スーパーコンティニウムファイバレーザに極めて明るい未来

アダム・デバイン、アナトリ・グルディニン

わずか10年で、スーパーコンティニウムのパワーレベルは、380～2400nmのスペクトラル範囲で1桁あがった。光ファイバのスーパーコンティニウム生成について理解が深まったことから、製品やアプリケーションの継続的展開が可能になっている。

スペクトル広がりと新しい周波数生成が、何十年も前から利用され、研究されている非線形オプティクスの特徴になっている。1970年代、光パルスの極度の非線形的スペクトル広がりによって広がった「白色光」の生成が「スーパーコンティニアム」という言葉を生んだ。しかし、ガラスの非線形が相対的に低いため、バルク材料で大きなスペクトラル広がりを作り出すには非常に高いピークパワーが必要になる。相互作用長はスポットサイズに反比例する。集中が強ければ強いほど、有効相互作用長はますます短くなる（一般には数センチメートル）。わかりやすい解は、光を閉じこめ、光ファイバの導波特性を利用して相互作用長を延ばすことだ。

しかし光ファイバを使用することは問題の部分的な解決にしかならない。と言うのは、標準ファイバ（SMF-28タイプ）の非線形特性によるスペクトル広がりは、主に長波長側にスペクトルが広がり、1064nm近傍の励起では、スペクトルの可視光側には何もないからだ。

フィリップ・ラッセルとジョナサン・ナイトによるフォトニック結晶ファイバ（PCF）の発明により、スーパーコンティニウム生成の展望全体が1990年代半ばに変わった。PCFは、従来のファイバのように添加物ではなく、コアを取り囲む微細な穴の配列で光導波路を劇的に変えたものだ。

これらPCFの普通ではない構造には、比較的安い製造コスト（全体的な構造は添加物を用いないピュアシリカガラスをベースにしている）から固有の光特性まで、多くの利点がある。最も注目に値する点は、ゼロGVD（群速度分散）波長を1μm領域、さらに短波長側に動かせる、分散特性の調整能力だ。これら固有の特徴は、2000年にベル研がTi:sapphireレーザでPCFを励起してスーパーコンティニウム生成を実証し、初めて認識された[2]。

今では、もしポンプ波長がゼロGVD波長近傍にあれば、ストークス信号とアンチストークス信号の群速度が釣り合って非線形スペクトル広がりはほぼ対照的に長波長、短波長の両側に広がると言うことがよく理解できるようになっている。そうすると、400-2400nmの波長範囲全体をカバーする極めて広いスペクトルを実現することができる。

2005年、ターンキースーパーコンティニウムファイバレーザは非常に斬新なものであり、先行導入者の注目を集めた。それは主に研究者や企業の研究グループで、その技術をどのように自分たちの研究や製品開発に組み込むかに興味を示した。今日、スーパーコンティニウムは研究の中では確立された光源であり、産業および医療ツール、あるいは計測ではコモディティ化された光源になりつつある。

過去10年、スーパーコンティニウムレーザの発展を後押ししてきたのは技術的進歩と絶えず変化する市場要求である。科学的視点からは、スーパーコンティニウムレーザメーカーは技術の限界を認識せざるをえなかった。それに対して市場は、ビジネスで勝ち残り、スーパーコンティニウムレーザが産業用途で主流となるように、パフォーマンスを特殊アプリケーションに合わせることを要求してきた。根本的な技術をよく理解することでレーザを経済的かつ高信頼に造ることができるようになる。

初めて紹介されてから、スーパーコンティニウムレーザが発展してきた方向は3つに分けられる。ハイパワー化、広帯域化と量産。それらが実現したときに、ローコストと信頼性評価が最高に達したのである。

パワー拡大

ほぼ全てのスーパーコンティニウムファイバレーザが同じ基本構成をとっている。高いピークパワーのポンプ光源は光ファイバで効果的に非線形効果を発生させるためのものだ。スーパーコンティニウム発生のためのPCFの長さも重要だ。

ポンプ光は一般に、MOPA（主発振器パワー増幅器）アーキテクチャをベースにしている。このアーキテクチャでは、主発振器からの約1064nmの超短

パルスが高出力イッテルビウム添加ファイバアンプで増幅される。励起光源は、1個かそれ以上の数の高輝度励起レーザダイオードまたはダイオードモジュールとなる。

このMOPAアーキテクチャを利用したパルスはピーク強度が高い。それが高非線形のPCFに注入され、次にスペクトル広がりが起こりスーパーコンティニウムが生成される。大雑把に言えば、スペクトラル広がりはパルスのピークパワーによって決まる。MOPAの所定の平均パワーとしては、パルス幅とその繰り返しレートの両方に反比例する。

MOPA設計は柔軟であるので、主発振器やファイバアンプのパラメータは独立に変更することができる。PCFに入力する光パワーは、比較的効率的に無理なく拡大できる。繰り返しレートが高いマスター光源と、高い平均パワーを維持できるファイバアンプ使うだけでよい。このような現象は、スーパーコンティニウム生成で最高光パワーは、ファイバ励起光源が連続波(CW)動作する時に達成できる、と言うことに相当する。一見、スペクトル広がりを非常に大きくするには、数kW級のCWファイバレーザからの平均パワーが必要なように思われる。ところが、実際は、かなり大きなスペクトル広がりが、わずか数10W、あるいは数100Wレベルのパワーで観察できる。

CWポンプスーパーコンティニウム光源としては、PCFの非線形効果(この例では、変調不安定性)がパワーアンプからの初期の、時間的にフラットな光信号を、無秩序に分布した短パルスの流れに変換する。この時のピークパワーは入力光よりも一桁大きい。このようにして非常に広帯域のスーパーコンティニウムスペクトルが生成される[3]。

この領域における現在の研究は、大部分は研究室で行われている。また、市販のスーパーコンティニウムレーザは、パラメータが明確な光パルスを生成する主発振器を使用している。そのような「仕様通り」の主発振器は、実際の応用では極めて重要である。これまでに述べたように、スーパーコンティニウム生成の性質は個別パルスの非線形スペクトル広がりをベースにしており、したがってMOPAの繰り返しレートと平均パワーを変えることで、個々のスーパーコンティニウムパルスの時間的距離が制御できる、これは時間分解測定に関連するアプリケーションでは極めて重要である。

1個のスーパーコンティニウムレーザでは、発振器の繰り返しレートは、いわゆるピッカー(光パルス列の入力に対してゲートとして働く音響光学変調器)を使って実現できる(**図1**)。パル

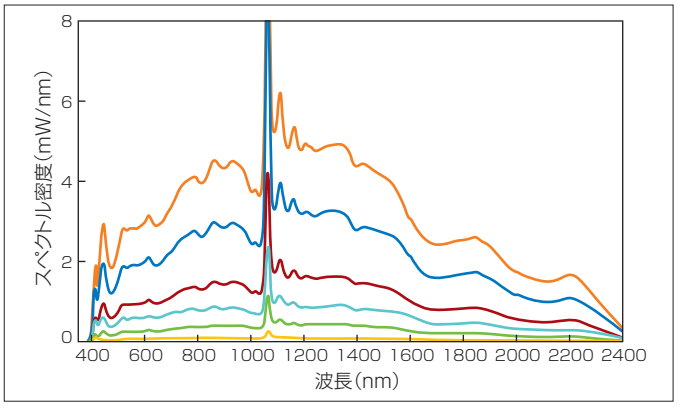

図1 様々な繰り返しレートで動作する「パルスピック」スーパーコンティニウム光源は通常同じスペクトル形状を示すが、パルス密度は違っている。

当社に
お任せください
在庫販売 & 特注フィルター

お客様のアプリケーション用にデザインされたフィルターコーティングで、スループット最適化と信号検出改善を実現
ご注文は今すぐ!
お手伝いできることはございませんか?
お見積り依頼は、当社営業部に今すぐご連絡ください!
more optics | more technology | more service
Edmund optics | japan
エドモンド・オプティクス・ジャパン株式会社
〒112-0001 東京都文京区白山5-36-9 白山麻の実ビル
TEL: 03-5800-4751 FAX: 03-5800-4733 | www.edmundoptics.jp
www.edmundoptics.jp/coatings

スピッカー組込のスーパーコンティニウムファイバレーザでは、スペクトル密度は繰り返しレートとともに減少するが、スーパーコンティニウムの個々のパルスのエネルギーは一定である。結果として、パルス繰り返しレートとは独立した光スペクトル形状となる。

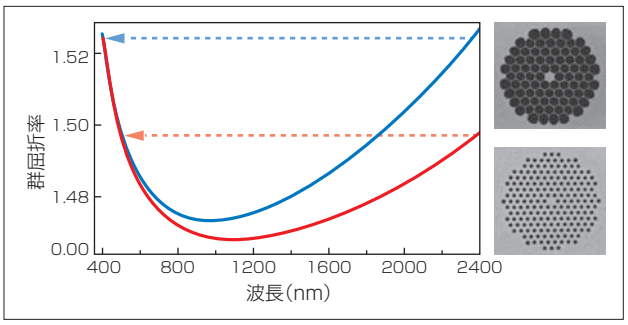

図2 フォトニック結晶ファイバ(PCF)の分散を調整してスーパーコンティニウムレーザの短波長域を伸ばすことができる。PCF設計(空孔のサイズと間隔の比率)の改良により、長波長スペクトルに整合する群屈折率を短波長に整合するようにすることができる。

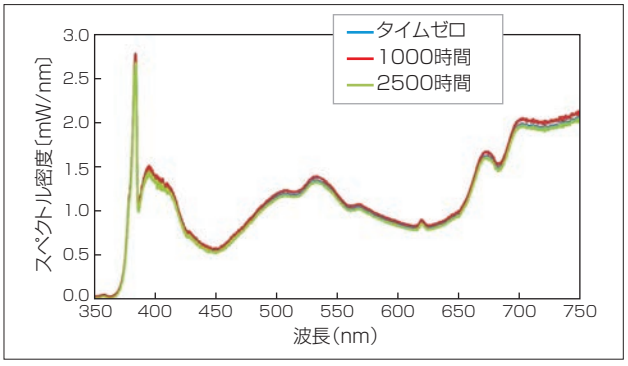

図3 2500時間以上の長時間連続稼働中のUV強化スーパーコンティニウムスペクトル(WHITELASE SC 390)は、現在のスーパーコンティニウム技術の成熟度と信頼性を示すものとなっている。

もっと帯域を:UVエンハンスト

初期のスーパーコンティニウムファイバレーザは、480-2400nmの範囲の高輝度光源だった。電磁スペクトルの紫外(UV)領域に吸収を持つ生物分子が多いので、UVにまで帯域を拡張したブロードバンドスーパーコンティニウム光源は蛍光イメージングや時間相関シングルフォトンカウンティングなどのライフサイエンスアプリケーションに適している。

短波長端を400nm以下(さらに下のUV域)にまで押し下げる、終わりのない要求によって、スーパーコンティニウム生成の背後にある物理学に対する技術的理解が進んだ。また、これには2008年に発表された研究が役立っている。簡単に言うと、スーパーコンティニウム生成は複雑な4波混合過程である。このプロセスを効率化するために、ストークスとアンチストークス成分の群速度が同じ(もしくは極めて近い)でなければならない。ポンプ波長がゼロGVD近傍でなければならない理由だ。

波長2400nm以上での石英ガラスの材料損失はストークス成分を効率的に生成するには高すぎる。従来のPCFではこの帯域の群速度は、450nm付近(**図2**)でアンチストークス成分の生成に対応している。2400nmを動かすことができない(材料損失のため)固定波長と考えると、スペクトルをUVに拡張する唯一の方法はPCFの分散を変更するだけとなる。その方法とは、2400nmで群速度が、UV領域で可能な限り最短波長の群速度と釣り合うようにすることだ。空孔のサイズと位置を変えてPCFの設計を変更することによって、この分散プロファイルを調整し、結果として生ずるスーパーコンティニウムスペクトルでUV生成が375nmとなるようにすることができる(**図3**)。

ローコストと信頼性が新市場を開く

スーパーコンティニウムのコスト削減は生産数量増からだけでなく、ポンプダイオードの進化など技術的前進からも来ている。高輝度ファイバレーザポンプパワーのワットあたりのコストは、2003、04年の約200ドル/Wから落ち続けており、今日では10ドル/Wになっている。信頼性の強化は、実験と設計工学の直接的成果である。10年の経験と成熟は、業界のパートナーによる高加速寿命試験への積極投資と一体となったものであり、これによりハイパワースーパーコンティニウムレーザ技術は厳しい環境で10000時間以上の連続稼働が証明されている。

ローコストと一体になった高信頼は、成熟した光ファイバ技術に全面的に下支えされたものであり、さらに高輝度のスーパーコンティニウムファイバレーザになると、間違いなく、ナノテクノロジー、バイオメディカル、家電など広い範囲のアプリケーションが期待できる。

参考文献

(1) R. R. Alfano and S. L. Shapiro, Phys. Rev. Lett., 24, 11, 584-587 (1970).
(2) J. K. Ranka, R. S. Windeler, and A. J. Stentz, Opt. Lett., 25, 25-27 (2000).
(3) B. A. Cumberland et al., Opt. Exp., 16, 8, 5954-5962 (2008).
(4) J. M. Stone and J. C. Knight, Opt. Exp., 16, 4, 2670-2675 (2008).

著者紹介

アダム・デバイン(Adam Devine)はスーパーコンティニウム開発責任者、アナトリ・グルディニン(Anatoly Grudinin)はイギリス、サウサンプトン、フィアニウム社の創始者/マネージングディレクタ。email: adam.devine@fianium.com; www.fianium.com.

LFWJ