されるため、このEr-Yb共添加は、波長1550nmにおいてErイオンを放射する、高いレーザ効率を達成する。

Yb/Erイオンの添加濃度を上げると、短いゲインファイバ内においても励起吸収と光増幅をさらに高めることができる。ゲインファイバが短いほど、高出力または高エネルギーのパルスファイバレーザを構築する際の非線形光学効果は緩和される。

ファイバ添加によるスペクトル出力の変更

アドバリュー・フォトリクス社によるmJレベルのオールファイバレーザシステムの最終段増幅器には、シリケートガラス、ダブルクラッド、極性維持のEr/Yb添加光ファイバが採用されている(図1)。このラージモードエリアゲインファイバの $45\mu\text{m}$ というコア径は、ほとんどの商用ファイバと比べてはるかに大きい。その特有の添加属性と、0.04未満というファイバ開口数により、レーザ出力ビームはほぼ回折限界の性能を維持する。

マルチコンポーネントのシリカガラ

スファイバは、励起吸収と光増幅を高めるための高い添加濃度に耐えられるだけでなく、ファイバ設計と添加プロファイルによって、ファイバレーザのスペクトル挙動を変更することができる。Cバンド(1530~1565nm)内において、高濃度のEr/Yb添加ゲインファイバのスペクトル出力は、商用シングルモードで通信グレードの光ファイバとは全く異なる(図2)。

添加ファイバは、波長1572nmのシードを使用する増幅器構成において、商用のシリカファイバよりも約6dB高いゲインと、10dB近く高いS/N比(SNR)を示すことができる。偶然にも1572nmは、大気中の二酸化炭素(CO_2)を検出するための主要波長である。 CO_2 の他の吸収線と比べて、この1572nmの吸収線は温度変化に比較的左右されず、他の大気物質による吸収干渉が小さい。また、吸収飽和の心配なく、衛星に搭載して計測を行うことができる。

センシング応用事例

Erイオンの放射ピークである1535nmと1545nm(図2)からかけ離れた、



図4 このオールファイバのモノリシック型パルスレーザシステムは、商用の光ファイバ部品と特殊添加のゲインファイバで構成されるコンパクトなパッケージで、1mJを超えるパルスを提供する。

1572nmの波長において、高エネルギーでアライメント不要の、オールファイバパルスレーザを構築するのは非常に難しいが、アドバリュー・フォトニクス社は、NASAの宇宙応用向けに、2.5kHzで最大1.8mJのパルスエネルギーを達成する、そのようなパルストランスミッタを実証した(図3)⁽⁴⁾。

NASAゴダード宇宙飛行センター(NASA Goddard Space Flight Center)では、NASAのASCENDS(Active Sensing of CO₂ Emissions over Nights, Days, and Seasons)ミッションのセンシング要件を満たすために、この特定のレーザ源を必要とする。1572nm付近のCO₂吸収線によるセンシングは、ASCENDSミッションの2つの技術的アプローチ候補の1つである。もう1つの候補は、2050nm付近のCO₂吸収線を使用する方法である。

コヒーレントライダの場合、情報は通常、戻ってきたセンシング光による局部発振器の光ヘテロダインによって検出される。センシング光は通常、コヒーレントなレーザビームを照射した

リモートオブジェクトから後方散乱または後方反射される。センシング情報は、風計測の場合は大気中のエアロゾル粒子、化学物質のリモートセンシングの場合は大気中のCO₂分子によって後方散乱された戻り光のドップラー周波数シフトであり、振動指紋識別の場合は、リモートの硬質な目標物によって散乱/反射した光の位相変化である。照明としてコヒーレントなパルスレーザを使用する場合は、コヒーレントライダは、ToFライダと同様に、センシング対象の位置情報を生成することができる。

アドバリュー・フォトニクス社の添加ファイバは、複雑なゲインプロファイルとスペクトル出力を備えるが、ファイバそのものは、商用のほとんどのファイバベース光学部品のピグテールファイバに簡単に結合する。ガラス材料構造の類似性が高いため、添加ゲインファイバと、ポンプコンバイナ、光アイソレータ、分光フィルタといった他の部品との間の簡単な融着接続が可能で、コヒーレントライダやセンシング用のフィールド実装に適した、1mJを超えるオールファイバのモノリシック型パルスファイバレーザが実現される(図4)。

参考文献

- (1) Y. Kawahito et al., Opt. Lett., 43, 19, 4667-4670 (2018).
- (2) C. D. Brooks and F. Di Teodoro, Opt. Express, 13, 22, 8999-9002 (2005).
- (3) W. Lee et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 31, 18, 1534-1537 (2019).
- (4) W. Lee et al., Opt. Lett., 43, 10, 2264-2267 (2018).

著者紹介

ジホン・ジェング(Jihong Geng)は、米アドバリュー・フォトニクス社(AdValue Photonics)のチーフサイエンティスト、シビン・ジャン(Shibin Jiang)は同社社長。
e-mail: jgeng@advaluephotonics.com URL: www.advaluephotonics.com
アンソニー・W・ユ(Anthony W. Yu)は、米NASAゴダード宇宙飛行センター(NASA Goddard Space Flight Center)のレーザおよび電気光学部門に所属する物理学者。
e-mail: anthony.w.yu@nasa.gov URL: http://nasa.gov/goddard

LFWJ