パワーを増強するビーム結合

ジェフ・ヘクト

コヒーレントおよび波長ビーム結合はここ数年の間にそれらの出力パワーを増倍し、ファイバレーザコヒーレント結合とダイオード波長ビーム結合においてキロワットが達成された。

ファイバレーザとダイオードレーザは小さな体積から驚異的なパワーを発生させることができるが、単一のレーザ開口部からの出力は非線形損失、熱影響、光損傷などによって制限される。これらの制限は多数のレーザ開口部の出力を結合することで乗り越えられる。

最も簡単なアプローチは多数のレーザビームを同一方向に向けるインコヒーレントなビーム結合であるが、これは全体のパワーを増強するものの、ビーム輝度を高めることはできない。輝度を高めるには、より巧妙な技術が必要になる。1つは、振幅を構造的に加算するコヒーレントビーム結合である。もう1つは、波長分割多重方式と同様の、異なる波長のビームを結合させる波長ビーム結合であり、これは位相整合の複雑さを避け、レーザ放射の帯域幅が拡大する。4年前にこの領域のレビューをLaser Focus World誌[1]に掲載してから今日までの間に、両アプローチとも非常に高いパワーを発生した。しかし、これまでのところ、インコヒーレント結合がパワーの記録を保持し続け、レーザ兵器用途に向けて開発が進められている。

インコヒーレントビーム結合

半導体ダイオードレーザのモノリシックアレイは最も確立されたインコヒーレント結合の例である。多数のレーザストライプはブロードな高パワービームに結合するが、指向性に乏しい。これは、高度の指向性を必要としないレーザポンピングや熱処理用として有用である。

ファイバレーザからの高品質ビームのインコヒーレント結合はかなり指向性の強いビームを生成することができ、これはレーザ兵器としての利用に向けて真剣に取り組まれている。米国海軍研究所（Naval Research Laboratory）のフィリップ・スプラングル氏（Phillip Sprangle）の研究グループは、「光源のビーム輝度が重要になるのは擾乱大気中における現実的な“指向性エネルギー”伝達シナリオを検討する時に限定される」と2008年に報告している[2]。ファイバレーザアレイはこのことを保証する。米海軍は33kWのレーザ兵器

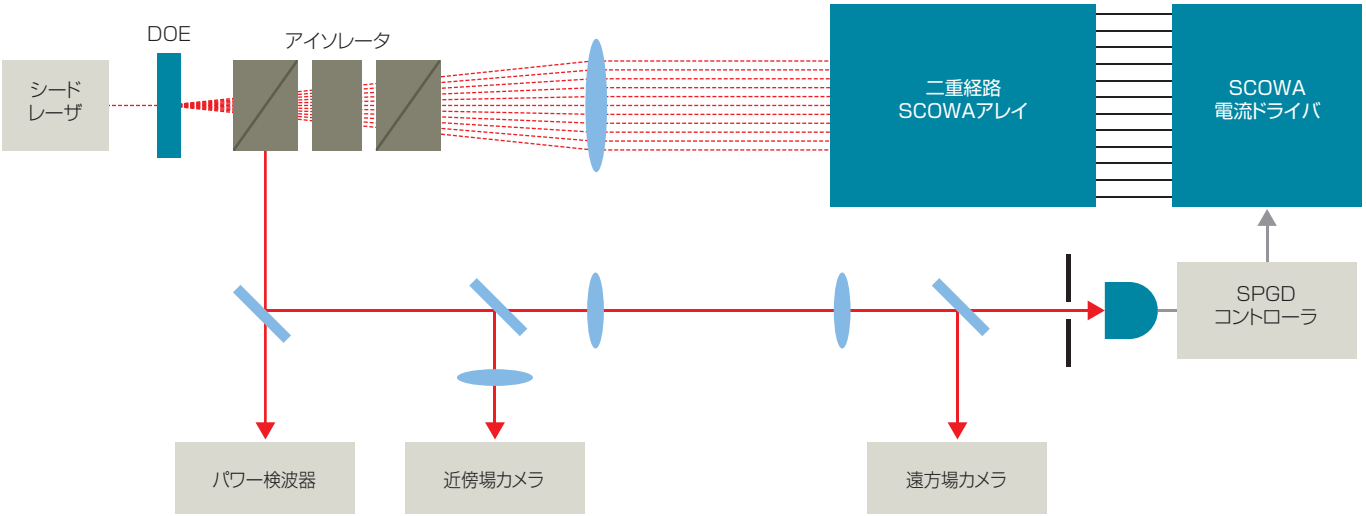

図1　リンカーン研究所のコヒーレントビーム結合システムの第一ステージでは、シードレーザの出力は分割され、SCOWAアレイの21のチャンネルによって増幅され、その出力の一部は、確率的並列勾配下降（SPGD）アルゴリズムを使って位相コントローラへとサンプリングされ、SCOWAアレイにフィードバックされる。次いで、その出力は11の並列SCOWAアレイ（示されていない）間に分割される。（資料提供:MITリンカーン研究所、再掲載許諾済み[4]）

システム（LaWS）の生産を目的として6台の5.5kW産業用ファイバレーザアレイを組み合わせ、2010年に1海里離れた距離にある水上の代表標的で確かめた。これらのテスト結果に満足した米海軍は、2014年完成を目標に、LaWSの100kW級へのスケールアップを進めている[3]。

ダイオードコヒーレントビーム結合

コヒーレントビーム結合は、位相を伝送してコヒーレント出力を発生させるエミッタアレイ、いわゆるフェーズドアレイレーダに類似する。原理的に、位相におけるエミッタ操作とそれらのビームの適切な結合とによって操舵型ビームを発生させることができるが、これまでのところ最大の努力は出力の結合に払われてきた。

ダイオードコヒーレントビーム結合は1990年代に最高900個のレーザストライプを使って実証されたが、シングルモード出力の必要性と厳密な位相同期要求とによって、その出力は最高5.5Wに制限された。この限界は多数の並列増幅器を駆動する新しい技術と主発振器光源の使用によって乗り越えられた。昨年、米MITリンカーン研究所のツオ・イー・ファン氏（Tso Yee Fan）のグループは218の個々に操作可能なスラブ結合光導波路（半導体）増幅器（SCOWA）アレイを使って38.5Wの連続波を発生させることに成功した[4]。

図1に示すように、まず、回折光学素子がシードレーザビームを21の出力に分割し、それらを200μmピッチ上の大きな円形モードプロファイルをもつ並列増幅器に供給した。増幅器アレイを通過する二重経路は21の平行ビームを生成し、それらを監視して位相同期信号を発生させた。それから、第1の回折光学素子に対して直角に配置された第2の回折光学素子は21の並行出力のそれぞれを11部分（11の並列SCOWAアレイそれぞれの二重光路増幅用）に分割した。それらは第2ステージSCOWAアレイにおける231のストライプのうち218から位相同期された出力を生成した。残る13のストライプは成功しなかった。成功するには多数の素子に対する位相制御が不可欠であ

BioOpto Japan 2012
Conference + Exhibition
光＋バイオ・医療の専門展
www.optojapan.jp/bio
WEB 事前来場登録スタート
ご登録受付中！
＊展示会入場料が無料になります。
Sep.25 火 - 27 木 10:00-17:00
パシフィコ横浜 Pacifico Yokohama
主 催：株式会社 ICS コンベンションデザイン
Organized by: ICS Convention Design, Inc.
［同時開催］
INTERNATIONAL OPTOELECTRONICS EXHIBITION 2012 interOpto 2012
LED JAPAN Conference & Expo Strategies in Light
LaserTech 2012
展示会についての
お問い合わせ・お申し込み
BioOpto Japan事務局：株式会社ICSコンベンションデザイン
〒101-8449 東京都千代田区猿楽町1-5-18 千代田ビル
TEL：03-3219-3643 FAX：03-3219-3628 e-mail：bioopto@ics-inc.co.jp

った。ファン氏は、「われわれは、何個の素子をコントロールできるのかを追求している」と語った。その本質的な限界は明確でない。彼は「どこまで到達できるかを証明する1つの方法は実験だ」と付け加えた。

ダイオード波長ビーム結合

波長ビーム結合（WBC）はダイオードレーザから非常に高いパワーと輝度レベルを発生させることができる。米テラダイオード社（TeraDiode）は2kWに達したと2012年1月に開催されたPhotonics Westで報告している[5]。同社のパルビス・タイエバティ氏（Parviz Tayebati）は、「このデモンストレーションは、ダイオードが直接的に最良のファイバレーザと同種の輝度を生成することができ、産業用途に適していることを示した」と語っている。さらに、固有のウォールプラグ効率は十分に高く、最近のプロトタイプシステムでは46%に達した。

彼らのアプローチは**図2**に示された外部共振器設計に基づくもので、変換レンズ、回折格子、出力カプラを含む外部共振器内にダイオードアレイを配置している。外部共振器光学系は、970nmに中心があるダイオードの40nmの利得バンド上に密接な間隔で配置された各レーザストライプの異なる発振波長を選択できるように整列されている。その角度が波長を選択し、安定化させる。結合された出力は約30nmの帯域幅を持ち、自由空間またはビームデリバリーファイバへと結合される。

現在、テラダイオード社は2012年後期の試用機完成を目標にWBC技術の商用化を進めている。その設計は約500Wの連続波を供給することができる多波長モジュールに基づき、積層すれば最高約6kWのパワーを発生する。タイエバティ氏は、「最近のDARPA支援のデモンストレーションにおいて、われわれはシングルモードファイバレーザ技術に匹敵する0.6のビームパラメータ積（BPP）で360Wを実証した。われわれの製品導入は主なカッティングや溶接の市場で必要とされるような、より馴染みのある2～8のBPPを提供するであろう」と語っている。その輝度レベルは産業用のファイバおよびCO_2レーザに匹敵し、標準的な高出力ダイオードレーザの約10～100倍である。

ファイバレーザビーム結合

回折限界のファイバレーザはマルチキロワットのパワーに達することが可能だが、さらなるパワーの増強は熱限界と誘導ブリルアン散乱などの非線形効果によって制約される。ビーム結合はより高いパワーへのより迅速かつ容易な経路を提供する。ビームは、大口径コアのマルチモードファイバ内でファイバレーザ出力をインコヒーレントに混合することによって結合され、最高50kWの連続出力を発生する。しかし、コヒーレントまたは波長ビーム結合は多くの用途で必要な、より高い輝度とより優れたビーム品質を保証する。

リンカーン研究所とノースロップ・グルンマン・エアロスペースシステムズ社（Northrop Grumman Aerospace Systems）の研究チームは、市販の500Wイッテルビウムファイバレーザを使ってコヒーレント結合と波長結合を比較した[6]。コヒーレント結合は、波長の微小な範囲での位相制御、密接な光路長整合、狭いレーザ線幅、均一な偏光などの必要性ゆえに、実装がより困難であるが、高いスペクトル輝度を提供し、ビームステアリングや大気補正のための位相調整が可能であることを見出した。波長ビーム制御は、実装は比較的容易であるが、スペクトルがよりブロードになる。したがって、スペクトル輝度はさほど重要ではないが、生のパワーデリバリーを必要とする用途に最適である。

ファイバレーザビームは、開口部を横切って位相同期されたレーザ（または増幅器）アレイのタイリング出力によって、あるいは、**図3**に示されたようなより広く広がるファイバエミッタアレイからの光で開口部を照明するための変換光学系と回折光学素子を調整することによって、コヒーレントに結合することができる。リンカーン-ノース

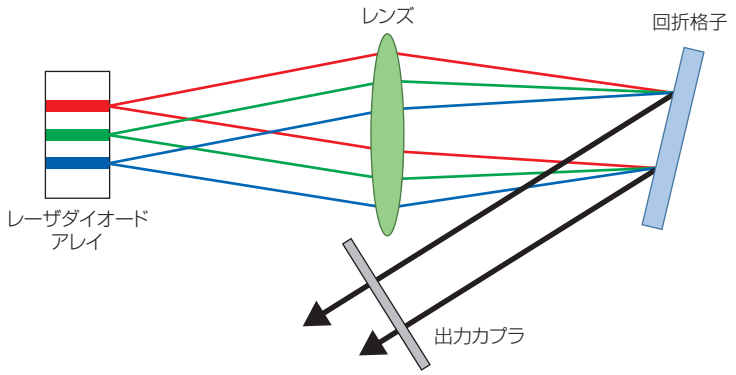

図2　外部共振器内に含まれる線形ダイオードアレイによる波長ビーム結合のインプリメンテーション。すべてのダイオードストライプは同じ利得帯域幅を持っているが、外部共振器は赤、緑、青で示された、異なる発振波長を選択し、次いで、それらを1つの出力に結合する。テラダイオード社はこのアプローチを受動冷却ダイオードで使用した。（資料提供：テラダイオード社、再掲載許諾済み[5]）

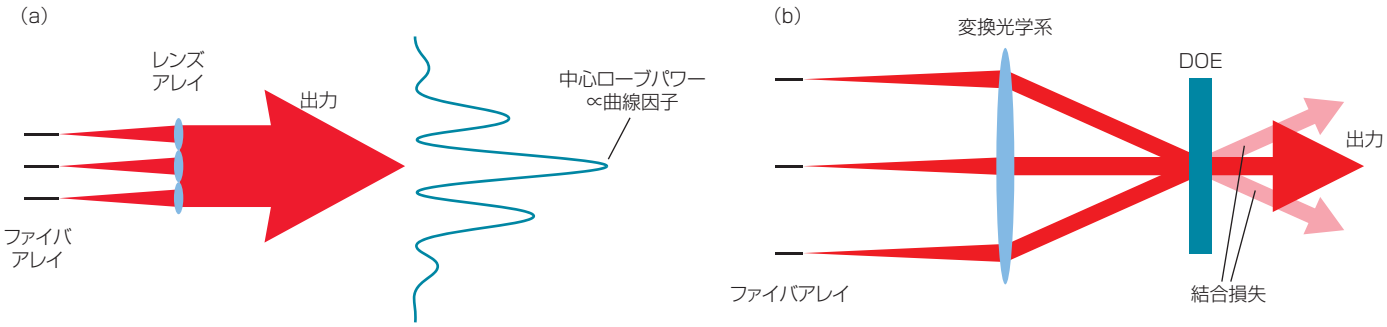

図3　a)タイリング開口部コヒーレントビーム結合では、ビームは中心ピークとサイドローブ.でターゲット開口部をカバーするように個々に集光させる。b)充填開口部コヒーレントビーム結合では、1つの変換光学系が回折光学素子上にそれらを集光する。回折光学素子は、漏れ残留光を損失として、各入力ビームを出力ビームへと再び方向づける。(資料提供:S·J·オーグスト、再掲載許諾済み[6])

ロップチームは、タイリングは、4kWまでのインプットの場合、全パワーの58%を望ましい中心ローブ内に集中させることを見出した。理論上、タイリングは放射要素の数の2乗だけ軸上強度を増強する。しかし、彼らは、8個のエミッタを用いたタイリングによる増強がたった64倍にしかすぎず、ビーム結合効率にして78%であることに気付いた[7]。彼らは、同一のファイバレーザアレイ、フィードレーザ、そして開口部充填法と5素子回折光学素子による位相制御系を使うことによって、使用された5ビームの最大パワーにおいて79%のビーム結合効率を得たと報告している。

彼らはまたコヒーレント試験に使われた6つの同一ファイバレーザだが、5つは0.4nm間隔で、6番目は、オフセットが0.8nmの異なる波長のシードレーザを使って波長ビーム結合を試験した。光学配置は図2に示したようなダイオード波長ビーム結合でのそれに類似する。その配置を使用して、彼らは2.51kWの出力と92%の結合効率を報告した。3つの実験はすべて回折限界近くの出力を生み出した。

ビーム結合の将来展望

他の開発研究者たちはビーム結合関連の多様な技術について研究している。米セントラルフロリダ大学(University of Central Florida)のレオニド・グレボフ氏(Leonid Glebov)は体積ブラッググレーティングを使って99%の効率で2つのファイバレーザをコヒーレントに結合し、282Wを発生させた[8]。昨年、フランス国立宇宙研究センターのオネラ研究所では、1対のファイバレーザからの100nsパルスを95%の効率でコヒーレントに結合したが、非線形効果が位相同期コントローラの帯域幅を超える可能性があることが課題として残った[9]。1対のチャープパルスファイバ増幅器からのビームのコヒーレント結合は89%の効率で3mJパルスを発生した[10]。

進歩は速く、選り分けなければならないことも多数残っている。3つの主要なアプローチはすべて将来有望であり、それぞれがそれ自身の別個の用途を見出すであろう。コヒーレントビーム結合は最高の性能を約束するとはいえ、最も複雑なアプローチであるようだ。波長ビーム結合は、多数のアプリケーションに対する実装をより容易にするであろう。インコヒーレント結合が高エネルギーレーザ兵器用として十分に優れているのか否かを確かめることも興味深いことであろう。

参考文献

(1) J. Hecht, "Photonic Frontiers: beam combining - Combining beams can boost total power," Laser Focus World, 44, 7 (July 2008).
(2) P. Sprangle et al., "High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications," 2008 NRL Review, pp. 88?99; www.nrl.navy.mil/ content_images/08FA3.pdf.
(3) R. O'Rourke, "Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense: Background and Issues for Congress," Congressional Research Service (Jan. 21, 2011); www.fas.org/sgp/crs/weapons/R41526.pdf.
(4) S.M. Redmond, "Active coherent beam combining of diode lasers," Opt. Lett., 36, 909?911 (Mar. 15, 2011).
(5) R.K. Huang et al., "Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO2, and solid state lasers," Proc. SPIE, 8241, 824102 (2012).
(6) S.J. Augst et al., "Coherent and Spectral Beam Combining of Fiber Lasers," Proc. SPIE, 8237, 823704 (2012).
(7) C.X. Yu et al., "Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array," Opt. Lett., 36, 2686 (2011).
(8) I. Divliansky et al., "Multiplexed volume Bragg gratings for spectral beam combining of high power fiber lasers," Proc. SPIE, 8237, 823705 (2012).
(9) L. Lombard et al., "Demonstration of coherent beam combination of fiber amplifiers in 100ns-pulse regime," CLEO, paper CFE2 (2011).
(10) A. Klenke et al., "Coherently combined CPA fiber laser system delivering 3 mJ femtosecond pulses," Proc. SPIE, 8237, 823708 (2012).

LFWJ