

光の成形：デジタルレーザーの到来

ジャン-クリストフ・シャントルー、セヴェリーヌ・ベランジェ、ルイ・ダナルト、
イーサン・フサイフェス、マシュー・ヴェインハード、ジェローム・ブーデリオネット、
クリスチャン・ララト、エリック・ラリエ、アルノー・プリニオン

さまざまな出力領域における光成形の可能性を秘めた、フルデジタルレーザーという新しい時代への道すじを切り拓く、コヒーレントビーム結合の新しいアプローチを紹介する。

特定の実験または産業ニーズに合わせた配光調整は、光学エンジニアリングという学問分野が誕生したときから探求され続けている目的である。しかし、1960年にレーザーが発明されて初めて⁽¹⁾、人類はコヒーレントな光をこの目的に利用できるようになった。

最初のファイバレーザーが発表されたのは、それからまもなくのことだったが⁽²⁾、市場に登場したのは1980年終盤になってからだった。それは、チャープパルス増幅(Chirped-Pulse Amplification: CPA)手法⁽³⁾が発表された時期と一致している。CPAは、出力分布を時間的に引き延ばすことによって、超短パルスを増幅する手法である。ピーク出力と平均出力をさらに高めるための概念として最近示されたのが、コヒーレントビーム結合(Coherent Beam Combining: CBC)である^{(4)~(6)}。これは、増幅プロセス全体で出力を複数のビームに分散してから、最後にコ

ヒーレントに加算するという方法に基づいている。

XCANは、仏エコール・ポリテクニク(École Polytechnique)と仏タレス社が開発した、CBCフェムト秒ファイバレーザーである。XCANは、ピーク出力と平均出力(100GW/1kW)の両方の領域で動作する、61のタイル型チャンネルに基づいている⁽⁷⁾。各チャンネルは、振幅と位相を独立して操作可能な、近接場の個別ピクセルとしてみなされる。高度にスケーラブルなタイル型開口アーキテクチャを採用したこのプロトタイプは、さまざまな出力領域における光成形の可能性を秘めた、フルデジタルレーザーの新しい時代を切り拓く可能性がある。

材料加工の最適化に特化した配光制御は、多種多様で特異な成形要件を持つ産業用途の重要な要求事項である⁽⁸⁾。XCANには、任意の形状の配光を生成できるアーキテクチャ方式が採用

されているが、この実験の主要目的は、軌道角運動量(Oribital Angular Momentum: OAM)を持つレーザービームを生成することである。そのようなビームは、らせん状の位相フロントを持つため⁽⁹⁾、XCANの六角形のタイル配置は、そのような位相対称性の生成に完璧に適合しているように思われる。また、OAMビームには、光学操作⁽¹⁰⁾、量子光学⁽¹¹⁾、イメージング⁽¹²⁾(天文学⁽¹³⁾や流体の特性評価⁽¹⁴⁾など)から、光通信や暗号化技術⁽¹⁵⁾、⁽¹⁶⁾に至るまでの幅広い用途がある。はるかに高い出力を必要とする用途の考察も重要である。例えば、自由電子レーザー(Free Electron Laser: FEL)におけるマイクロバンチ不安定性の抑制⁽¹⁷⁾や、(避雷や、大気汚染物質の検出⁽¹⁹⁾、⁽²⁰⁾を目的とした)超高強度レーザービームの伝播⁽¹⁸⁾などである。

OAMビームを生成するための従来の方法は一般的に、レーザー共振器チューニング⁽²¹⁾、位相板⁽²²⁾、アキシコン⁽²³⁾、空間光変調器(Spatial Light Modulator: SLM)⁽²⁴⁾、⁽²⁵⁾に基づいている。レーザー共振器チューニングと位相板は、高出力動作を可能にするが、チューニング性に欠けている。個々の特定の横方向ビーム分布に応じて、異なる共振器設計や光学素子を考案しなければならないためである。SLMは高いチューニング性を備えるが⁽²⁶⁾、光学的な損傷しきい値によって出力(ピークと平均)が制限される。XCANデジタルレーザーは、これらに代わるより融通性に富んだアプローチであり、高スループット



図1 XCANの61本のYb添加ファイバ増幅器の光線(a)と、その近接場の干渉パターン(b)。

出力とチューニング性を備え、OAMビームをリアルタイムに生成する。XCANのタイル型開口構成において、61本のファイバ増幅レーザービームが、できるだけ互いに近い形で、六角形の平面アレイ配置に並べられて、近接場に分配される(図1)。図1aには、ビームを同時にコリメートするための六角形の小型レンズも示されている。

CBCは、この大きな複合瞳の焦点を1つのレンズで合わせるときに行われる。このレンズの焦点面で観測される横方向の電場分布は、61本すべてのタイル型ビームが正確な位相でコヒーレント結合する結果である。充填開口と比べて⁽²⁷⁾、タイル型開口によるCBCは、遠方場でメインローブに出力を集束する効率が本質的に制限される(理論的には67%)。しかし、遠方場のビーム成形という点で、比類ない機敏性を備える。これは、すべての近接場のサブ瞳が互いに重なり合う、充填開口CBCレーザーシステムでは達成できない、重要な性質である。

レーザー統合時の技術的選択は、その高いスケーラビリティを確実に維持することを念頭に行われた。最終出力のファイバ増幅レベルでは、特にこれが重要で、ここでは、米オプティカル・エンジンズ社(Optical Engines)が(デンマークのNKTフォトンクス社[NKT Photonics]のファイバをベースに)設計した、柔軟なファイバソリューションが有効だった。サイズがコンパクトで、コストが低く、スケーラビリティを備えているためである。プリアンプ段には、仏キーオプシス社(Keopsys)のファイバ増幅器が採用されている。個々のビームの位相は、仏イディルファイバオプティクス社(Idil Fibres Optiques)によってパッケージ化されている可変光学遅延ラインと圧電機械式ファ



図2 XCANによって生成されたドーナツ型の遠方場(a)と、XCANのレーザーヘッド(b)。

イバストレッチャを組み合わせたものを使用して、リアルタイム(kHz)に制御される。位相安定化は、アクティブ位相制御による集合的な干渉計測方法と、確率的並列勾配下降(Stochastic Parallel Gradient Descent: SPGD)アルゴリズムを用いて行われる。この構成により、位相のカスタムセットが生成される。各ビーム振幅(すなわち出力)は、増幅器の利得制御によって調整できる。図1bは、61本のファイバの近接場干渉パターンを図示したもので、このデジタルレーザーのコンセプトを示している⁽²⁸⁾。

XCANの61のピクセルでデジタル化されたOAMのらせん状のビーム位相を生成することにより、特徴的な「ドーナツ型」の遠方場横方向分布が得られる(図2a)。このレーザー装置は、OAMビームを生成しつつ、ピコ秒未満のパルス幅とキロワットレベルの平均出力で動作する。

スケーラビリティに優れたXCANの

アーキテクチャは近いうちに、デジタルレーザーという新しいレーザーアーキテクチャパラダイムの到来とみなされる可能性がある。このようなアプローチは、OAMの中心対称ビーム以外にも、ストラクチャードライトの応用範囲を大幅に拡大する大きな可能性を秘めている^{(14)、(17)}。実際、ダイオード励起、イッテルビウム(Yb)添加のファイバ増幅チェーンアーキテクチャによって、高いピーク出力(フェムト秒動作レベル)と平均出力(キロワットレベル)が達成されている。本質的にコンパクトでスケーラブルであるため、最大で1万のチャンネルに対応するように設計/実装可能で、高分解能の横方向振幅及び位相レーザービーム制御への道すじを切り拓く。

ビーム特性をリアルタイムに調整する能力(現時点ではキロワットレベルまで)は、材料の穴あけ、切断、はんだ付けなど、エネルギーや出力分布の動的な制御を必要とする用途に、さらなる自由度を与える。

参考文献

<http://bit.ly/PolytechniqueReferences>.

著者紹介

ジャン-クリストフ・シャントルー(Jean-Christophe Chanteloup)は、仏エコール・ポリテクニーク(École Polytechnique)のXCANプロジェクト責任者。セヴェリーヌ・ベランジェ(Séverine Bellanger)とマシュー・ヴェインハード(Matthieu Veinhard)は、エコール・ポリテクニークのレーザーシステムエンジニア。ルイ・ダナルト(Louis Daniault)とイーサン・フサイフェス(Ihsan Fsaifes)は、エコール・ポリテクニークのXCANプロジェクトのチームメンバー。アルノー・ブリニオン(Arnaud Brignon)は、仏タレス・リサーチ&テクノロジー(Thales Research & Technology: TRT)のチームリーダーで、ジェローム・ブーデリオネット(Jérôme Bourderionnet)、クリスチャン・ララト(Christian Larat)、エリック・ラルリエ(Eric Lallier)は、TRTの光学サイエンティスト。
e-mail: jean-christophe.chanteloup@polytechnique.edu URL: portail.polytechnique.edu/luli/en