先端科学の応用を可能にする高出力光ファイバ増幅器

ジム・ディング、ブライス・サムソン、パイマン・アフマディ

光出力が数百Wにまで改善された高フィネスの光ファイバ増幅器は、原子のトラッピングと冷却や重力波検出などの先端科学のための優れた研究手段になっている。

産業用レーザ加工装置への高出力ファイバレーザの採用は数年にわたり継続され、現在の利用は医療や科学分野を含めたその他の市場にも拡大している。科学分野への浸透の鍵になった要因の一つは、高フィネス光ファイバ増幅器の改善にあり、優れたビーム品質と安定な直線偏光出力に加えて、単一周波数スペクトル線幅（5kHz以下）が得られることであった。

このような仕様を満たす光ファイバ増幅器システムは、最近の数年間に出力特性が着実に進歩し、数年前の数Wから現在の数百Wへと増強された。このような出力の増強は増幅器の全体設計の改善に加えて、誘導ブリルアン散乱（SBS）の抑圧やファイバ内の応力緩和などの技術を用いて実現されている。最新の高フィネス高出力光ファイバ増幅器は、商用の固体単一周波数光源を超えるパワーレベルが得られ、より高いパワーレベルと安定で最適化された性能が特徴となる新しい科学分野への応用を開拓している。

光ファイバのSBSの問題

光ファイバのSBSは光通信との関連で長期にわたり研究されてきた。光通信用の光ファイバは長い距離（数十km）の効果がSBS閾値を減少させ、伝送可能な信号パワーを制約している。今日の希土類ドープ高出力ファイバレーザや光増幅器はファイバの長さが非常に短く、一般には数mから数十mの長さしかない。その結果、SBS閾値ははるかに高く、数Wから数百Wの範囲になる。伝送信号に対するSBS閾値の効果は後方反射ストークス波の急速な立上りとして現れ、出力パワーがSBS閾値を超えると、指数関数的に増大する。

いわゆるラージモードエリア（LMA）ファイバを使用してファイバコアを大きくし、有効モード領域を拡大することは、SBS閾値を増加させる簡単な手段になる（**図1**）。標準の通信用ファイバ（一般に5～10μmのコア径）よりも大きな20μmまたは25μmのコア径をもつ最新のLMAファイバを用いることにより、SBS閾値は、市販の光ファイバ増幅器に適切なファイバ長（5～10m）に対して50W以上に引き上げることができる。コイル巻きやモード整合などの新しい光ファイバ技術を用いることで、このようなコア径25μm以下のLMAファイバからは回折限界に近いビーム品質が得られている[(1)～(3)]。さらに、偏波面保持LMAファイバを設計パラメータの一つとして利用することもできる。このような光ファイバを使用すると、狭いスペクトル線幅の偏光光源ビームの増幅が可能になり、最先端科学への数多くの応用において必要な非常に高いパワーレベルを得ることができる。

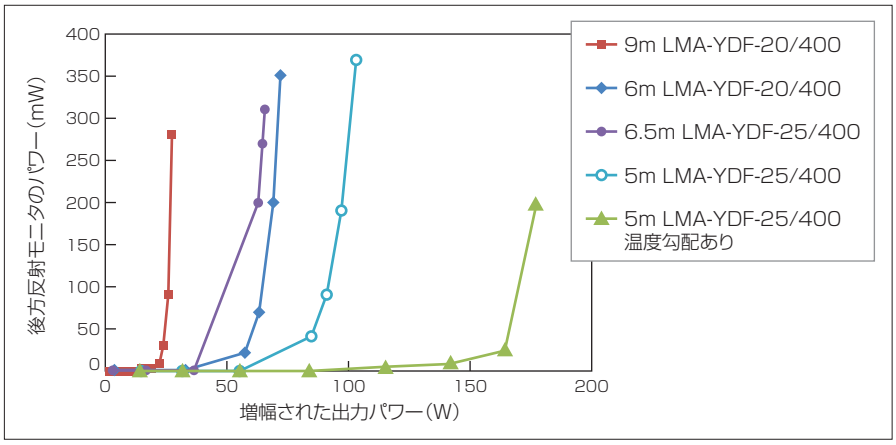
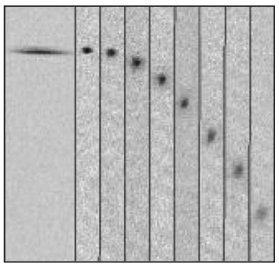


図1　光ファイバ増幅器のSBS閾値は20ないし25μmのコア径をもつLMAファイバを使用すると増加し、単一周波数システムの最大出力が50Wを超える。温度勾配を付与すると、150W以上の閾値への増加も可能になる。

原子のトラッピングと冷却

強く集束された共鳴外レーザビームを利用して生成される光双極子トラップは、中性原子のレーザ冷却とトラッピングを目的にして提案された[(4)]。こうしたトラップによる初期の研究は、原子の加熱による短いトラップ寿命に

(a)



(b)

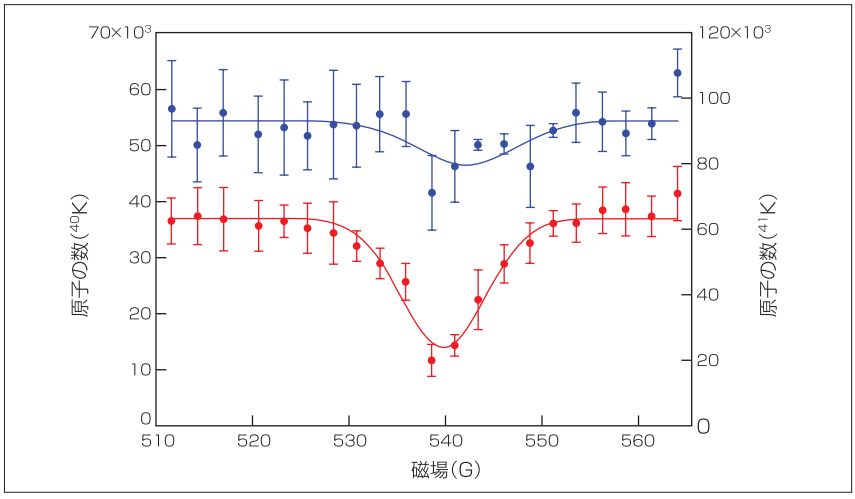


図2　この飛行時間法による写真は光双極子トラップに取り込まれていた^{41}KのBECを示している(a)。これらのBEC画像は光トラップが突然止まり自由に膨張する原子が2msの間隔で撮影されている。また、光トラップに取り込まれた^{41}K-^{40}Kのボーズアインシュタイン混合物のフェッシュバック走査が行われた。青と赤のデータ点は均一な外部磁場に曝された双極子トラップに3秒間にわたり保持される^{41}K原子と^{40}K原子の数を示している(b)。(資料提供:ニューファン社)

悩まされてきた。加熱の主な原因は、レーザの強度雑音と指向性の不安定性にあると推定された。この制約要因は非常に安定した高出力ファイバレーザの登場によって解決され、現在は量子縮退ガスが日常的に生成され、光トラップによる研究が行われている。新世代の光ファイバ増幅器を用いた光双極子トラップは必須の研究手段になり、超冷却原子および分子物理学の研究の最前線を開拓している。

光トラップを利用する研究には、基本的対称性の試験、原子周波数標準、単一原子のトラッピング、量子縮退ガスの生成、大規模量子情報処理システムの開発などが含まれる。二つの対向伝搬光トラップを用いて光学格子を生成する技術も最近に開発された高出力狭線幅ファイバレーザの恩恵を受けている。この技術は中性原子の量子ビットをサブ波長の精度で閉じ込め、中性原子と空洞共振器モードを結合して、量子ガスにおける量子相転移の研究を可能にする。

われわれは米MIT - ハーバード超冷却原子センター(Center for Ultracold Atoms:CUA)において、光ファイバ増幅器を日常的に使用し、量子縮退ガスをトラップして、これらの原子雲の発展に対する相互作用の効果を研究している。カリウム(K)原子ガスを用いた研究の1例では、光双極子トラップに注入された^{41}Kのボーズ - アインシュタイン凝縮の飛行時間写真を取得した(**図2**)。このトラップは米ニューファン社(Nufern)の光ファイバ増幅器から生成された5Wのレーザビームと150μmのビームウエストを使用して形成された。原子雲は約400nKの温度があり、撮像前の約2秒間は光トラップのなかに保持された。このようなレーザビームのトラッピングは極端な安定性が必要であり、加熱速度を数nK以下に抑える必要がある。

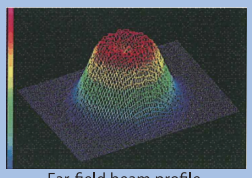
われわれはトラップ原子を均一磁場

PRINCETON OPTRONICS

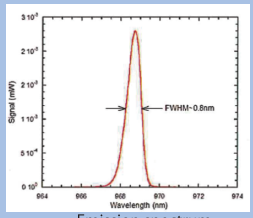
これが
高出力 VCSEL
です

この高出力半導体レーザーは
エッジエミッター方式に比べ
数々の特徴があります！

◆ビームの質がよい

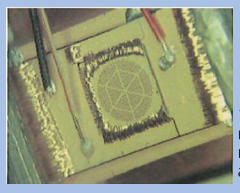


Far-field beam profile

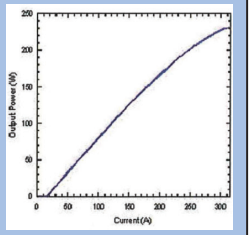


Emission spectrum
5mm×5mm VCSEL array at 100W output power

◆高スケーラビリティ



100W CW single mode VCSEL array mounted on a micro cooler



その他の特徴
◆温度依存が低い
◆製品間のばらつきが小さい
◆バックトークが少ない
◆波長の安定度が高い
◆FIT<10

AUTEX オーテックス株式会社
URL http://www.autex-inc.co.jp
E-mail Sales11@autex-inc.co.jp
東京本社　〒162-0067
東京都新宿区富久町16-5 新宿宿高砂ビル
TEL. 03(3226)6321 FAX. 03(3226)6290
大阪支社　〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29
TEL. 06(6344)6328 FAX. 06(6344)6342

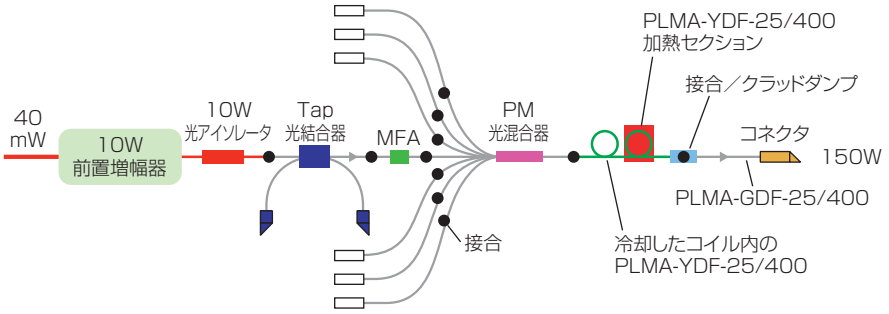


図3 YbドープLMAファイバの長さ方向の温度勾配を付与すると、ファイバの高出力単一周波数性能が改善される。励起用半導体レーザのサーボループを最適化すると、VIRGOプログラムのRIN値は最適値にまで減少する。

に曝すと誘起されるフェッシュバック共鳴（多体系共鳴の特殊な形）を利用して、原子間の相互作用の操作を実験した。^{41}Kと^{40}Kの二つのカリウム同位体間に生じるフェッシュバック共鳴の実験では、ニューファン社の40W光ファイバ増幅器を使用し、その1064nm波長の2本の100μmレーザビームを交差して、トラッピングポテンシャルを形成した。われわれは近い将来、さらに高いパワーをもつ光ファイバ増幅器を使用し、より多くの原子を捕獲できる深いトラップの生成を計画している。この計画では超冷却量子ガスの実験がより高い信号対雑音比で可能になる。

その他の応用

このような安定で単一周波数の偏波面保存高出力光ファイバ増幅器は、共鳴周波数変換に用いる光共振器への結合にも理想的な光源になる。最近では40W高出力光ファイバ増幅器の出力の周波数2倍化を使用して、32Wの532nm光が生成された[5]。このような高出力可視光源はディスプレイに加えて、高出力Ti：サファイアレーザの励起などの科学分野への応用も期待される。

仏コートダジュール天文台は次世代欧州重力干渉計、Virgo用として、高出力光ファイバ増幅器の評価実験を行っている。現在は低出力単一周波数Nd:YAG非平面リング発振器とバナジウム酸イットリウム（Nd：YVO_4）増幅器から成る2段システムを用いて50Wへの増幅が行われている[6]。次世代システムは低周波数雑音のスペクトル密度（10^{-6}Hz$^{-1/2}$のオーダ）、安定した直線偏光、10^{-8}Hz$^{-1/2}$以下の相対強度雑音（RIN）を組合せた100W以上の出力を目標にしている。100～200W領域の高出力システムは重力波検出の感度の改善される明確な利点を持つ。

SBS抑圧ファイバなどのファイバと導波路の設計を改良し、温度勾配をファイバの長さ方向に付与するなどの外部からのSBS抑圧技術を採用すると、ファイバ増幅器のSBS閾値を100Wレベル以上に増強し、レーザビームの良好な空間品質を維持することが可能になるであろう。LMA光ファイバ増幅器の長さ方向に簡単な温度勾配を形成する簡単な実験では、SBS閾値の約150Wへの増加が実証されている[7]（**図3**）。温度勾配は光ファイバ増幅器における異なる部分のブリルアン周波数のシフト効果をもつため、ファイバの長さ方向のSBS利得が不均一に広がり、SBS閾値が増加する[8]。

コートダジュール天文台の最初の実験は、このような光ファイバ増幅器とNd：YAG単一周波数シード光源とを組合せて行われた。増幅器励起用の半導体レーザに働く簡単なサーブループを最適化する実験が行われ、20Hzから1kHzの範囲のRINが4×10^{-9}Hz$^{-1/2}$に減少することが実証された。全ファイバシステムに固有の利点（構造が簡単、保守が容易、高効率、良好なビーム品質、低コストなど）を生かした実験も行われ、偏光とレーザビームの安定性が確認された。これらの結果は次世代の重力波干渉計の計画を魅力的なものにしている。

参考文献

(1) K. Tankala et al., "PM double-clad fibers for high power lasers and amplifiers," Advances in Fiber Lasers, Ed. L. N. Durvasula, Proc. SPIE, 4974, 220(2003).
(2) J.P. Koplow et al., "Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier," Opt. Lett., 25,442(2000).
(3) M.E. Fermann, "Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses," Opt. Lett., 23, 52,(1998).
(4) S. Chu et al., Phys. Rev. Lett., 57, 314(1986).
(5) J.P. Anderegg et al., "RGB laser generation from fiber MOPAs coupled to external enhancement cavities," Proc. SPIE Fiber Lasers VII: Technology, Systems and Applications, 7580.
(6) C. Grécerie et al., "High power fiber amplifier for Advanced Virgo," Proc. CLEO 2010, paper JTuD36.
(7) D. Walton et al., "Kilowatt-level narrow-linewidth-capable fibers and lasers," Proc. SPIE, 6453(2007).
(8) V.I. Kovalev and R.G. Harrison, Opt. Lett., 31, 161(2006).

著者紹介

ジム・ディング（Jim Ding）とブライス・サムソン（Bryce Samson）はニューファン社に所属し、パイマン・アフマディ（Peyman Ahmadi）は米マサチューセッツ工科大学（MIT）の超冷却原子センターに所属している。e-mail: bsamson@nufern.com

LFWJ