

# テーパー型ダブルクラッドファイバ： 高出力ウルトラファーストレーザー加工

レジーナ・グメニク、バレリー・フィリップポ

新しいファイバ技術によって、数kWの出力、超短パルス幅、最大1GHzの繰り返し周波数、高いビーム品質が、小さなパッケージで実現される見込みだ。

パルス幅がフェムト秒やピコ秒の範囲にあるウルトラファーストレーザーは現在、多くの産業用加工において重要な役割を演じている。高品質で実質的に非熱的な材料加工を実現するそうしたレーザーの価値と、レーザー技術、プロセス開発、ビーム操作、デリバリの進歩の組み合わせによって、無数の先進的な科学及び産業用途に通じる扉が開かれている。

テーパー型ダブルクラッドファイバ(T-DCF)増幅器を用いた最近の開発では、高い出力と優れたビーム特性が、空間効率の良いフォーマットで達成できる可能性が示されている。特に素晴らしいのは、製造コストが通常のファイバよりも少し高いだけで済むことだ。これは、ますます重要になりつつあるウルトラファーストレーザーのワットあたりコストが、産業分野への急速な普及を促進できるだけの理想的なレベルになるかもしれないことを意味する。加工速度と精度を高めるための投資が、短期間で回収できるようになるためである。

デンマークのNKTフォトニクス社(NKT Photonics)の「aeroGAIN-ROD」<sup>(1)</sup>などのクラディング励起ファイバ構造を使用することによって、希土類添加ファイバ源の出力はこの十年間で劇的に増加した。これにより、ビーム品質、全体効率、動作波長や放射形式の柔軟性の面で、卓越した性能

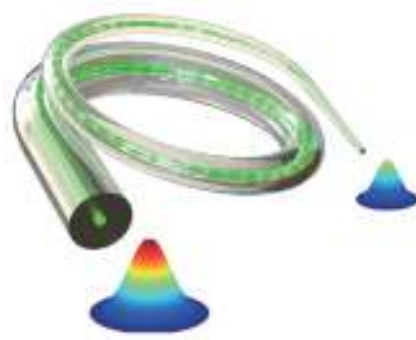


図1 テーパー型ダブルクラッドファイバ(T-DCF)レーザー増幅器の概念。

を達成するとともに、これまでは固体構造でしか利用できなかった出力操作を備える、さまざまなファイバベースのデバイスが開発されるようになった。固体の高出力ウルトラファースト技術においても、独アンフォス社(Amphos)の「Inno Slab」技術など、新しい構成を用いた著しい進歩が見られるが、固体利得材料の高いコストと熱管理の問題がまだ、その広範な普及を阻む、大きな障壁となる可能性がある。

欧州委員会(EC)は、より高速で正確な非熱レーザーの製造を可能にする、競争力のある技術の開発を支援するために、PULSEプロジェクト([www.pulse-laser.eu](http://www.pulse-laser.eu))に資金を提供している。フィンランドのアンプリコニクス社(Ampliconyx Oy)と、蘭フィアット・クライスラー社(Fiat Chrysler)を含む欧州パートナーで構成されるコンソ

ーシアムは現在、最大出力2.5kW、最大繰り返し周波数1GHz、パルス幅はわずか100fsのT-DCFレーザーを開発している。完成したレーザー加工システムは、ポリゴンスキヤナ技術と、スポット径を10 $\mu$ mにまで縮小するファイバ統合光学部品を使用して、最大1.5km/sの走査速度で、高出力のウルトラファーストパルス进行处理する。

## 高出力ウルトラファースト ファイバレーザーの増加

ウルトラファーストパルスレーザーは著しい成長を遂げており、特許申請件数は年間約100件から500件へと5倍に増加している。フォトニクス、マイクロエレクトロニクス、MEMSなど、多くの市場における複数のニッチな先進的用途が、フェムト秒レーザー加工の恩恵を受けている。

ファイバレーザー、固体レーザー、ディスクレーザーは、高い平均出力を生成するための最も有望な選択肢である。固体レーザーやディスクレーザーと比べた場合のファイバレーザーの顕著な特長としては、コンパクトであること、堅牢であること、効率が高いこと、熱管理が容易であること、ビーム品質の信頼性が高いことなどが挙げられる。製造コストと保守コストがかなり低いことから、ファイバベースのアプローチは、繰り返し周波数が高く、キロワットレベルの出力を持つ、ピコ秒やフェムト

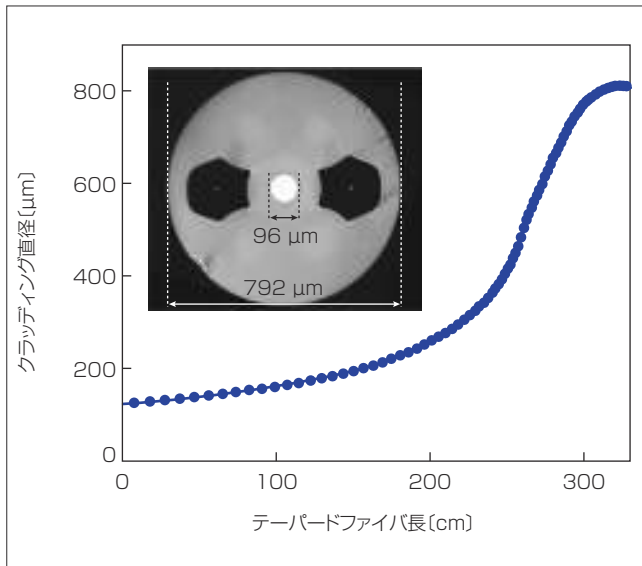


図2 T-DCFの標準的な長さ方向特性。挿入図は、バンド型T-DCFの断面図(ワイド側)。

LPFの作製は、ファイバプリフォームの高精度な穴あけなどの重要な加工を必要とする非常に複雑な処理であるため、その製造コストは高い。また、これらのファイバは、折り曲げに対して非常に敏感である。つまり、適切な堅牢性を達成するのは難しい可能性があり、LPFを使用して製造コストを合理的な範囲に収めるのは困難である。

### ファイバレーザの出力スケールにおける非線形効果の克服

T-DCFは、ファイバベースの高出力CPAシステムに代わる有望な選択肢の1つである。非線形効果を最小限に抑えつつ、通常のマルチカスケード増幅チェーンを、1つの段で置き換えることによって簡素化する(図1)。T-DCFは、温度と引張力を制御してファイバ長に沿ったテーパを形成する、特殊なファイバドロー処理を使用して作成された、ダブルクラッド光ファイバである。クラッド済みのファイバプリフォームを使用することにより、ファイバコアと内側及び外側のクラディング層の両方の直径と厚さを、ファイバの長さ全体に沿って変化させる。ファイバのこのテーパリングによって、コア径が徐々に拡大する増幅器の連続的なチェーンを形成し、従来の口径8~10 $\mu\text{m}$ のダブルクラッド・シングルモードファイバと、それよりもはるかに口径の大きい(50~100 $\mu\text{m}$ )ダブルクラッド・マルチモードファイバの性質を組み合わせ、高出力増幅に利用することができる(図2)。

テーパ形状のダブルクラッドファイバを形成することにより、細いほうの端に入射した光が、モード成分を変えことなく広いコア内を伝搬する。口径が徐々に大きくなるように複数の

秒のレーザ開発に対して非常に魅力的である。

今日の高平均出力ファイバレーザには、チャープパルス増幅(Chirped Pulse Amplification: CPA)が一般的に用いられている。しかし、ファイバベースのブースト増幅器では、パルス幅が十分に広い場合でも、光学ピーク強度が非常に高くなる恐れがあり、有害な非線形のパルスひずみが生じたり、利得媒体などの光学素子が破損したりすることさえある。加えて、自己位相変調、誘導ラマン散乱(Stimulated Raman Scattering: SRS)、モード不安定性、低い出力ビーム品質など、その他の非線形効果がパルス高出力システムに現れて、その性能が制約されることも多い。

パルス信号増幅の問題を解決するための主な方法は、ファイバのコア径を大きくすることである。大きなモードエリアを持つ特殊なアクティブファイバが開発されている。アクティブファイバのアクティブな体積に対する表面積の比を大きくすることによって、放熱を改善し、非線形効果のしきい値を高くして、出力スケールを可能に

するものだ。最先端のファイバベースの高出力技術によって既に、シングルパルス増幅チャンネルで1kWを超える出力が達成されており<sup>(2)</sup>、将来の超短パルスで数キロワットレベルのファイバベースレーザシステムに向けた基礎が築かれている。

高出力スケールに向けて、大きな実効モードエリア(LMA)を持つ複数の種類のアクティブファイバが開発されている。よく知られているコアの開口数が低いLMAファイバに加えて、微細構造のロッド型ファイバ、ヘリカルコアまたはキラル結合コア(chirally coupled core: 3C)ファイバ、そしてT-DCFがこれに該当する。低開口数技術によって達成されるモードフィールド径(Mode Field Diameter: MFD)は、一般的に20~30 $\mu\text{m}$ を超えることはない。微細構造のロッド型ファイバは、MFDが最大65 $\mu\text{m}$ とはるかに大きく、性能が高い。最近、ラージピッチファイバ(LPFF)を含むフェムト秒の主発振器出力増幅器(Master Oscillator Power Amplifier: MOPA)によって、2.2mJという素晴らしいパルスエネルギーが実証された<sup>(3)</sup>。しかし、

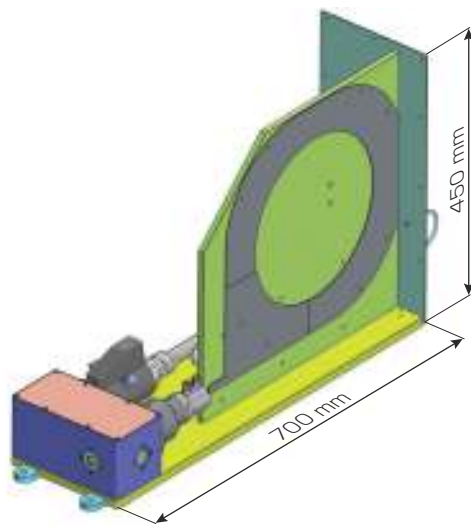


図3 500WのT-DCF増幅器の構造。

円筒形の光ファイバ増幅器を一列に並べると、望ましくない非線形効果のしきい値が一般的に増加することは、よく知られている。T-DCFの設計では、このメリットがシングルファイバに取り入れられている。その結果、ブリルアン散乱やラマン散乱などの非線形効果の励起しきい値が引き上げられ、優れたビーム品質を維持する光学増幅が得られる。

T-DCF技術はその固有の形状により、短パルス(数十ピコ秒)から長パルス(最大数百ナノ秒)、または、狭線幅(数十ピコメートル)から広線幅(数十ナノメートル)の、幅広いパルス信号の直接増幅に利用できる。大きい端のコア径が最大 $200\mu\text{m}$ 、開口数(Numerical Aperture: NA)が0.11のテーパ型ファイバを使用して、記録的なピーク出力、エネルギー増幅レベル、60psのパルス、 $300\mu\text{J}$ のエネルギーが、非線形ひずみを生じることなく達成されたことが報告されている<sup>(4)</sup>。

ファイバのダブルクラッド構造は、コアだけで伝搬できるよりも高い出力でコアが励起できることを意味する。単位長あたりの励起光の吸収と変換

は、テーパ型ファイバのほうが、アクティブイオン添加が同等レベルの円筒形ファイバよりも高い。これは、はるかに厚みのあるクラディングによって、クラッドモードミキシングが改善され、テーパの太いほうの端での吸収が高くなるためである。これは、希土類イオンドーパントがT-DCFの広い端で有効に濃縮されることも意味する。その量は直径の二乗に比例するためである。

### シンプルな製造とコンパクトなアセンブリ

T-DCFの最も重要なメリットの1つは、製造がシンプルであることだ。特殊な高出力ファイバ(微細構造のロッ

ド型ファイバ、3C、またはLCF)のプリフォーム製造には、複雑な技術が必要で、厳格な構造要件が課される。一方、T-DCFは、標準的なファイバプリフォームを使用して製造される。引張処理時のドロー速度を変化させるというシンプルな製造手法によって、長さに沿ってファイバ径を変化させる。T-DCFの製造は、通常のアクティブファイバの製造とほぼ同程度に単純である。T-DCFファイバは、最小35cmの直径でコイル状に巻くことが可能で、性能を損なうことなく、高出力増幅器パッケージを非常にコンパクトにすることができる(図3)。

### 高出力ウルトラファーストレーザ加工の未来

T-DCF技術のすべてのメリットを、新しいビーム成形コンポーネント、先進的なデリバリファイバ、ポリゴンスキャナと組み合わせて完成させたレーザ加工システムは、加工時間が比較的長いという、産業向けに現在実装されているレーザ加工ソリューションの主要な欠点を克服することができる。PULSEコンソーシアムによるこの成果は、車体の軽量化や、射出成形のテクスチャリングまたは新しい電気自動車用のバッテリー製造処理の加速化を目指す、自動車業界にとって特に関心のあるものになるだろう。

#### 参考文献

- (1) See <https://bit.ly/PULSERef1>.
- (2) M. Müller et al., Opt. Lett., 41, 3439-3442 (2016) and M. Müller et al., Opt. Lett., 43, 6037-6040 (2018).
- (3) T. Eidam et al., Opt. Express, 19, 1, 255-260 (2011).
- (4) V. Filippov, Y. K. Chamorovskii, K. M. Golant, A. Vorotynskii, and O. G. Okhotnikov, Proc. SPIE, 9728, 97280V (Mar. 11, 2016); doi:10.1117/12.2218051.

#### 著者紹介

レジナ・グメニユク(Regina Gumenyuk)は、フィンランドのタンペレ大(Tampere University)のシニアリサーチフェロー、バレリー・フィリッポフ(Valery Filippov)は、フィンランドのアンプリコニクス社(Ampliconix Oy)の最高技術責任者(CTO)。

e-mail: regina.gumenyuk@tuni.fi URL: www.tuni.fi/en

LFWJ