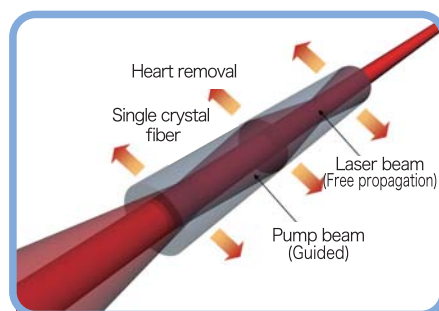


SINGLE CRYSTAL FIBER

単結晶ファイバーの特長

近年の微細加工の進展により高精度及び高速加工が求められ、同時にレーザの超短パルス化、高出力化が求められております。MOPA(主発振器出力増幅器)は、現在の有力な増幅方法ですが、まだコストや出力の上限の面で課題が残されています。本文では単結晶ファイバー(SCF)を用いた超短パルスレーザの新しい増幅方法をご説明致します。





超短パルスレーザー用単結晶ファイバー増幅

SINGLE CRYSTAL FIBER

超短パルスレーザーを用いた材料加工には高い正確度及び繰り返し精度が求められ、同時に高い平均出力とパルスエネルギーを必要とします。ピコ秒・サブピコ秒の短パルスレーザーは比較的容易に発振可能ですが、高平均出力又はパルスエネルギー化は高い技術を必要とします。現在、広く認識された増幅方法の1つにMOPA(Master Oscillator Power Amplifier)方式が存在しますが、バルク結晶を用いた増幅は結晶内部に生じる熱レンズ効果により、屈折率が変化する問題を生じます。この解決方法として、各方向から内部の熱を放出させる薄ディスクやスラブ型増幅方式が存在します。

薄ディスク型増幅による単一パスの利得は低いため、高出力化をするためには複数回のパス又は再生増幅器が必要となりますが、光学系が複雑になり高コスト化につながります。一方、スラブ型増幅は高利得でkW級の高出力に達しますが、結晶内部の複雑な経路により、ビームの非対称性や劣化を生じます。

また、LMA(Large Mode Area)ファイバーを使用した増幅方法は、ビーム品質は良好ですが、高いピーク強度により非線形効果を誘起します。チャープパルス増幅はその解決方法の一つですが、光学系が複雑になり高コストとなります。

単結晶ファイバー中の励起

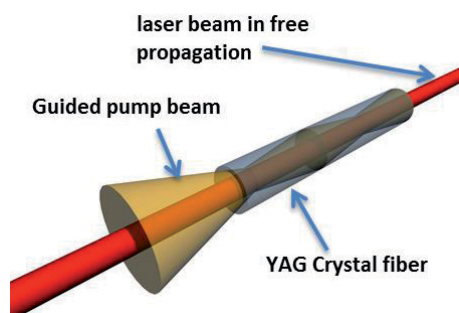
SINGLE CRYSTAL FIBER PUMPING

上記の問題に対してSCF(Single Crystal Fiber)は超短パルスレーザーの理想的な増幅方法になりつつあります。単結晶ファイバーのファイバー径は1mm以下で適した長さを持ち、ガイディングは、端面後方励起によりされます。(Fig.1)この新しいレーザー結晶は良好なビーム品質と繰返し周波数可変性を持ち、高強度で直線偏光のレーザー光を発生させることができます。また、Fibercryst社とLaboratoire Charles Fabry of the Institut d'Optique (CNRS-LCFO)はこの技術で10年に渡り提携しております。

典型的な単結晶ファイバーは直径1 mmで長さは30 mmから50 mmになり、結晶の種類はNd:YAGまたはYb:YAGになります。超短パルスの発生にはより大きなバンド幅と940nmの励起光源の使用により、Yb:YAGが理想的です。単結晶ファイバー増幅について、シード光(直径400 μm , $1/e^2$)は結晶中で全反射を伴うガイディングはされません。さらに、単結晶の高屈折率はシード光の発散を抑制します。

励起光はファイバー入射端近傍で直径400 μm に集光され、高い発散角を持つ励起光は結晶内部で反射されながら導波されます。

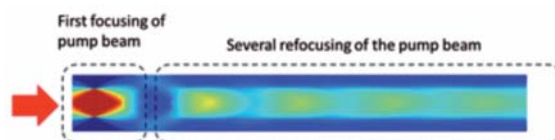
単結晶ファイバー増幅器の原理 (Fig.1)



励起光は結晶中でシード光と同軸上で伝播するため、スラブ型や薄ディスク型結晶で生じるような非点収差は生じず、良好なビーム品質を保ちます。

基本的にドープ量は通常のバルク結晶と比べて一桁小さく、その長さも一桁大きくなります。ガイドをさせな

ファイバー中を伝播する様子 (Fig.2)



い時は励起光を伝播させた場合、励起光の大きな発散角のため単結晶ファイバーの性能は発揮されませんが、同軸にすることで低いドープ量でも結晶全体に沿って効率の良いシード光の増幅をさせることができ、利得媒質中で熱勾配を低減させます。

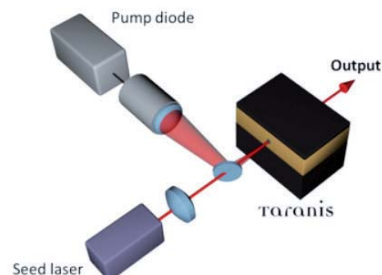
単結晶ファイバー増幅

単結晶ファイバーの高利得と高出力化の最適化により、MOPA(主発振器出力増幅器)方式に対して非常に適しております。この方式の効率と使い易さはすでに実証されております。実用面で、Fiberocryst社によるYb:YAG単結晶ファイバーは600 W@940 nmもの励起光出力でも損傷せず、通常バルク型結晶よりはるかに高い性能を持っております。

数百Wの励起光出力が加えられた直径1 mmのYAGロッドを冷却することは簡単ではありませんが、Fiberocryst社とCNRS-LCFIO研究所によって特許取得された単結晶ファイバーと金属マウントによる放熱設置方法によって解決することができます。冷却効率はとても高く、熱伝達率係数は5 W/cm²/Kに達し、従来のインジウムを挟んだ冷却方法よりも5倍以上優れています。

励起された単結晶クリスタルファイバーの熱勾配は径方向に対称で、高出力で優れたビーム品質をもたらし、140 Wの高平均出力単結晶ファイバーの限界に達することなく動作させることができます。

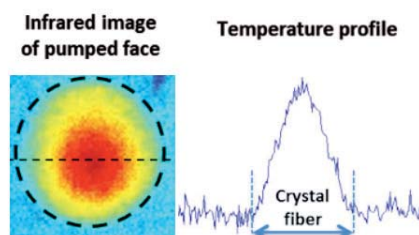
Taranis に統合されたSCF と増幅器 (Fig.3)



水冷Taranis モジュール (Fig.4)



SCF モジュール励起のサーモグラフィ画像 (Fig.5)



高利得・高ピークパワー

従来のLMA(Large Mode Area)ファイバー増幅において、利得は20～30 dBと高く、光-光変換効率は50～60%に達しますが、最大ピークパワーはコア系が小さいため(一般的に0.001 mm²) 1 MW以下に限られます。これは強いピークパワー伝播する際に生じるSPM (Self Phase Modulation)やラマン効果を誘起するためです。

一方、通常の薄ディスク型増幅方法は、高出力化が可能ですが、利得は10 dB以下と制限されます。

単結晶ファイバーでは、LMAファイバーよりもモードエリアの面積は100倍にもなります。このためピークパワーは25 MWまで出力可能です。さらに、シード光と励起光の良好な重なりによりモードマッチング効率高く、小信号利得はおよそ100～200に達します。

可変性能

このバルク結晶の改良版として単結晶ファイバーは、広範囲に渡ってパルス幅や出力が可能等の従来のバルク結晶の利点を多く引き継ぎます。アライメントをすること無く、パルス幅を数kHzから数十MHzまで可変することができ、パルス幅は数十ナノ秒から数百フェムト秒に変えることができます。

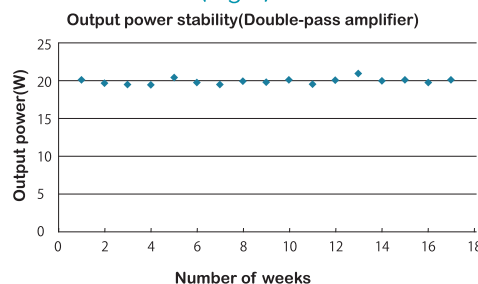
簡易性

典型的な産業用の単一パス Yb:YAG 単結晶ファイバー増幅器は、たった 6 個の光学素子のみから構成されます。レーザービームはわずか 3 回の反射で利得媒質である単結晶ファイバーへは 1 回の透過のみです。

比較のために薄ディスク又はスラブ型増幅器は 10～20 個もの光学素子を使用し、5～16 回の反射をして、利得媒質には 5 回以上も通過します。

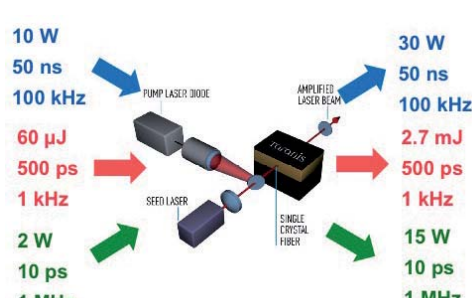
単純な構成は使用の利便性と信頼性を意味します。Fibercryst 社によって製品化された増幅器はすでにメンテナンス無しで、2 年以上も稼動されております。20 W サブナノ秒レーザを 120 日以上動作に亘り、連続動作を行った結果、出力変動は 2 % RMS 以下でした。

サブナノ出力 (Fig.6)



単結晶ファイバー増幅器は柔軟性と簡易性を持つシード光と一緒に用いられます

単結晶ファイバー増幅器動作例 (Fig.7)



Fibercrystのレーザ発振器

この単結晶ファイバーの利点を生かしFibercryst社では産業用高出力ピコ・フェムト秒レーザを開発し、ラインアップに加えました。これらのレーザは堅牢で微調整もすることなく、容易に発振器のパラメータを調整させることができます。ピコ秒レーザPICOはパルス幅10ps以下で、繰返し周波数200 kHz～2 MHzの範囲で可変することができ、平均出力及びピークパワーはそれぞれ60 W、10 MWとなります。一方、フェムト秒レーザは800fs以下で、繰返し周波数は100 kHz～2 MHzの範囲で可変することができ、平均出力及びピークパワーはそれぞれ25 W、200 MWとなります。

参考文献

- [1] 250 W single-crystal fiber Yb:YAG laser, X. Delen and al. OPTICS LETTERS Vol. 37, No. 14 p. 2898 (2012)
- [2] Amplification of cylindrically polarized laser beams in single crystal fiber amplifiers, S. Piehler and al. OPTICS EXPRESS Vol. 21, No.9, p. 11376 (2013)
- [3] Non CPA High Energy Picosecond laser based on Single-Crystal Fiber Amplifier, J. Saby and al. Advanced Solid State Lasers (ASSL) c OSA 2014, Ath2A.28
- [4] Nd:YAG single-crystal fiber as high peak power amplifier of pulses below one nanosecond, I. Martial et al. OPTICS EXPRESS Vol. 19, No. 12, p. 11667 (2011)
- [5] Yb:YAG single crystal fiber power amplifier for femtosecond sources, X. Delen and al. OPTICS LETTERS Vol. 38, No. 2, p. 109 (2013)

With the collaboration of

