

PCとLMAファイバで超高速ファイバレーザはミリジュールに

チアン・リウ

フォトニック結晶とラージモードエリア光ファイバ増幅器を使うことで、研究者は繰り返しレート100kHzでミリジュールエネルギーレベルを超えるフェムト秒ファイバレーザを実現した。

ミリジュール(mJ)エネルギーレベルは長らく、全てのファイバベースフェムト秒ファイバレーザにとって重要な市場に入るための壁と見なされてきた。金属、半導体、ガラスマイクロ材料の加工では、適切な製造スループットで0.2mJ以上のパルスエネルギーが必要とされているためだ。先頃米ポラーオニキス社(PolarOnyx)は、100Wフォトニック結晶ファイバ(PCF)増幅器を用いて、繰り返しレート100kHzのmJレベルのフェムト秒超高速ファイバレーザを開発し、この壁を克服した。われわれの考えでは、このレベルのファイバレーザは世界初である。また当社は、ラージモードエリア(LMA)ファイバ増幅器を用いて世界初のキロワット平均パワーも開発した。

このパフォーマンスの壁を破ったことで高エネルギー、ハイパフォーマンスフェムト秒スケールの超高速ファイバレーザに、高エネルギー物理学やマイクロ材料加工などのアプリケーション

で新たなチャンスが訪れた。これは新開発のファイバレーザがコンパクトで、維持に手がかからず、コスト効果が優れており、エネルギー消費が減らせるためである。

エネルギー拡大

理想的な高エネルギー、ハイパワー超高速ファイバレーザは一般に、オールファイバベースのシード発振器、ストレッチャ、増幅器を含んでいる。ファイバコンバイナ、利得ファイバ、アイソレータなどのコンポーネント間の接続は通常、堅牢動作のために融着接続が用いられる。したがってフリースペースコンポーネントの利用は、最小限に抑える必要がある。しかし、光ファイバやファイバ増幅器に累積する非線形性の取り扱いが難しいために、オールファイバデザインでのエネルギー拡大は(ハイブリッドアプローチと比較すると)容易でないことが分かっており、実験的に実証されているのは低レ

ベルの数100マイクロジュールエネルギー、わずか100Wのパワーレベルであった^{(1), (2)}。

同社のオールファイバベースのフェムト秒ファイバレーザシステムを拡大して1mJを超えるパルスエネルギー、1kWを上回る平均パワーを達成する能力は、後方励起スキームとPCFおよびLMA光ファイバ増幅器の両方によって決まる⁽³⁾。高濃度イッテルビウム(Yb)イオンドープと並んで、LME径PCFが非線形性を緩和し、mJレベルまでのエネルギー拡大を可能にする。加えて、PCF内側クラッドの大きな開口数(>0.5)が、ファイバにより多くの励起パワー入力を可能にしている。

ミリジュールエネルギー

公称動作波長1μmで高エネルギーを達成するために、われわれは50μJシードレーザ、高エネルギー増幅器、パルスコンプレッサを用いている(図1)。シードレーザは、同社のウラヌス(Uranus)シリーズ1μm高エネルギー モードロックフェムト秒ファイバレーザであり、パルス幅を1.2ns程度に伸ばして出力する。レーザの繰り返しレートは、100kHz～2MHzで可変、最大出力は5W。ウラヌスでは、繰り返しレート100kHzで最高パルスエネルギーは50μJとなっている。

エネルギー増幅器の活性媒体は、デ

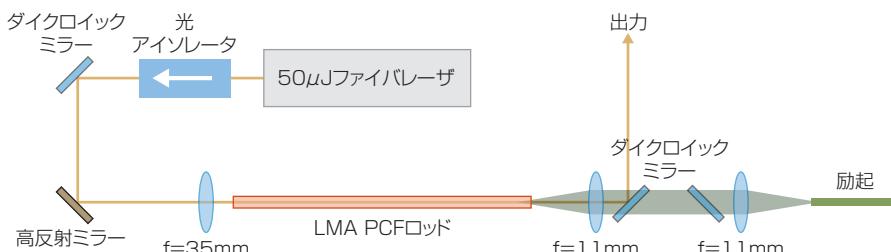


図1 この概略図は、PCF増幅器を用いた1μm高エネルギーファイバレーザのコンポーネントを示している。

ンマークのNKT Photonics社(NKT Photonics)の80cm長、シングルモード、Ybドープ、偏波保持(PM)、ロッドタイプ、ラージモードPCF。コア径は100 μ m、励起クラッド径は285 μ m。コリメートされたシードレーザビームはまずアイソレータを通り、焦点距離35mm球面レンズで集光されてPCFに入る。

後方励起スキームでは、波長976nmで最大174Wの励起パワーをPCFの反対端から入れる。励起ビームは、コア径242 μ mの光ファイバで供給される。励起ビームはコリメートされ、焦点距離11mmの非球面レンズ2個を用いて利得媒体に再度焦点を合わせる。複数のダイクロイックミラーを使って、高ピークパワーの信号波長による考えられる損傷から励起レーザダイオードを保護する。実験セットアップにおける信号光に対する全般的なアイソレーションは30dB以上、PCFロッドには特別な冷却法は適用されない。

繰り返しレート100kHz、500kHz、1MHzでのフェムト秒レーザの動作、光スロープ効率68%で約105Wの出力パワーが得られる。100kHz繰り返しレートでは、最大100.5mJパルスエネルギーが達成され、M²値は1.17(平行)と1.27(垂直)である。

回折効率95%のパルス圧縮器で出力ビームを圧縮した後、705fsのパルス幅は最大增幅パルスエネルギー0.85mJが計測されている。回折効率を98%に改善することで、圧縮された1mJパルスエネルギーが容易に達成される(図2)。パルス圧縮器は最高パルスエネルギーが得られるように最適化された。圧縮器は調整しなかったが、パルス幅は、全ての増幅されたパルスエネルギーレベルで700と800fs間にわずかに変化した。励起光をさらに増やし、熱の問題を制御することによつ

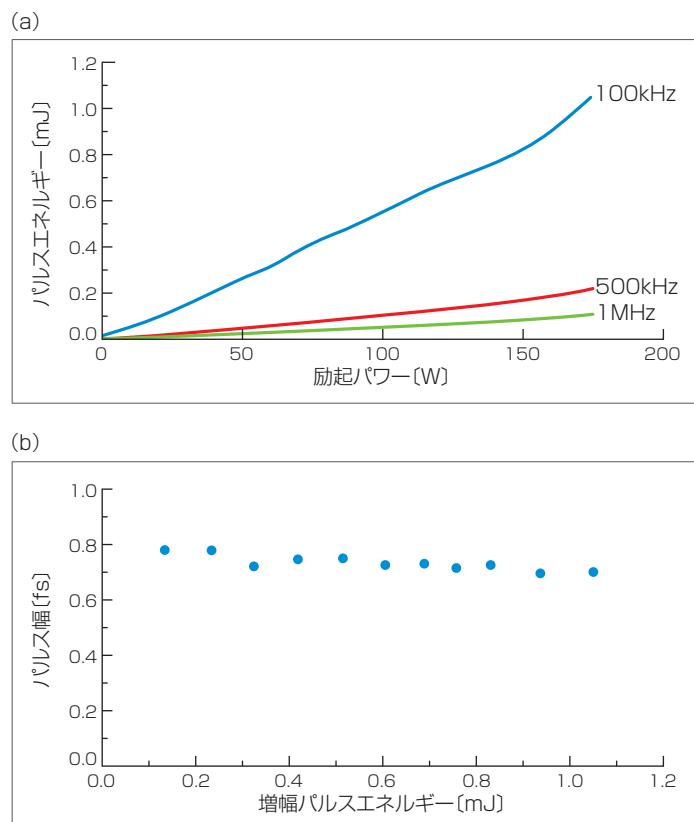


図2 高エネルギー フェムト秒ファイバ レーザでは、様々な 繰り返しレート(a) で出力エネルギーは 励起パワーの関数で あり、パルス幅はパ ルスエネルギー(b) の関数であることが 示されている。

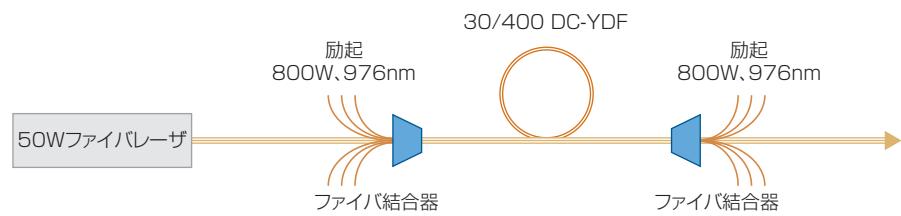


図3 ラージモードエリアファイバを使った1μmキロワットレベルフェムト秒ファイバレーザの 詳細図。

て、より高いパルスエネルギー(マルチミリジュール)のフェムト秒パルスが達成可能である。

キロワットのパワーレベル

今度も同社のウラヌスシリーズ公称1μm(繰り返しレート69MHz、中心波長1064nm)、50Wシードレーザを使い、実験セットアップは米ヌーファン社(Nufern)コア径30 μ mのPLMA-YDF-30/400、8メートル長、PM、ダブルクラッドLMAファイバを含む(図3)。この利得ファイバは976nmダイオードレ

ーザで励起する。双方向励起構成で総励起パワー1600W、利得ファイバの両端それぞれに800Wを入れる。出力特性評価のために、出力ビームのごく一部が溶融シリカプリズムで反射される。

最大励起パワー1600W、シードレー ザ出力を50Wに設定して、最大1052W のパワーを得た。これはパワー変換効率65.7%、スロープ効率70.4%に相当する(図4)。出力スペクトル帯域は、4.7 nm(シードレーザの値)からわずかに狭く、出力0.5kWと1.05kWそれぞれで、

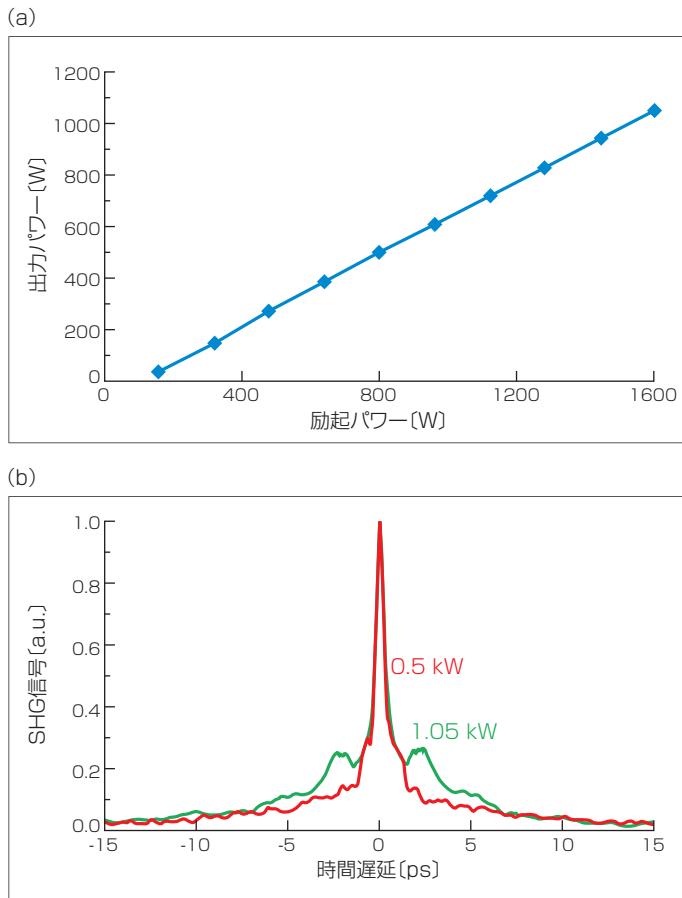


図4 キロワットレベルフェムト秒ファイバレーザでは、励起パワーの関数としての出力パワー(a)と自己相関図(b)が示されている。

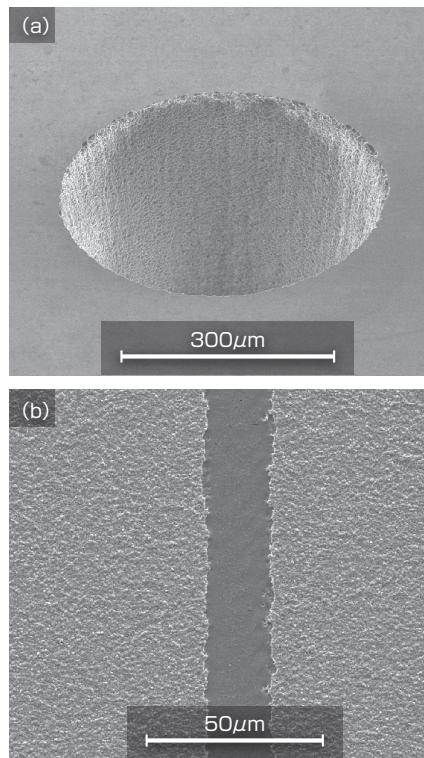


図5 ガラス穴開け(a)と薄膜スクライビング(b)を、0.5mJフェムト秒ファイバレーザで実証。1mJおよびそれ以上のパワーレベルでは、マイクロマシニングの結果は、一段と改善される見込。

3.8nmと3.3nmとなり、利得狭帯化効果が見られる。

出力パワーのごく一部(3.4%)が溶融シリカプリズムで反射され、パルス圧縮を行うためのグレーティング圧縮器に送られる。增幅パワーレベル0.5kWと1.05kWの両方で、パルス幅は約800fsに最適化され、最高出力でのM²は、1.117(平行)と1.120(垂直)と計測された。

同社の市販フェムト秒ファイバレーザは現在、0.5mJパルスエネルギーに達しており、ガラス穴開けや薄膜スクライビング用途では、スループットは100μJシステムの10倍に増える(図5)。しかし、1mJ製品が生産間近であり、同社は10mJ以上のエネルギーレベルに向けて開発を続けている。波長は1~2μm、2.8μmとなる^{(4)、(5)}。これらの

空冷レーザは、メインフレームの物理的フットプリントが43×13×56cm、光学ヘッドが31×120×15cmとなる。

同社は、超高速ファイバレーザが今後5~10年でマイクロ材料加工市場を席巻すると見ている。また、今では想像もつかないような、前例のないアプリケーションが出てくると考えている。例えば、IHS Electronics & Media(E&M)2013レポートは、フレキシブルディスプレイ市場は2016年に13億ドルに成

長し、その後急成長して2023年までには677億ドルに達すると予測している。台数は、全フラットパネルディスプレイ市場の約25%を構成し、18万台となる見込だ。超高速フェムト秒レーザは、フレキシブルディスプレイ材料の加工に最適であると言える。また、高エネルギー物理学ファシリティは一段と大きく、費用がかかるようになるので、より安価でコンパクトな超高速レーザが極めて重要になる^{(5)、(6)}。

参考文献

- (1) L. Shah et al., Opt. Exp., 13, 12, 4717?4722 (2005).
- (2) Liu and L. Yang, "ns and fs fiber lasers," FILAS 2011, Turkey (Feb. 16-18, 2011).
- (3) P. Wan et al., Opt. Exp., 21, 24, 29854?29859 (Nov. 2013).
- (4) P. Wan et al., Opt. Eng., 53, 5, 051508 (2014).
- (5) P. Wan, L. Yang, and J. Liu, "Towards high power and high energy femtosecond fiber lasers," SPIE Photonics West, San Francisco, CA, paper 8961-19 (Feb. 3-6, 2014).
- (6) G. Mourou et al., Nat. Photon., 7, 258?261 (2013).

著者紹介

チアン・リウは、ポラーニックスの社長。e-mail: jianliu@polaronyx.com; URL: www.polaronyx.com