

高出力シングルモード ファイバレーザの進歩

トーマス・シュライバー、アンドレアス・タナーマン、アンドレアス・ソス

高出力ファイバレーザの課題を特定し、それを基に光ファイバを最適化することにより、4.3kWのシングルモード出力を達成した。さらなる高出力化と、新しい超高速レーザへの応用が進められている。

レーザ技術に明らかなトレンドが1つあるとすれば、それはファイバレーザの台頭である。ファイバレーザは、高出力CO₂レーザだけでなく、高出力切断や溶接の分野においてバルク固体レーザからも市場シェアを奪っている。主要なファイバレーザメーカーは現在、さらに多くの市場を制覇するべく、多数の新しい応用分野をターゲットに開発を進めている。

このような高出力レーザの中でも、シングルモードのシステムは、輝度が最も高く、数ミクロンにまで集光可能で強度が最も高いという望ましい機能を備える。また、焦点深度が最も深いことから、リモート加工に適している。しかし、製造が難しく、10kWのシングルモード出力を備えるシステムを提供するのは、市場をリードする米IPGフォトンクス社 (IPG Photonics) のみである。残念ながら、そのビーム特性に関する詳しい情報は公開されておらず、特にシングルモードビームとともに存在する可能性のあるマルチモード成分については不明である。

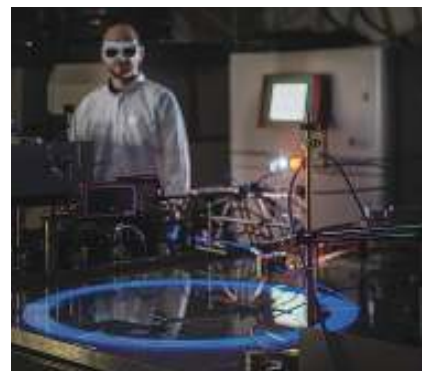
ドイツ政府の助成金を得て、独トルンプ社 (TRUMPF)、独アクティブ・ファイバ・システムズ社 (Active Fiber Systems)、独イェナオプティック社 (Jenoptik)、独ライプニッツフォトンク技術研究所 (Leibniz Institute of Photonic Technology) の協力の下、

独フリードリヒ・シラー大 (Friedrich Schiller University) と独フラウンホーファー応用オプティクス & 精密工学 (Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering) の科学者チームは、このようなレーザを高出力化するための課題を分析した上で、その制約を克服する新しいファイバを開発した。同チームは、一連のテストを実施し、4.3kWのシングルモード出力を示すことに成功した。このファイバレーザ出力は、入力ポンプパワーのみによって制約される。

シングルモードファイバレーザの高出力化を阻む要因

このようなシングルモード高出力ファイバレーザの課題は、次の3つの分野に分類することができる。つまり、a) ポンプの改善、b) 光損失が低く、シングルモードのみで動作するアクティブファイバの設計、c) 得られた放射の正確な測定である。本稿では、a) の課題は、高輝度半導体レーザと適切な内部結合手法によって解決済みと想定し、残り2つの課題に着目する。

高出力シングルモードで動作するアクティブファイバを設計するには、ドーピングとサイズという2つの一般的なパラメータを最適化する必要がある。損失を最小限に抑えること、シングルモードで動作すること、そして最



ドイツの研究者チームは、ファイバレーザによる4.3kWのシングルモード出力を実証した。出力は、入力ポンプパワーによってのみ制約される。

最終的に高出力増幅を達成することを目的に、すべてのパラメータを決定しなければならない。完璧なファイバ増幅器は、90%を超える高い変換効率と完璧なビーム品質を備え、出力パワーは使用可能なポンプパワーによってのみ制約される。

しかし、シングルモードシステムの出力を上げると、アクティブコア内部のパワー密度が高くなり、熱負荷が増加し、誘導ラマン散乱 (SRS: Stimulated Raman Scattering) や誘導ブリルアン散乱 (SBS: Stimulated Brillouin Scattering) といった多数の非線形光学効果が生じる恐れがある。

最も顕著なのは、イッテルビウムドープのシリカファイバにおいて一般的な効果で、ファイバ材料の純度が現在ほど高くなかったファイバレーザの初期の時代からよく知られている、光黒化効果である。レーザと材料の相互作用にともなって欠陥中心や色中心が材料に形成されるものである。これは寄

生的な効果で、ポンプ光子が熱に変換され、その結果として増幅が低下し、熱負荷が増加する。

アクティブコアのサイズに応じて、複数の横モードが励起および増幅される可能性がある。コアとクラッドの屈折率差を一定とすると、アクティブコアの断面が小さいほどそのようなモードの数は少なくなる。しかし、直径が小さくなるとパワー密度が高くなる。ファイバを曲げるなどのいくつかの対策は、高次モードになると損失が大きくなる。

さらに、コア径が大きく熱負荷が存在する場合は、その他のモードも生じ得る。これらのモードは増幅時の作用に影響されやすく、最適な伝搬条件下になければ、出力プロファイルは空間的または時間的に不安定になる可能性がある。

横モードの不安定性

イッテルビウム (Yb) ドープファイバは、高出力シングルモードファイバレーザの標準的な伝送媒体である。しかし、一定のしきい値を超えると、横モード不安定性 (TMI: Transverse Mode Instability) というまったく新しい効果が生じる。特定の出力レベルでは、高次モード、さらにはクラッドモードが突然出現し、エネルギーがこれらのモード間で動的に移動して、ビーム品質が低下する。出力ではビーム変動が生じ始める。

TMIはその発見以来、ステップインデックスファイバからフォトニック結晶ファイバにいたるまでのさまざまなファイバ設計で観測されている。そのしきい値はサイズとドーピングによってのみ左右されるが、大まかには、出力パワーが1kWを超えるとこの効果が現れると推定される。その一方でこの効果は、ファイバ内の熱効果と結合し、光黒化効果と強い関連性があるこ

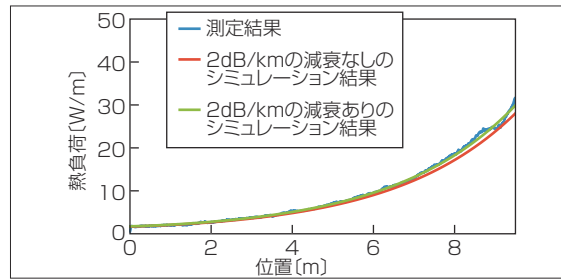


図1 アクティブファイバの熱負荷測定結果を、追加損失ありとなしの場合のシミュレーション結果と比較した。子。

とが明らかになっている。また、ファイバレーザがTMIの影響をどれだけ受けやすいかは、コアのモード成分によって左右されるようである。

ステップインデックスファイバのサイズに着目すると、多数のパラメータが最適化対象として挙げられる。コア径、ポンプクラッドのサイズ、コアとポンプクラッドの屈折率差のすべてがチューニング可能である。このチューニングは、ドーパント濃度に依存する。つまり、Ybのイオン濃度によって、アクティブファイバにおけるポンプ放射の吸収長が制御できる。他のドーパントを添加することにより、熱効果を抑制し、屈折率差を制御することができる。

しかしここに、相反する要件がある。非線形効果を抑制するには、ファイバを短くしなければならないが、熱負荷を低減するには、ファイバを長くしなければならない。光黒化効果はドーパント濃度の二乗に比例するため、ファイバを長くしてドーピングを低くすることも望ましい。

これらのパラメータに対する最初の提案値は、シミュレーションで決定することができる。熱動作などの一部のパラメータは、シミュレーション可能だが予測は難しい。特に、光黒化効果が意図的に低く抑えられており、加速試験では測定できないためである。そのため、ファイバ内で熱動作を直接測定することが、実験を計画する上で有効である可能性がある。

図1は、標準的なアクティブファイバについて、ファイバ増幅器内の温度分布同時測定結果から抽出した熱負荷測定値と、熱負荷シミュレーション結果を示したものである。長期的な温度プロファイルを正確に予測するために、追加損失はわずか2dB/kmで、損失は非常に低いと仮定した。

ファイバ設計におけるもう1つの重要なパラメータに、カットオフ波長がある。これは、アクティブコア内に複数のモードが存在し得る最長の波長である。この波長以上の高次モードはサポートされない。

ファイバそのものの特性のほかに、ファイバの曲げ特性や、シードビームの時間およびスペクトル特性など、増幅プロセスと損失メカニズムに影響を与える複数の手段が存在する。

キロワット出力を目標とする新しいファイバのテスト

徹底的なシミュレーションを実行したあとに、2種類のYbドープファイバを作成して調査する実験を最近実施した⁽¹⁾。ファイバ1はコア径30 μm で、リンとアルミニウムが添加されている。ファイバ2は、コア径が23 μm とファイバ1よりも小さく、リンとアルミニウムの添加濃度もファイバ1よりも低いが、ファイバ1よりも屈折率が少し高くなるようにイッテルビウムを多く含有する(表1)。

ファイバ1とファイバ2のカットオフ

表1 テスト対象ファイバの測定パラメータの概要(MFD:モードフィールド径)

ファイバ番号	外側コア径 (μm)	MFD (μm)	クラッド径 (μm)	ファイバ長 (m)	曲げ径 (m)	Ybドーピング (mol%)	Alドーピング (mol%)	Pドーピング (mol%)
1	30.0	22.7	460	35	1.1	0.07	0.5	0.9
2	23.0	20.6	460	30	1.1	0.09	0.4	0.6

波長の計算値はそれぞれ、1275nmと1100nm付近である。コア径20μm、開口数(NA:Numerical Aperture)0.06の標準的なファイバのカットオフ波長は約1450nmなので、それよりもかなりシングルモードに近い。増幅後のレーザ波長の中心は1067nmだった。

両方のファイバを、高出力ポンプ機構を使用してテストした(図2)。ポンプ半導体レーザとシード信号を、ファイバに自由空間結合させた。ファイバにはエンドキャップを接合し、冷却用の静水池で水洗浄したコネクタを取り付けた。シードは、位相変調した外部共振器型半導体レーザ(ECDL: External Cavity Diode Laser)で、1067nmで10Wのシードパワーと180pmのスペクトル線幅を達成するためにあらかじめ増幅した。

ファイバ1のテストでは、2.8kWのしきい値でミリ秒レベルの急激な変動が観測された。TMIの影響と考えられる。長さ30mで同じシード線幅のファイバ2では、最大3.5kWの出力パワーが得られた。こちらはSBSによって制約されるが、TMIの影響はなかった。

3つめの実験では、前の実験よりも

スペクトルを広げ、シードレーザスペクトルを変更することによってファイバのSBSしきい値を引き上げた。ここでは、中心波長を300pmシフトさせた2つめの半導体レーザを1つめのレーザと併用した。この干渉によって時間的ビートが生じ、自己位相変調によってパワーに伴って帯域幅が増加する。先ほど同じメイン増幅器で、ほぼ同等の出力パワーと90%のスロープ効率が得られたが、4.3kWにまで出力を高めることができ、TMIの影響はまったく見られなかった(表2)。

測定の課題

高出力ファイバレーザのすべての側面を測定するのはかなりの作業で、複数の異なる処理に対して特定の装置が必要になる。ファイバを完全に特性評価するために、ドーパント濃度、屈折率プロファイル、ファイバコア減衰を確認した。たとえば、異なる曲げ径に対するコア損失の測定は、TMIしきい値の相関に有効である可能性がある。

上記のファイバ増幅器テストにおいて、パワーのごく一部をフォトダイオードで分析することによってTMIしき

い値を求めた。パワーは、突然かつ大きく変動し始める(図3)。この信号変化は、ファイバ1のテストでは顕著だったが、ファイバ2では4.3kWのパワーレベルまで検出されなかった。この様子を図4aに示す。

スペクトル測定と時間測定は、従来技術で行うことができる。これによって、SBS(TMIとは別の時間特性)やSRS(スペクトル特性)の開始などの現象を検出することができる。増幅自然放出(ASE: Amplified Spontaneous Emission)やSRSなどの寄生スペクトル特性の初期増加を確認するために、高ダイナミックレンジで慎重に測定を行う必要がある。図4bは、その高ダイナミックなスペクトルを示したもので、SRSが検出されないことを実証している。

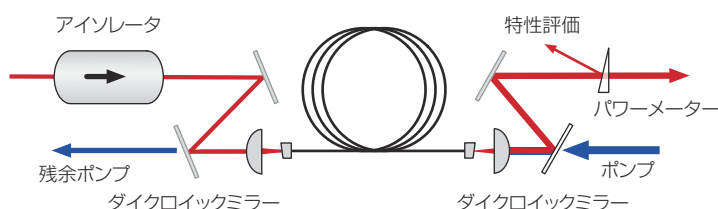


図2 ファイバ増幅器テストで使った、高出増幅器の実験設定。ファイバを976nmで逆伝搬向にポンプした。

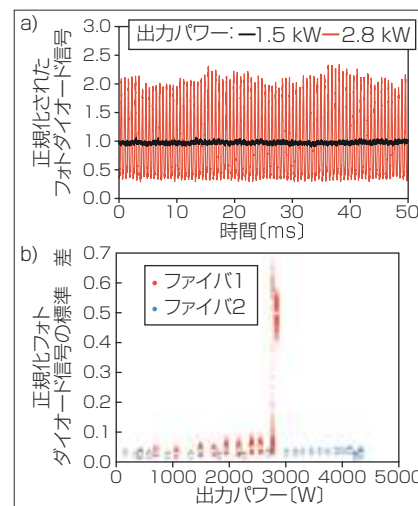


図3 (a)は、ファイバ1の出力信号テストにおける、TMIしきい値上下のフォトダイオード強度曲線。(b)は、さまざまな出力パワーにおけるフォトダイオード曲線の正規化標準偏差。

表2 ファイバテストの結果

ファイバ番号	外側コア径(μm)	ファイバ長(m)	出力スペクトル幅(nm)	最大出力パワー(kW)	制約要因
1	30.0	35	0.18	2.8	TMI
2	23.0	30	0.18	3.5	SBS
3	23.0	30	7.0	4.3	ポンプパワー

ビーム品質の測定は、ファイバレーザの特性評価において最も難しい部分であり、これについては別の場を設けて議論する必要がある。簡単に説明すると、熱効果を生じることなく減衰させることが重要で、フレネル反射や低損失の伝送光学部品を利用することによって、これを行うことができる。

本稿の実験では、ウェッジプレートを使用し、TMIが始まるよりも長い時間パルスポンピングを行うことによって、減衰を行った。4.3kWの出力パワーで、M²の測定値はX方向に1.27、Y方向に1.21だった。

超高速科学分野における応用

高出力シングルモードファイバレーザの高出力化が頭打ちになってから約

10年経った今、卓越したビーム品質を備える新世代のキロワット級ファイバレーザの開発が現実味を帯びてきた。4.3kWの出力パワーが確認されており、出力パワーはポンプパワーによってのみ制約される。さらなる高出力化の主要な制約要因が特定されており、その制約を克服するための手段も解明されている。

あらゆる既知の影響を慎重に調査し、それを基にパラメータの最適化を行うことによってファイバ設計を改良し、それが出力パワーの新記録達成につながったことに言及しておかなければならない。さらなる高出力化と、他の用途に向けたファイバの改変が可能と考えており、それを次の目標とする予定である。

これによって、いくつかの興味深い見通しが切り開かれる。まず、プロジェクトパートナー各社によってこの結果が産業用製品に適用されることが望まれるが、それには、さらなる多大な開発作業が必要である。また、この技術は、フェムト秒ファイバ増幅器などの他のファイバレーザシステムの高出

力化にも大いに関連する。

超高速レーザパルスのファイバ増幅器としては、シングルファイバではほぼ1kWがすでに達成されており⁽²⁾、複数の手法を組み合わせることによって、これを5kWまで向上させることが現時点で可能と考えられている⁽³⁾。このようなシステムはチェコ共和国のELIなどの研究施設で開発されているが、信頼性の高いビーム輸送手段を開発することが、産業用システムにおけるひとつの大きな課題として残っている。

シングルモードファイバレーザとフェムト秒ファイバ増幅器のどちらの高出力化にも、さらに多大な研究作業が必要である。フラウンホーファー IOFの隣に建設されたまったく新しい施設で、この取り組みが進められる予定である。この新しいファイバ技術センター建屋は2016年に完成し、アクティブおよびパッシブファイバとナノ構造光ファイバの製造と特性評価のための特別研究施設が収容されることになっている。特殊ファイバを製造するための独立したドローイングタワーも設置される予定である。

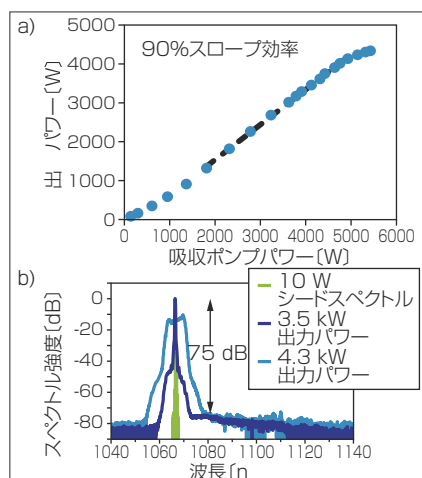


図4 (a)は、4.3kWの最大出力パワーまでのファイバ2のスロープ効率。(b)は、出力パワー3.5kW、出力信号対ASE比75dB、線幅180pmの光スペクトルと、7nmの帯域にまで広げた出力4.3kWのスペクトル。

参考文献

- (1) F. Beier et al., "Single-mode 4.3 kW output power from a directly diode-pumped Yb-doped fiber amplifier," to be published in Opt. Express.
- (2) T. Eidam et al., Opt. Lett., 35, 94-96 (2010).
- (3) M. Müller et al., Opt. Lett., 41, 3439-3442 (2016).

著者紹介

トーマス・シュライバー(Thomas Schreiber)は、独フラウンホーファー応用オプティクス&精密工学(Fraunhofer Institute of Applied Optics and Precision Engineering[IOF])に所属するファイバレーザ研究グループリーダー、アンドレアス・タナーマン(Andreas Tünnermann)は同ダイレクター。URL: www.iof.fraunhofer.de/en.html。アンドレアス・ソス(Andreas Thoss)は、独ソスメディア社(THOSS Media)社長。e-mail: th@thoss-media.de URL: www.thoss-media.de