

# 超短パルスレーザ増幅に 単結晶ファイバレーザを利用

ダニエル・ギロ、ジュリアン・ディディエジャン、パトリック・ビュレ ドジュール

従来のバルク結晶MOPA増幅には多くの欠陥がある。これらは、今では単結晶ファイバ技術で対処されつつあり、次世代の高出力、超短パルスファイバレーザが実現することになる。

レーザ微細加工アプリケーションでは、短パルスの精密な、高い平均出力により加工速度向上が可能になる。また、高エネルギーは、加工スループット向上をもたらす。短パルスは容易に達成できるが、拡張性は、エネルギーすなわち平均パワーに関しては、もっと難しい。例えば、光ファイバ内の非線形効果が、増幅中のピークパワーを制限する。

短パルス幅、つまり超短パルス(USP)レーザで出力向上達成のために広く受け入れられたソリューションは、主発振器出力増幅器(MOPA)アーキテクチャによるものである。MOPAでは、増幅に影響する多様な技術と材料を利用する。次世代USPレーザは、新しいファイバベースのアーキテクチ

ュアを拠り所にして、従来の巨大なファイバ増幅器の欠点を克服する。

## 増幅比較

バルク結晶増幅器は、ビーム劣化の影響を受ける。これは、利得媒体内で生ずる極めて異常な熱レンズ効果のためである。この本質的な限界により、高出力増幅器の形状は、これら材料内部の熱マネージメントを改善するように進化してきた。

薄いディスクは、利得媒体の厚さが薄い(約 $100\mu\text{m}$ )のでパス当たりの利得が限られている。その結果、効果的な増幅は、マルチパスあるいは再生技術によってのみ得られる。

マルチパス増幅器は、複雑な光パス

を使ってレーザ結晶を何度も光を通過させるが、再生増幅器は高価なEO変調器を複雑なビーム切替手段の一部として使用する。欠点はあるが、薄いディスク増幅器は非常に高いキロワットレベルの出力を生成し、増幅最終段としては理想的である。

極めて高い平均パワー、最大キロワットレベルの平均パワーがスラブ増幅器では、高利得により達成可能であるが、使用されるジグザグ光学パスのためにビームの楕円度が強くなり、ビーム品質が劣化する。

短パルス実現のためのバルク代替以外では、光ファイバベースの増幅器は一般にラージモードエリア(LMA)ファイバ、あるいはラージモードエリアのフォトニック結晶ファイバ(PCF LMA)を利用するが、ロッドタイプPCFではピークパワーが一段と高くなる。

市販のファイバは、最大コア径 $85\mu\text{m}$ 、伝搬モード $65\mu\text{m}$ である。また、たとえドープレベルが高くても、ファイバ長は1m程度である。ファイバ設計がベリレーラージコアで極低開口数(NA)では回折限界のビームが得られるが、システムは柔軟性がなく、大きくなる。

ガイドポンプとガイドレーザモードのオーバーラップにより、光効率が良くなる。優れたビーム品質で最大200Wの平均パワーが達成可能である。

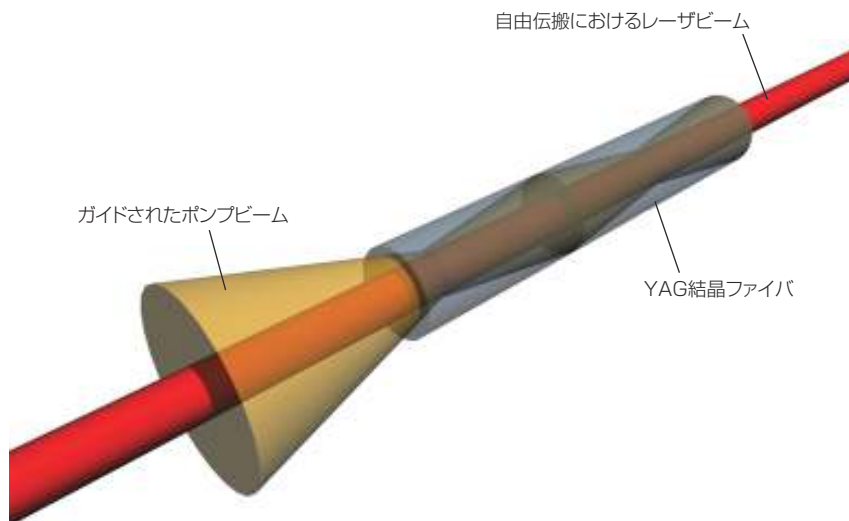


図1 単結晶ファイバ(SCF)増幅器の基本原則を示す。

ただし、出力が高くなると、熱光学効果が導波機構に大きな影響を与える。これら擾乱によりLMAファイバは、ハイパワーでは、より高次のモードをサポートする、つまりビーム品質が劣化し、究極的にはミリ秒時間スケールで出力ビームが変動する(横モードの不安定性)。産業用レーザーシステムでは、ロッドタイプファイバのピークパワーは、非線形効果を回避するために、一般に1MWに制限されている。

フェムト秒ファイバレーザーでは、チャプトパルス増幅(CPA)によってこの限界を緩和し、40 $\mu$ mコアのフレキシブルPCFファイバをベースにした、ハイパワーシステムが利用可能になっている。とは言え、ピークパワーの制限のために、大きな延伸倍率のコンプレッサ利用が避けられず、コストとシステムサイズが増大することになる。

## 単結晶ファイバ

単結晶ファイバ(SCF)は、一般に単結晶イットリウムアルミニウムガーネット(YAG)であり、これは長尺、小径で魅力的な光導波特性を持つ。

レーザー溶融ベダスタル法(LHPG)技術で小径ファイバ(100 $\mu$ m程度)を製造できる。また継続的改善により、目標は、高い平均パワーのレーザーシステム向けに、古典的なファイバ同様コア/クラッド構造の達成である。とは言え、そのような構造の作製は、達成は決してあり得ないと言えるほど困難な課題である。特に、直線偏波維持が求められる場合は難しい。古典的なファイバと比べて相互作用長が減少するにも関わらず、結果として得られるアーキテクチャは、どんな場合でも、高いピークパワーでは、依然としてシリカファイバと同様の制限を受ける。また、これらはYAG材料の非線形特性が高

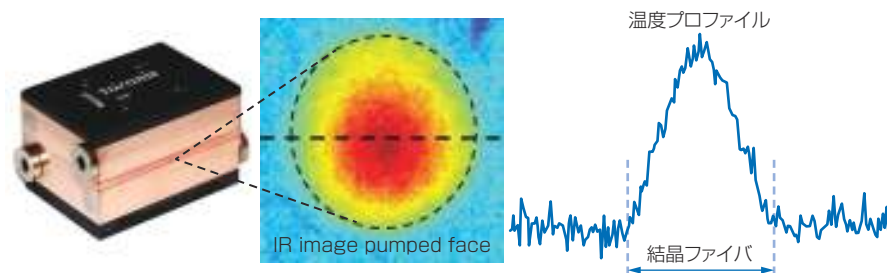


図2 Taranisモジュール(左)に集積された単結晶ファイバの励起面を赤外イメージングしている。モジュールは水冷で、バルク結晶増幅器設計よりも効率が良い。

くなれば、さらに悪化する。これが超高速ハイパワー増幅器にとってのソリューションでないことは明らかである。

直径が1~2mmのより大きなSCFが、マイクロ線引き技術を用いることで作製された。これは、メガワットのピークパワーに耐えることができるので、高エネルギー短パルス増幅には理想的な候補である。

## SCF増幅器

増幅の望ましい構成では、1mm径、30~50mm長のネोजウム、またはイッテルビウム添加YAG SCFを使う。Yb:YAG媒体は、USPレーザーシステムでは好まれる。吸収と発光帯域幅が相対的に大きく、上位レーザー準位寿命が長く、励起パワー当たりの熱負荷が小さいからである。

市販のSCF増幅器、例えばTaranisレーザー利得モジュールは、特殊なポンピングスキームを利用する。ポンプビームは結晶内(その表面ではない)の400 $\mu$ m径のスポットに合焦し、アンプ出力を十分に最大化できる。大きなビーム広がり、全反射でガイドされ、利得媒体で再合焦される(図1)。

ポンプの最初の集光点は、ファイバ長に沿って何度か像ができるが、これはポンプ輝度に依存する。優れたビーム品質では、ポンプビームは、利得媒体中を伝搬している間レーザービームと

同じ線上に維持される。したがって、スラブや薄型ディスクに現れる非点収差などの軸外収差は回避される。

ドーピングレベルは一般に、バルク結晶と比べると一ケタ低く、長さは、一般に一ケタ長い。ポンプ誘導がなければ、こうした違いは非生産的である。ポンプのビーム広がり大きいからである。しかしポンプガイドがあると、この長尺/低ドーピング率は、結晶ファイバ長全体にポンプ吸収を広げる、したがって利得媒体における熱応力が低下する。

MOPA構成における単結晶ファイバ(SCF)は、すでにその効率と柔軟性がフィールドで証明されている。実際面で、仏ファイバクリスト社(Fibercryst)の製造するYb:YAG SCF利得モジュールは、940nmで最大600Wのポンプでも損傷はなかった、これは通常バルク結晶の一般的なポンピングレベルよりもはるかに上である<sup>(1)</sup>。

数100Wのポンプパワーに晒される1mm径のYAGロッドの冷却は簡単ではないが、Taranisモジュールはこれを成し遂げている。これは、ファイバクリスト社と仏国立科学研究センター(CNRS)のシャルル・ファブリ研究所(LCF)の特許技術で、結晶ファイバを直接金属マウントに集積している。冷却効率は非常に高く、熱交換係数は最大5W/cm<sup>2</sup>/K。これは一般的なインジ

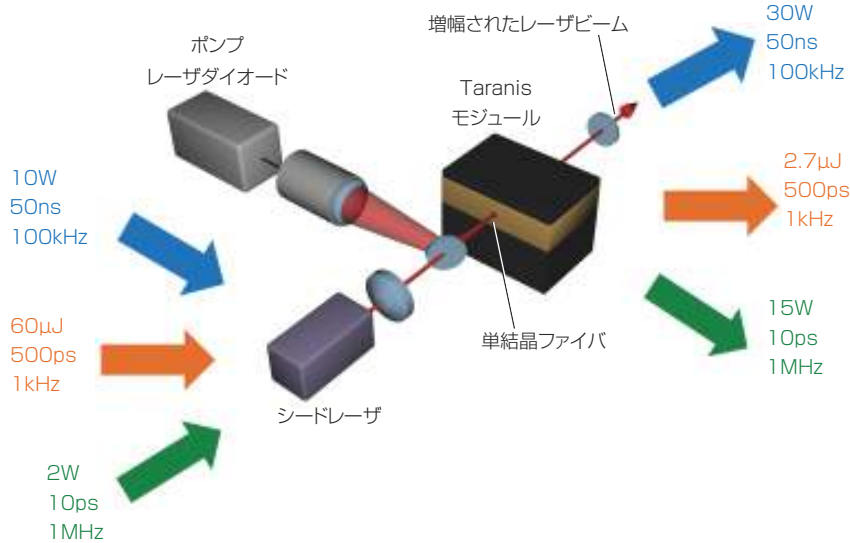


図3 多様なシードレーザを使い、単結晶ファイバ(SCF)ベースのTaranisモジュールは、様々な対応するパフォーマンスレベルで増幅パルスを生成する。

ウムプレスソリューションよりも5倍優れている(図2)。

励起された結晶ファイバの熱勾配は、根本的に対称的であり、ハイパワーでも優れたビーム品質を保証している。140Wの高い平均パワーが実証されたが、SCF技術の限界には達していない<sup>(2)</sup>。

### 高い平均パワーと高エネルギー

ロッドタイプの増幅器では、レーザーモードの典型表面は $3000\mu\text{m}^2$ である。自己位相変調(SPM)、ラマン干渉を含め非線形効果が直ちに現れるのは、高ピーク強度がそのような表面を長い相互作用とともに伝搬するときである。

しかし一般的なSCF増幅器では、レーザーモードでカバーされている表面は50倍高く、その結果、著しく高いピークパワーが達成可能である。高利得、短尺、大きなビーム径の組合せが、30dB程度の小信号利得と最大50MWまでのピークパワーをすでに実証している。

改良「バルク結晶」増幅器として、SCF技術は、通常のバルク増幅器の全ての利点を保持している。特に、広い範囲の繰り返しレートで独立動作する能力、パルス幅、シードパワーである。

同じSCF増幅器を調整なしで使って、数kHzから $\geq 20\text{MHz}$ までのパルスシードレーザ、あるいは数十ナノ秒から数百フェムト秒までのシードレーザを増幅することができる。数百mWから数十Wまで増幅されたシードパワーは、すでに実証に成功している(図3)<sup>(3)(4)</sup>。

一般的な産業用シングルパスYb:YAG SCF増幅器段は、わずか6オプティクスセットである。これは、ディスクまたはスラブ技術と比べて遜色がない。

SCF増幅器は、様々なシードレーザとともに用いて、セットアップの柔軟性および簡便さを提示してきた。例えば、分割パルス増幅(DPA)セットアップに関連したSCFベースのアーキテクチャの報告がある。これは繰り返しレート12.5kHzで2mJエネルギー、

6psパルスを提供する高エネルギー向けである。

高い平均パワーのアプリケーションには、CPAなしの100Wを供給するシステムが実現されており、これは繰り返しレート20MHz、パルス幅750fsである<sup>(5)</sup>。両方の構成で、出力ビーム品質は優れており、 $M^2$ 値は1.2以下である<sup>(6)</sup>。

カスケードおよびフェムト秒ファイバベースのシードでSCF増幅器を使い、ファイバクリスト社製FEMTO25産業用レーザは、優れた $M^2$ と楕円率で動作範囲が非常に広い。このレーザのパルス当たりのエネルギーは、プロセス開発に向けて直ちに变更可能である、またレーザの全般的なモジュラリティは、どんなアプリケーションにも適応する。

### 参考文献

- (1) X. Delen et al., Opt. Lett., 37, 14, 2898 (2012).
- (2) S. Piehler et al., Opt. Express, 21, 9, 11376 (2013).
- (3) I. Martial et al., Opt. Express, 19, 12, 11667 (2011).
- (4) X. Delen et al., Opt. Lett., 38, 2, 109 (2013).
- (5) F. Lesparre et al., Opt. Lett., 40, 11, 2517 (2015).
- (6) F. Lesparre et al., Opt. Lett., 41, 7, 1628 (2016).

### 著者紹介

ダニエル・ギロはCEO、ジュリアン・ディディエジャンはオペレーションマネージャー、パトリック・ピュレドジュールはレーザR&Dエンジニア。全員、仏ファイバクリスト社に所属する。

e-mail: d.guillot@fibercryst.com URL: http://fibercryst.com

LFWJ