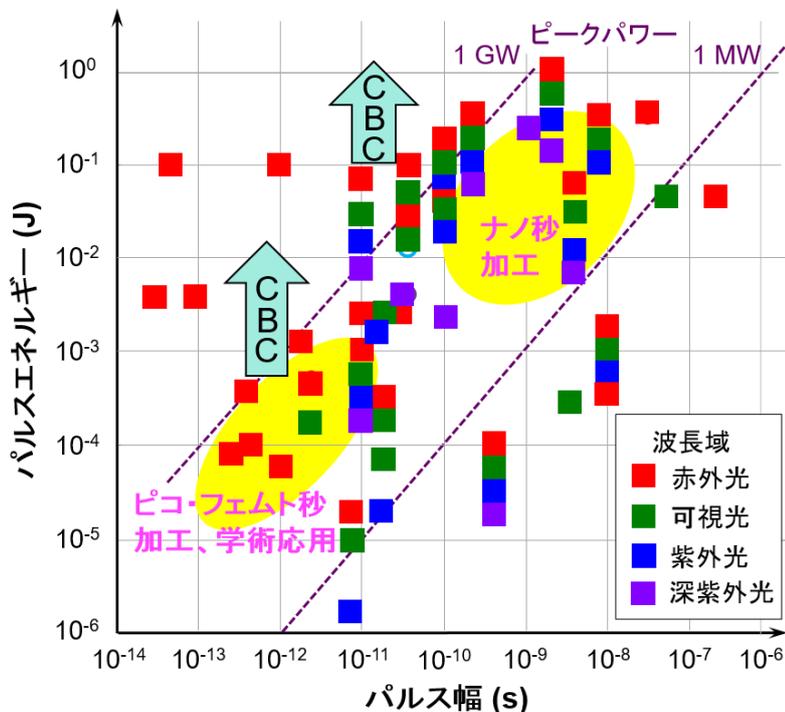


CONTENTS

- コヒーレントビーム結合
ーパワーレーザーの新パラダイムー
- 18th International Conference
on Laser Optics (ICLO2018)報告
- 主な学会等報告予定

ISSN 0914-9805



【表紙図】市販レーザーの
パルスエネルギー・パルス幅
マッピング

コヒーレントビーム結合 ーパワーレーザーの新パラダイムー

特別研究員 宮永憲明

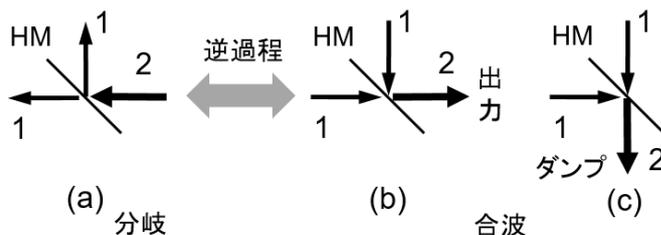
大阪大学レーザー科学研究所 椿本孝治

■はじめに

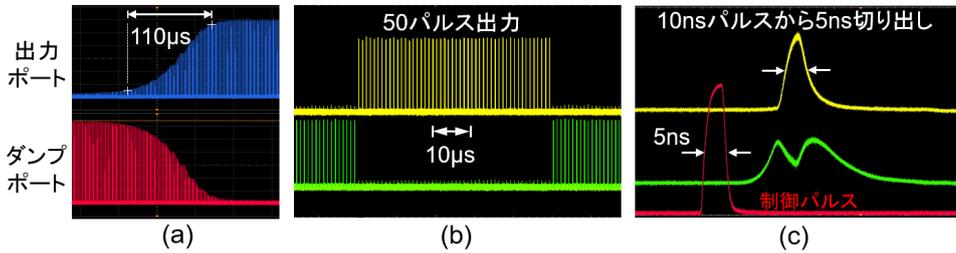
レーザーは、材料加工やインフラ診断をはじめとするさまざまな産業分野のみならず学術分野において重要なツールである。表紙図に示すように多様な動作パラメーター(パルス幅、パルスエネルギー、波長、繰り返し周波数)のレーザーが市販されており、パワーレーザーの市場はますます拡大するものと期待される。

パワーレーザー技術の要である「レーザー材料」、「光学材料・素子」とあわせて「システムコンセプト」も重要であり、さまざまな増幅器構成が開発されてきた。しかしながら、ビーム径拡大(増幅器の大型化)による

パワー増大は技術的限界にきており、新たなパワースケーラブル技術が必要となっている。本稿では、コヒーレントビーム結合(CBC)に基づくパワーレーザー



【図1】ハーフミラーによるビーム分岐(a)とその逆過程としてのコヒーレント結合(b, c)



【図2】CBCによる高速時系列制御の例. (a): テーラリング, (b): デューティ可変バースト, (c): パルス幅可変

相変調器(LN)を設置してCBC状態を制御した。図2はその結果であり、上段が出力ポート(図1(b)に対応)、下段がダンプポート(図1(c)に対応)の時間波形である。(a)はパルス列テーラリング、(b)はバーストパルス列であり、(c)ではLNの制御パルス幅を狭くして出力

の新パラダイム創成の可能性について考えてみたい。

■コヒーレントビーム結合とは

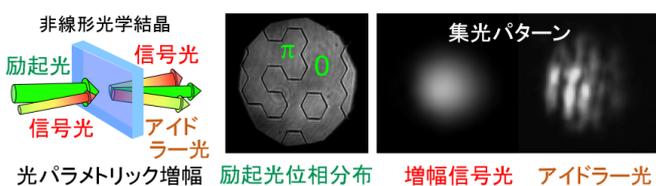
ハーフミラーは入射光を1:1に分岐する素子(図1(a))であるが、透過光と反射光の間には $\pi/2$ の位相差がある。したがって、この位相関係を満すように2ビームを逆向きに入射すると、ビーム分岐の逆過程が実現し1ビームに結合することができる(同図(b))。また、入射2ビームの位相関係を逆転させると出力方向を変えることができる(同図(c))。

このCBC技術によって、表紙図の矢印で示すようなパワー増大が可能である。本稿では、①2ビーム結合によるビームデリバリー制御、②光パラメトリック増幅による空間アレイ結合型パルス増強、および③蓄積共振器とCBCの組み合わせによる時間領域結合パルス増強について、それぞれの概要を述べる。

■CBCを用いたパルスレーザーの高速時系列制御¹⁾

筆者らは図1(b)の構成を多段にすることによって、パルスファイバーレーザーを8ビーム用いて約1 kW(波長1040 nm)を得て、2倍高調波600 W(520 nm)、3倍高調波300 W(347 nm)を達成した²⁾。この研究をさらに発展させ、図1(b)と(c)およびその中間状態を高速に制御すれば、多様なレーザー加工に適したパルス時系列の任意制御が可能となる。

原理実証のために、1 MHz、パルス幅10 nsのファイバーレーザー 2ビームに対して、片方に piezo 駆動位相シフターを設置してCBCし、もう一方に電気光学位



【図3】光パラメトリック増幅における信号光位相分布の保存

ポートのレーザーパルス幅を5 nsに短縮している。今後、この技術を >100 W級のファイバーレーザーに適用し、材料加工などの受託研究に供する予定である。

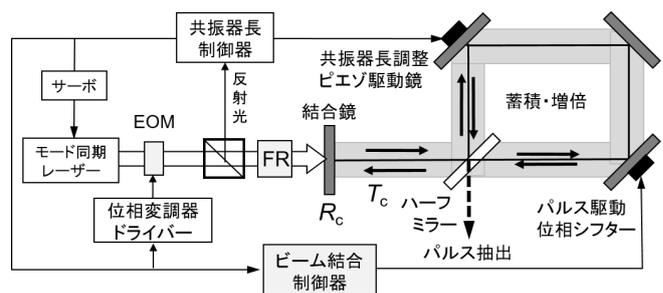
■多ビーム励起光パラメトリック増幅によるCBC

光パラメトリック増幅(OPA)は、2次の非線形光学結晶中で信号光(s)を増幅する過程であり、励起光(p)と信号光の光子エネルギーの差に相当するアイドラー光(i)が発生する。信号光の位相は位相不整合 $\Delta k = k_p - (k_s + k_i)$ と増幅利得に依存する。しかし、位相整合条件 $\Delta k = 0$ が満たされる場合は、信号光の位相は増幅前後で変化せず、ランダム位相の多ビームアレイ励起を用いても、信号光の空間的位相分布は保存される。

その実証実験結果を図3に示す³⁾。非線形光学結晶はBBO、信号光はNd:YLFレーザーの基本波(波長1053 nm)である。励起光はNd:YAGレーザーの2倍高調波(532 nm)であり、 $0/\pi$ のランダム位相板を挿入しているが、OPA出力信号光の集光パターンは回折限界の品質を保っている。一方、アイドラー光ではスペクルとなっており、励起光の空間的位相分布はアイドラー光のそれに受け継がれている。この増幅手法は、多ビーム励起OPAによる空間ビーム結合であり、幅広い波長域での高利得増幅に適用が可能である。

■蓄積共振器によるパルス増強と共振器外抽出⁴⁾

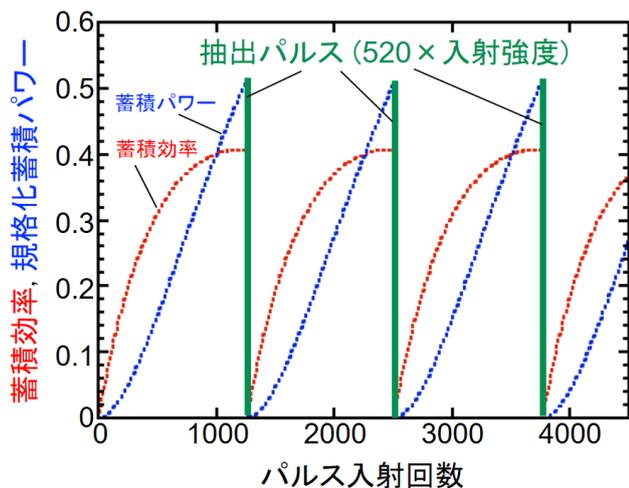
本研究所には、コンプトン散乱ガンマ線への応用な



【図4】蓄積共振器を利用したパルス増強装置の概念図

ど、蓄積共振器のパオニア的な研究の歴史がある⁵⁾。蓄積共振器はレーザー発振器の逆過程であり、ノーベル物理学賞の対象となった重力波検出装置Advanced LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)の原理は、蓄積共振器型マイケルソン干渉計である。

蓄積共振器を利用したパルス増強の概念を図4に示



【図5】蓄積効率とパワーの時間変化および抽出パルス

す。入射結合鏡を透過したパルスはハーフミラーで2分岐され、リング光路を経てハーフミラーで再び結合される。蓄積効率は時間的単調増加の後に減少し、蓄積パワーは結合鏡の反射率 R_c と共振器内部の帰還率 T_c で決まる最大値に漸近する。鏡の散乱損失に依存する帰還率は人為制御が難しいので、 $R_c = T_c$ とすると最大蓄積倍率 $(1/(1-T_c))$ が得られる。一方、蓄積効率が最大となるパルス入射回数は $-2.5/\ln(R_c T_c)$ で与えられるので、このタイミングで位相シフターを駆動して、蓄積エネルギーを抽出するのが効率的である。図5は、 $R_c = T_c = 0.999$ の場合の設計例であり、入射光の520倍のパルスを出射する。これは、100 MHz小型高平均出力から100 kHz高パルスエネルギーへの変換器であり、今後、原理実証研究を開始する予定である。

参考文献

- 1) 椿本, 宮永, 栗田, 川嶋, 特願2016-019553.
- 2) K. Tsubakimoto, *et al*, Opt. Lett. **42**, 3255 (2017).
- 3) T. Kurita, *et al*, Opt. Exp. **18**, 14541 (2010).
- 4) 椿本, 宮永, 酒川, 山村, 林, 田中, 特願2016-201065.
- 5) A. Moon, *et al*, Jpn. J. Appl. Phys., **36**, L1446 (1997).

18th International Conference on Laser Optics (ICLO2018) 報告

■はじめに

今年6月4日～8日にサンクトペテルブルク(露)で開催された、国際会議「ICLO2018」(主催: IEEEフォトニクスソサイエティ、ロシア基礎科学財団他(www.lase-optics.ru))に参加した。ICLOは、高出力レーザー光源の開発およびその科学・産業応用について議論する、世界で最も歴史の古いフォーラムの一つであり、2年に一度開催される本会議も今回で18回目となる。研究トピックには固体レーザー、(ファイバー、固体、ガス、ハイブリッド)高出力レーザー、ダイオード励起レーザー、ビーム制御、非線形フォトニクスの基礎と応用、レーザーによる環境計測、ナノマテリアル光学などがあり、レーザーや光学、計測に関する多くの研究領域をカバーしている。開催期間中には34カ国から約1000人が参加し、800件あまりの研究報告が行われた。ただ今回は、高出力レーザー開発分野で本会議の常連であったIPGフォトニクス社(米)の参加が見送られてお

レーザープロセス研究チーム ハイク コスロービアン

り、学術会議にも昨今の国際情勢が反映されているようにも感じられ、少々残念であった。会議ではプレナリーセッションの他、研究トピック別の11の分科会、4つのサイドイベントが行われた。また、ロシアとその周辺国の企業・大学の多くが最新の製品やソリューションを発表した「オプティクス&フォトニクス」展も同時開催された。サイドイベントでは「産業応用における先進レーザー技術と装置」や「展示会における産業プレゼンテーション」といった、製品のアピール手法に関するワークショップなども開催されており、大変興味深かった。生物・医学応用に関する特別シンポジウム(第5回国際医学・生物学シンポジウム)も同時開催され、眼科用ツリウム(Tm)イオンレーザーの開発と応用、レーザーを用いた疾病の遠隔診断などの研究成果が報告された。

筆者は会議において、再帰反射素子を用いた共振器のレーザー発振特性に関する研究成果(Laser Cross

No.365, 2018 Aug.他を参照)を報告するとともに、主として固体レーザー、高出力レーザー、ビーム制御、非線形フォトリニクス各分科会に参加し、議論を行った。以下に、これらの分野における各国の研究成果について報告する。

■トポロジカル絶縁体レーザー

プレナリーセッションでは、M. Segev博士(テクニオン-イスラエル工科大学)から、最近発見されたトポロジカル絶縁体レーザー(Topological Insulator Laser)の現在と将来展望に関する講演があった。トポロジカル絶縁体とは、内部(バルク)は絶縁体であるにもかかわらず、そのエッジ(2次元構造の端部、3次元構造の表面)は電気を通す金属的な性質を示す物質のことを指す。彼らはトポロジカル絶縁体のレーザーへの応用を提案し、その理論的、実験的な研究を進めてきたが、最近レーザー発振に成功した。このレーザーはマイクロリング共振器を格子状に配列した正方形の2次元アレイ構造を持ち、その端部で発振したレーザーはアレイ周囲を一方方向に伝播し、出力ポートから出力される。出力されたレーザー光は、トポロジカル特性によりエッジ形状や欠陥、光散乱の影響を受けず、高効率かつ単一モードであることが示された。トポロジカル絶縁体レーザーは標準的な半導体材料で製造可能であることから、技術的には現在の半導体レーザーを単一モード、高出力で動作させることが可能となる。今後レーザー、フォトリニクス分野の発展に大きく寄与する技術になるものと期待される。

■Ybファイバーレーザーのコヒーレントビーム結合

S.V. Tyutin博士(ロシア連邦原子力センター・全ロシア実験物理学研究所(露))から、多チャンネルYbファイバーレーザーにおけるコヒーレントビーム結合(CBC)の新手法に関する報告があった。彼らはピエゾセラミックコイルおよび非線形LiNbO₃位相変調器を用いたCBCの新手法を開発し、4ビームおよび7ビームでのCBC実験を行った。新規アルゴリズム(非公開)の開発により、チャンネルあたりわずか3~4回の反復で位相制御が可能となり、さらにこのアルゴリズムの速

度はチャンネル数に依存しないとのことである。チャンネルあたりの出力100Wのビームを用いたCBCの結合効率は、CWモードで0.95以上であった。ピエゾセラミックコイル、LiNbO₃位相変調器を使用した場合の収束帯域幅はそれぞれ5 kHz、14 MHzであり、このシステムが数100 mの距離で安定に動作することを確認した、とのことであった。

■波長可変全ファイバーレーザー増幅器

ロスアトム社(露)のN. Slobozhanin博士は、出力150 W、狭帯域(~200 MHz)のYbドープ可変波長全ファイバーレーザー増幅器を開発した。彼らはファイバブラッググレーティング(FBG)の温度調整(0.014 nm/K)によりエミッションバンド幅を調整し、またいくつかのアクティブファイバー(Ybドープファイバー)(長さ(m)/コア(μm)/クラッド(μm) = 5/6/125, 5/10/130, 5/20/400)を用いてブリルアン散乱(SBS)しきい値の見積もりを行った。さらに彼らは現在、このレーザーを用いて19チャンネルのビーム結合を行うことを計画している。Slobozhanin博士によれば、このレーザーシステムに用いられているコンポーネントはすべてロシア製であり、今後原子力や防衛産業に利用することが意図されている、とのことである。

■次回の開催予定

次回のICLOは2年後、今回と同じサンクトペテルブルクでの開催が予定されている。



【写真】会議場にて(左から)A. Kudryashov博士(Institute of Geosphere Dynamics(露))、U. Griebner博士(Max-Born Institute(独))、筆者

主な学会等報告予定

10月14日(日)~18日(木) ICALEO2018 (オランダ)

藤田雅之 「Cutting and Welding of Construction Materials」

11月16日(金)

光学薄膜研究会第3回研究会(機械振興会館)

本越 伸二「高耐力光学素子の現状と課題」