プログラマブルになるファイバレーザ

ジョセフ・サルハニー、ブライアン・バーゴイン

分散素子と同期された電気光学変調器（EOM）との組合せによって、ファイバレーザは利得バンド内の全波長を放射することが可能になる。EOMと励起パワーの変調を連動させれば、完全にプログラマブルなファイバレーザが実現する。

適切にドープされた光ファイバは、より高エネルギーの光源で励起されると、一つの波長帯に対するレーザ利得媒質としての機能を果たす。しかし、標準的なドープファイバレーザはレーザ入力信号をそのオリジナルの波長で増幅するだけである。適切に同期されたEOMとともに分散素子を利用すれば、波長、パルス幅、パルス繰返し周波数を含むすべてのレーザパラメータをユーザが電子的に制御することが可能な完全にプログラマブルなファイバレーザが実現する。

ファイバレーザの発展

1960年に最初のレーザが実証されてから間もなく、イライアス・スニッツァ氏（Elias Snitzer）はレーザ媒質としてガラスを使って研究を開始し、1964年に最初のファイバレーザのデモンストレーションを行った。ファイバレーザはその後も発展を続け、1987年には、デイヴィッド・ペイン氏（David Payne）が最初のエルビウムドープファイバ増幅器（EDFA）を発表した。最初のEDFAは長距離通信システムに配備され、ノード間の到達距離の延長と全ネットワーク経費の削減に寄与した。

ファイバレーザの進展はイッテルビウム（Yb）ドーピングの導入によってさらに続いた。1μm帯において、Ybドープファイバレーザは EDFAに比べて高い電力変換効率と大きなパワーレベルを提供する高効率な利得媒質として機能する。現在、このようなファイバは産業、医用、高品質イメージングなどの用途に広く利用されているYbファイバ増幅器や高出力ファイバレーザのコアに使われている。

今や、ファイバ技術、光学部品設計、制御電子回路のさらなる進歩がファイバレーザをさらに主流へと押し上げている。これらのレーザは従来のレーザに比べて小型で頑丈であり、多数の例において、維持費が高く操作が複雑な従来型システムを置き換えることができた。ファイバレーザは小型で頑丈であるがゆえにさらに多くの新しいアプリケーションにも対応する余裕がある。

最新の技術革新によって、ナノ秒システムを超える品質と精度を持つピコ秒台の走査型パルスファイバレーザシステムが開発された。これらのピコ秒システムの一つはカナダのジニア・フォトニクス（Genia Photonics）社製のシンクロナイズドプログラマブルレーザ（SPL）である。これは、ターゲットで同期された出力パルスを発生する2台のピコ秒ファイバレーザシステムを統合することができる。

シンクロナイズドプログラマブル

SPLシステムはプログラマブル分散同調／能動モードロックレーザとファイバ利用のマスタ発振器パワー増幅器（MOPA）から成る。波長分割マルチプレクサ（WDM）カプラがこの二つのレーザ出力を単一ビームに統合する（**図1**）。プログラマブルファイバレーザ（PL）とMOPAは高速エレクトロニクスを使

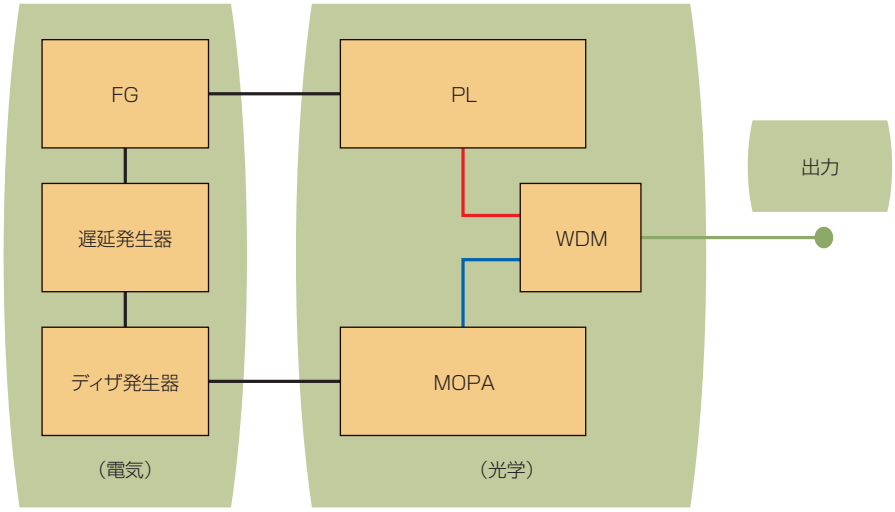

図1　同期させたPLシステムにおいて、PLの出力は広帯域WDMカプラによってMOPAの出力と統合される。両レーザは、パルスを同期させるための遅延も提供する低ジッタFGを通して電子的に制御される。このように、全パラメータはソフトウエアによってコントロールされる。

用してそれらの内部EOMを正確に設定されたピコ秒パルスで駆動する。同期化の基礎は各レーザのパルス発生器のトリガとなる多重信号を発生する斬新な低ジッタ関数発生器（FG）回路の内部にある。これらの信号は外部光学装置のどのような遅延も補償するように同調可能なため、両レーザからのパルスは確実にターゲットで同期される。FGも他の取得システムやイメージングシステムなどの機器をトリガするための外部信号が提供できるように拡張されている。この外部信号発生は、掃引サイクルの開始、各連続掃引の開始、各光パルスの発生、各波長の変化などの事象を指示する一連のトリガである。

異なる波長の同期パルスは空間的／時間的重なりが必要な非線形光学において決定的に重要になる。二つの独立した波長で重なりのあるレーザパルスを達成する能力はコヒーレント反ストークスラマン分光（CARS）や誘導ラマン分光（SRS）などの非線形イメージング用途に門戸を開く。空間的／時間的な重なりは一つのレーザをその波長範囲にわたって掃引するポンププローブ実験においても同様に重要である。時間に敏感なポンププローブ実験の場合、SPLのFGはパルス列における各交互パルスだけが同期して、平均出力は一定値を維持するように、遅延ディザリングを制御する。

ファイバ利用のレーザシステムとしてのSPLは、同期を維持しながら波長が異なる二つのパルスを発生させる現在の典型的なレーザに比べて、頑強で信頼できるソリューションを提供する。ファイバが光を導波するため、空間的重なりは、いかなるアラインメントもなしで自動的に達成され維持される。パルス同期は、両レーザを駆動する共通の最先端高速FG回路によって電子的に制御される。

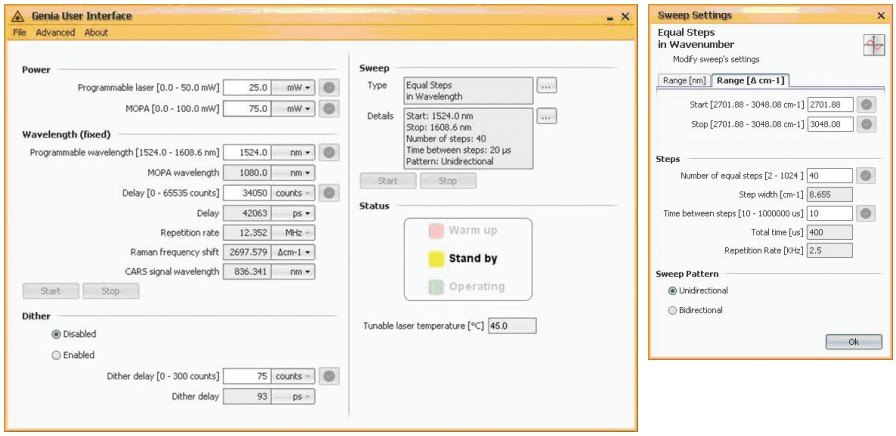

図2　メイン画面は設定可能な全レーザパラメータへのアクセスを提供する（a）。掃引設定インタフェースは掃引のタイプ、パタン、範囲、速度などの掃引特定パラメータの選択を可能にする（b）。

レーザシステムのユーザ制御はPC上のグラフィカルユーザインタフェースを介して遂行される。すべてのパラメータは手動操作なしでインタフェースを通してアクセス可能である（**図2**）。

こうして、SPLは同期を維持しながら、10ps程度の低いパルス幅と最高200MHzの繰返し周波数の集積レーザの各々からのパルスストリームを送り出すことができる多目的プラットフォームを提供する。これは、設定も可能なパワーレベルとともに、非線形分光などのアプリケーションに必要な要素を提供してくれる。

プログラマブルピコ秒レーザ

SPLシステムの心臓部をなすコンポーネントは、同調エンジンとしての役割を果たし、一連の光学バンド内の広い波長同調範囲を提供するPLである。PLの利得媒質はエルビウムドープファイバ、Ybドープファイバ、または半導体光増幅器である。ドープファイバが利得媒質として配備されているときには、WDMは980nmのレーザダイオードのエネルギーを結合してコアを励起する。光カプラは増幅された光の一部を抽出し、それを出力部または次のステージに送り出す（**図3**）。カプラを通して抽出される1～50%の範囲の光の割合は利得媒質、必要な同調範囲、必要な同調速度に依存する。

PLは分散同調される。チャープファイバブラッグ格子（CFBG）は分散素子として機能し、サーキュレータによって指示される。その後、EOMに対するパルスのタイミングを必要な波長のパルス波面が到達すると同時にEOMが活性化されるように調整することによって、増幅される波長を決定する。実際に、EOMに適用される信号は四つのパラメータ、つまり波長、波長掃引、繰返し周波数（特に、高調波モードロックを考慮する場合）、光パルス幅を制御する。EOMはFGとパルス発生器の組合せによって駆動される。

配置によっては、いくつかのCFBGによる帯域幅と遅延の積に限界が生じることがあるが、その場合には、希望の波長をカバーするためにCFBGはいくつか必要になるかも知れない。

それ自身の動作によって、PLは毎秒1000万以上の異なる光周波数を非常に高い精度、安定性、再現性で出力することができる。PLは分散同調された

能動モードロックレーザのため、波長は任意の順序で選択され、連続または任意の波長系列での波長掃引が可能である。波長は全領域または部分領域から選択することができる。例えば、1000種類以上の波長を10nmバンドから選択することも、500種類の波長を80nmバンドから選択することも可能である。隣接する波長を任意のステップまたは任意の順序でユーザインタフェースを通して定義することができる。掃引もまた、波長または光周波数（k空間または波数）において等しいステップで遂行されるだろう。これは、データの直接フーリエ変換を必要とする実験で明らかに有利であり、高速後処理を可能にする。

MOPA

マスタ発振器パワー増幅器（MOPA）はファイバ利用SPLシステムの第2の集積部品である。MOPAは、PLからのパルスとの同期を維持した短く高周波数のピコ秒パルスを提供する。PLとMOPAはいずれも共通のFGの制御下にあるため、それらの動作は、PLが波長を変更する間でさえ、非常に正確に同期される。MOPAは2種類の配置が可能である（**図4**）。第1の配置は連続波（CW）半導体レーザを利用する従来式アーキテクチャであり、必要な周波数で外部変調されてから、増幅されて必要なパワーレベルを達成する。第2の配置は、必要な波長に同調可能なPLの単純化バージョンを利用し、それから、必要に応じて増幅する。MOPA波長はPL掃引サイクル中固定されているが、この第2の配置では、MOPA波長の選択がある程度フレキシブルである。

PLの場合と同様に、MOPAは約200MHzの高い繰返し周波数で約20psの短いパルスを発生させることができる。

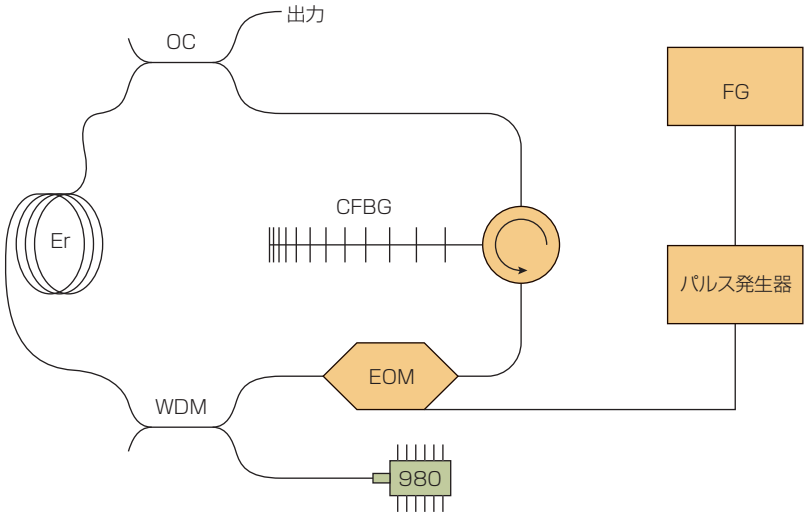

図3　PLの光学配置は主要部品、すなわちFGとピコ秒パルス発生器の組合せによってトリガされるEOM、WDM、エルビウムドープ利得ファイバ（EDF）、出力カプラ（OC）、サーキュレータチャープブラッグ格子（CFBG）の相互接続を示している。

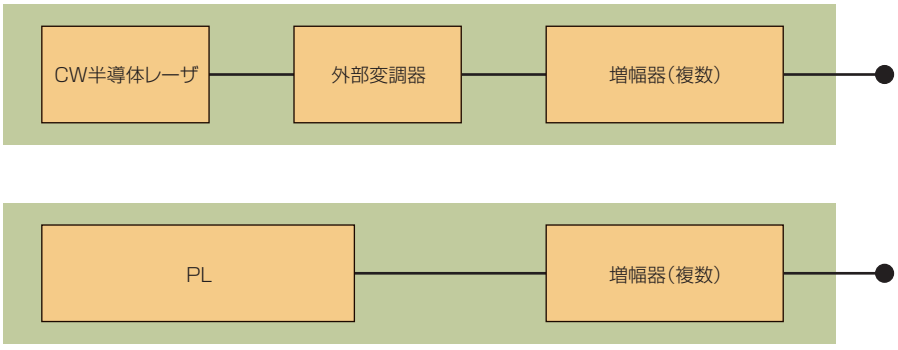

図4　従来型MOPAアーキテクチャはCW半導体シードレーザを必要周波数へと外部変調し、それから必要パワーレベルを達成するために増幅して使用する（上）。一方、PLはシードとしてだけでなく、一連の増幅器を通して供給されるその出力としても使用される（下）。

同期された操作モードにおいて、PLとMOPAは、掃引しながら2ps以下のジッタへの出力パルスストリームの同期を維持し、毎秒10万種類以上の光波長を発生する。

われわれは、このレーザが医学的診断における組織の非線形コヒーレントラマン分光で切望されている波長掃引源になると期待している。さらに、この二つのレーザは同時または個別に動作させることができるため、システムのポテンシャルが高まる。それ自身で駆動するPLを利用することによって、同一システムを、光コヒーレンストモグラフィ（OCT）などの任意波長の高速同調が必要なアプリケーション向けの高速掃引源レーザとして機能するように拡張することができる。同様に、必要なパワーレベルに設定すれば、MOPAはマイクロマシニング、エッチング、アブレーションなどにも利用できるだろう。

著者紹介
ジョセフ・サルハニー（Joseph Salhany）はジニア・フォトニクス社の副社長、研究開発部長、プロダクトマネージャを兼務する。ブライアン・バーゴイン（Bryan Burgoyne）はシニアレーザサイエンティストである。
e-mail:info@geniaphotonics.com

LFWJ