• feature

ラージモードエリア MOPA 設計に 磨きをかける 3C 光ファイバ

ティモシー S. マコム、ジューナ J. コポーネン、ロバート J. マーチンセン、マイケル・アチレイ

カイラル結合コア(3C)光ファイバにより、高次モード(HOM)抑圧設計ができることから、ラージモードエリア(LMA)、回折限界に近いビーム品質、事実上のゼロモードポインティングが可能になる。

高精度レーザ材料加工アプリケーションは一般に、高いピークパワーと平均パワーを持つサブナノ秒パルスを必要とする。さらに、このような高いピークパワーは、高い整合性を持った小さな焦点で用いる必要がある。したがって、回折限界に近いビーム品質が極めて重要である。そのビーム品質は、至る所に姿を現すM²パラメータだけで捉えられるわけではなく、焦点範囲を通したビームの真円性の定量化、長期にわたるビーム指向性、出力安定性が含まれる。

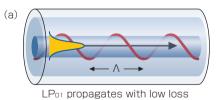
これら全てのパラメータが同時に働

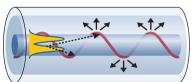
くわけではなく、ほとんどのレーザ加工は所望のパフォーマンスを達成しようと苦労している。MOPAは、2つの重要コンポーネントを結びつけることでそのようなアプリケーションの要求に応えることができる。時間的俊敏性があり、高い安定性を持つ短パルス種光源と、ラージモードエリア(LMA)光ファイバ、これらの技術だ。

いくつかの先進的LMAファイバタイプは、モードエリアを拡大して非線形効果が始まるしきい値を高めることで高いピークパワー性能を実現できるが、これらの技術は最も要求の厳しい

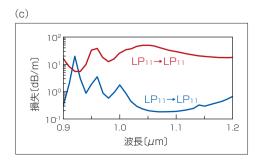
長期のシステム寿命でビーム品質パラメータを満たすことに四苦八苦していることが多々ある。ビーム品質要求を満足させる技術は一般に複雑で、使うには高価である。これは、空間光学系を必要とし、多くは空孔タイプの微細構造ファイバに高精度結合する必要がからである。

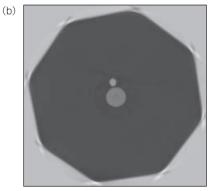
幸いなことに、カイラル結合コア(3C) 光ファイバは、このようなLMAの限 界を克服することができる。nLIGHT 社特許の3Cファイバと短パルス半導 体シードレーザプラットフォームを組 み合わせると、ピコ秒クラスの短パル





≥LP11 couple to side core





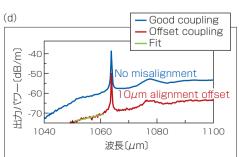


図1 カイラル結合コア(3C)光ファイバのモード伝搬(a)、33μmコア径ファイバ画像(b)、最も低い2つのファイバモードでモード損失 vs.波長のシミュレーション(c)、よく整列しオフセットされた33μmファイバのモードビート解析を示す。スペクトラルビート解析は事実上ビートがないことを示しており、したがって高純度シングルモード動作を示している。ここでは、ファイバモードビートを入力信号のアライメントずれの関数と見なしている。

スファイバレーザ MOPA が実現する。 パルス幅、繰り返しレート、パルスバー ストサイズは柔軟に決められる。

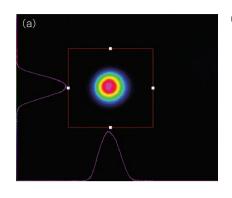
30 ファイバアーキテクチュア

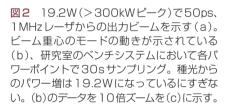
3Cファイバは、大きな中心コアに所望の利得媒体を添加してあり、1つあるいは複数のサテライトコアが巻き付けられている。線引き工程中に高速レートで回転し、これによってサテライトコアが数ミリメートルオーダーのピッチで、ファイバ長に沿って主コアの周りを周回する。らせん周期のピッチは、主コアのモードとサテライトコアのモードとの間に、疑似位相整合条件を作ることができる、ここでは両者の間に強い結合が生じている(2つのコアはエバネセント結合と考えられている)。

強い結合条件は、 β mc $-\beta$ sc + m· 2π / Λ =0で表される。ここでは β は主コアまたはサイドコアの伝搬定数、 Λ はらせんピッチである $^{(1),(2)}$ 。ファイバは、主コアの基本モードが低損失となるように設計することができる。一方、主コアの高次モード $^{(HOMs)}$ はサイドコアに強く結合し、ここでクラッド方向に放射される。その結果、ファイバは数10dB/mのHOM抑制となり、事実上純粋なシングルモード動作となる $^{(図1)}$ 。

標準的な M^2 < 1.15 およびコア真円 度 95%以上で、3C ビーム品質は測定誤差に制限されることがよくある。 33μ m コア 3C ファイバの寿命テストはピークパワー数 100kW で今までのところ連続4500時間であるが、これは nLIGHT 社の低フォトダークニング Yb ドープガラスのお陰でビーム品質の変化が無く、大きな出力劣化がないことを示している。

すでに述べたように、モードに起因 するポインティング効果も3Cファイバ では軽減されている、これは高純度基 本モード動作によるものである。標準

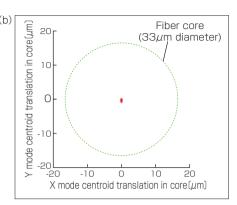


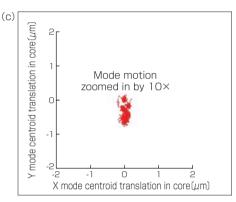


的な円形出力のニアフィールドプロファイルと、ファイバコア対パワーにおけるビーム位置のプロットは、この系で極小の動的モードに起因するポインティングを示している(図2)。

ポインティングは、種光から約2.4W ステップで19.2Wまでの8つの異なるパワー設定の全体で計測した。ビーム重心を、カメラソフトウエアにより、各点で30s撮影し、サンプリングレート0.5sで約4分、ポイントを記録しプロットした。テスト全体で、どの方向へも最大モード偏差0.5μmという結果が得られ、これはモードフィールド径の1.8%に相当する。

このポインティングは、完全な製品 化システムで計測されたのではなく、 ラボの実験用定盤システムでファイバ 端をテープで留め、マウンティング台 から片持ちして離した状態で計測した。 y方向ではパワーに対して計測した動 きの多くは、最小限固定したファイバ





の熱効果によるものである。x方向の動きは、計測システムの精度と同程度 (約 0.1μ m測定精度、最大動約 0.3μ m) であるので、モードに起因するビーム の動きは事実上無視でき、製品化されたシステムではさらに減らせる。

他の発表では、 33μ mコア3Cファイバは、>511W連続波 (CW)出力、10nsパルスでマルチミリジュールパルスエネルギーと報告した (3)。われわれの研究は、適度のピークパワー、数10ワットの平均パワー、バーストパルスの増幅での利用を達成する能力に注力している。

3C MOPAパフォーマンス

従来のファイバ技術と比較してレーザ効率に対する最低限の影響を指摘しておいた。テストは、33 μm3Cファイバをパルスファイバレーザ(PFL)種光アーキテクチュア(nLIGHT社のシングルエミッタダイオードレーザモジュー

• feature ファイバレーザ

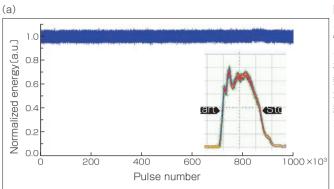
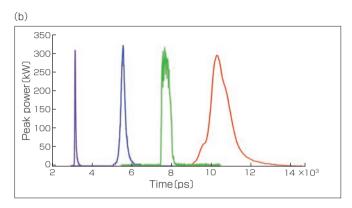


図4 PFLパルスは、高 エネルギーと時間的安定 性を示している(a)。 33μm3C MOPA、多 様なパルス繰り返し周波 数で、シングルパルスを 増幅してピークパワーを 約300kWとすること ができる(b)。



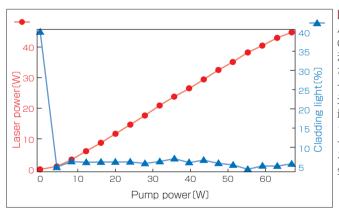


図3 クラッド光をフィルタで除去し45Wまでのレーザスロープを赤で示した。フィルタで除去されていないレーザパワー全体に対するクラッド光の比率は青で示した。最後の点でわずかにうねっているのは、ラボのデータ取得システムにおけるアライメントのズレで生じた人為的なもの。

ルと低フォトダークニングファイバで構成)のMOPAに組込んで行われた。 それぞれ、多様なシングルパルス、マルチパルス状態、広い範囲のパルス幅、繰り返し周波数は50ps~1ns、数10kHz~MHzとなっている。45Wまでスケールするパワーは、1MHzで1nsシードレーザ(種光)を動作させ、約73%のスロープ効率、65%の光から光への完全変換を生み出している(図3)。

3Cファイバの特性に内在するLP01

モードで小さな背景損失は製造の不完全性によって生ずる。また、わずかな曲げに起因する損失があるが、いずれも10分の何dB/mのオーダーである。これらの損失はクラッド光となるが、これはファイバに沿って分布する損失によって生ずる。これらの実験では、クラッド光は報告されたパワーには含まれていない。これは、ビームの再結像近視野に置いたハード開口によって除去されているためである。

この実験に使われた設定条件では (30cmファイバ巻径)、クラッド光はパ ワー全体の約6%であり、低い増幅パ ワーから高い増幅パワーまで相対的に 一定の値となっている。例外は、励起 していない状態で、このときはクラッド 光は40%近い。この原因は、クラッド の差損失、Yb吸収によるコア光、また 増幅器の入力で接続不整合による光だ。 増幅したときのクラッド光量は、ハイ パワー動作が、熱効果あるいは他の外 乱によって追加のHOMsを創出せず、 また他のLMAファイバ技術と異なり、 高いビーム品質を維持するためにロー パワーでは熱効果は必要でないことを 示している。

高利得動作の正味の効果と、わずかな曲げに起因する、またファイバ構造に起因する背景損失は、量子欠損に制限される増幅器よりもパフォーマンスが低下する原因となる。ビーム品質は、 $M^2 < 1.15$ で回折限界に近く、ビームの真円性は全ての出力パワーレベルで事実上変わらないことは指摘すべき点である。

半導体ベースPFLシードシステムは、必要に応じてパルス幅調整、任意の繰り返しレートパルスとすることができ、増幅中も高い安定性と最小のパルス歪を維持している(図4)。シングルパルスと、調整可能なパルス間隔のバーストモードの両方で3C増幅器システムを50ps~1nsまでテストして、1064nm付近の狭帯域から寄生非線形効果でパワーが低下し始める前に300kWのピークパワーレベルを達成することができる。

ラージコア3Cファイバによってかなりのエネルギーを蓄積してマルチミリジュールのエネルギーを取り出すことが可能になるが、短いシングルパルスモードのピークパワーが数100マイク

ロジュールのエネルギーを限界づけている。幸い、短パルスバーストモード動作で、この蓄積されたエネルギーをフルに利用することができる。さらに、狭帯域スペクトラルフィルタをこのパルスに適用すると、パルス形状は変わらず、パワーは落ちない。このことは、4nmのバンドパスフィルタを使い、全てのスペクトラルパワーが基本波1064nmの帯域内にあることを示している。

適正に調整した3Cファイバでは制限となる非線形効果は、誘導ラマン散乱(SRS)である。これは、全ての高いピークパワーのLMAファイバベースのMOPAシステムのピコ秒および低ナノ秒レンジで典型的な現象である。パル

ス幅50ps~1nmの範囲では、自己位相変調(SPM)も強い非線形効果となりうる。15dB幅で4nmオーダーのスペクトラルの広がりは、300kW、50psで起こる。一方1nsクラスのパルスでは非常に小さなスペクトラルの広がりが観察されている。

3Cの相対的に狭いスペクトラムと

安定した偏光特性は、緑やUV波長への周波数変換に適している。また、われわれは先頃、より大きな 55μ mコア 3Cファイバを作製した。これはいずれ、優れた、回折限界に近いビーム品質でメガワット (MW)のピークパワーに近づくと期待されており、さらにパワーは伸びる兆しが見えている。

参老文献

- (1) M. C. Swan et al., " 33μ m core effectively single-mode chirally-coupled-core fiber laser at 1064-nm," OFC-NFOEC, San Diego, CA (2008).
- (2) X. Ma et al., Opt. Exp., 19, 27, 26515-26528 (2011).
- (3) T. Sosnowski et al., "3C Yb-doped fiber based high energy and power pulsed fiber lasers," SPIE Photonics West 2013, 8601-57, San Francisco, CA (Feb. 7, 2013).

著者紹介

ティモシー S. マコムはファイバレーザ主席設計者, ジューナ J. コポーネンはファイバ設計ディレクター, ロバート J. マーチンセンはCTO, マイケル・アチレイは、nLIGHT社の製品マーケティングディレクター。nLIGHT, 5408 NE 88th Street, Building E, Vancouver, WA 98665;

e-mail: michael.atchley@nlight.net URL: www.nlight.net

LFWJ

光産業技術マンスリーセミナー



Optoelectronics Industry and Technology Development Association

プログラム(5~6月)

No. / 開催日	講演テーマ/講師
第 372 回 5月20日(火) 15:30-17:30	「GPUを活用したホログラフィックディスプレイとディジタルホログラフィ計測」 講師: 下馬場 朋禄氏(千葉大学 准教授)
第 373 回 6月17日(火) 15:30-17:30	「人に優しい3Dディスプレイ技術と映像コミュニケーションへの応用」 講師: 高田 英明氏 (NTTメディアインテリジェンス研究所 主任研究員)

■場所 一般財団法人光産業技術振興協会

■定員 各60名

■参加費 光協会賛助会員:1,500円(税込み) / 一般参加:3,000円(税込み)

※支払いは、当日受付にて現金でお願いします。

■申込方法 オンライン申込フォーム >>> http://www.oitda.or.jp/main/monthly/monthly_postmail.html

■申込締切 定員になり次第締め切ります。なお、締め切った場合には Web 上にその旨を掲載します。

問い合わせ先 一般財団法人光産業技術振興協会マンスリーセミナー担当 潮田、綿貫

〒112-0014 東京都文京区関口 1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル7F TEL:03-5225-6431 FAX: 03-5225-6435

E-mail: mly@oitda.or.jp URL:http://www.oitda.or.jp/