

# 固体レーザを置き換える フェムト秒ファイバレーザ

チアン・リュー、リーメイ・ヤン

固体レーザと競合する高出力フェムト秒ファイバレーザは、不十分なパルス幅が実用化の障害になっていたが、パルスとスペクトルの成形技術が進歩して、その障害が崩れようとしている。

固体レーザ(80MHz、1WのTi:サファイアレーザなど)と競合して生物医学に応用されるファイバレーザは、非線形イメージング、生体組織アブレーション、コヒーレントスーパーコンティニュアム発生など、超短パルスレーザとしての応用が100フェムト秒(fs)レベルの短いパルス幅を必要とするため、100fsのパルス幅の実現が長い間の目標であった。ここ数年の間、高出力フェムト秒ファイバレーザの精力的な研究開発が、学界と産業界の両方で行われた。200Wの高い平均出力が多数のフェムト秒レーザで実現され報告されたが、超短パルスファイバレーザの分野では100fsパルス幅の実現が難しく、そこには技術上の障害があった。

今年1月、米国サンフランシスコで開催されたPhotonics West 2010において、米ポーラーオニキス社(PolarOnyx)は新しい高出力ファイバレーザ技術を開発して、100fsのボトルネックを突破したと発表した。特許を取得したパルスとスペクトルの成形技術を使用して、高出力フェムト秒ファイバレーザのパルス幅を100fsに圧縮したのだ。

この顕著な改善(200fsから100fsへ)によって、ファイバレーザの多彩な応用が開拓された。また、小型、メンテナンスフリー、高いコスト効果などファイバレーザのよく知られた特徴に加えて、100fsの帯域幅の特性も確保されたことで、固体レーザへの置き換えが活発になると考えられる(表1)。現在のフェムト秒ファイバレーザは大幅に改良され、産業／医療分野においてさまざまに応用できる技術へと成長している。

## パルス幅の圧縮

フェムト秒ファイバレーザのパルス幅の低減は、分散、非線形性および利得狭窄の管理が挑戦課題になる。固体レーザに比べると、ファイバレーザは比較的長いファイバ長と利得媒質が原因で、非線形効果と利得狭窄効果が顕著に現われる。これらの効果はパルス形状とスペクトル帯域幅に影響を及ぼし、一般に、1Wで動作する場合のパルス幅の圧縮は200fsが限界になる。また、フェムト秒ファイバレーザに使用するファイバと回折格子圧縮器は高次分散(HOD)不整合が起きるため、パル

ス幅の補償と圧縮はさらに難しくなる。

これらの問題を解決するために、米コーネル大学の研究者グループは、散逸ソリトンパルス成形と高平均パワーによるクラッド励起を利用した高出力モード同期ファイバレーザ発振器を研究した<sup>(1)</sup>。この研究では、光学フィルタの帯域幅の適切な選択と偏光の調節により、安定したモード同期が実現された。このファイバレーザからは31nJのチャーブパルスが70MHzの繰返し速度で発生し、その平均出力は2.2Wであった。レーザの外部でチャーブを解消した後では、15nJのパルスエネルギー、80fsのパルス幅、200kWのピークパワーが得られた(図1)。

この研究はパルス幅のボトルネックの解消を可能にするフェムト秒ファイバレーザの突破口になった。エネルギー伝搬とフィルタリング効果を適切に制御してHODと利得狭窄が軽減された。しかし、このアプローチは動作が複雑であり、自由空間に配置する部品も必要になるため、実用的な製品を開発するには大幅な改善努力が必要であった。

マスタ発振器パワー増幅器(MOPA)

表1 フェムト秒ファイバレーザとフェムト秒固体レーザの比較

レーザの種類	出力(W)	パルス繰返し速度(MHz)	最大エネルギー(nJ)	パルス幅(fs)	波長(nm)	価格(千ドル)	寿命(年)	サービス費(3年、千ドル)	ウォールプラグ効率
フェムト秒固体レーザ	1	80	15	100	700-1000	100-150	2-3	60	<1%
フェムト秒ファイバレーザ	1	30-100	30	100	1030-1080	30-50	5-10	なし	>5%

の設計は、フェムト秒ファイバレーザへの信頼性のあるアプローチであることが証明され、このアプローチは米IMRA America社やポーラーオニキス社の現在の製品に採用されている。その一例として、ポーラーオニキス社はMOPA方式の設計に基づいて、30~100MHzの繰返し速度、100 fsのパルス幅、1W以上の圧縮出力パワーで動作するフェムト秒ファイバレーザを実現した(図2)。このファイバレーザは、偏光、パルス、スペクトルの成形技術を使用し、ファイバレーザの発振器と增幅器を設計して、HOD、分散、非線形歪および利得狭窄の良好な平衡状態のもとでのパルスの発生と増幅を可能にしている<sup>(2)</sup>。

重要なパルス成形技術の一つにはファイバの3次分散(TOD)の操作がある。ファイバの分散は基本的に、材料分散と導波路分散の両方の制御が必要になる。1020~1090nmのスペクトル領域の材料分散は正の分散を示す。米コーニング社(Corning)のSMF-28ファイバなどの伝統的なファイバ設計を用いると、TODは必ず約0.3ps/nm<sup>2</sup>-kmの正の値になり、使用する回折格子圧縮器のTODとの整合が得られない。しかし、ファイバ導波路の構造を操作(陥没クラッドを用いる)すると、材料分散の改質をもたらす導波路分散の導入が可能になり、全体ファイバシステムのTODと分散スロープは、とくに回折格子圧縮器との整合を得ることができる。

パルス幅の圧縮に利用可能なもう一つの重要なスペクトル成形技術は、増幅段を通過したときのスペクトル広がりが増幅器の利得スペクトルと狭窄効果による制約を受けないパルスの自己位相変調(SPM)を利用して、十分に広いスペクトル帯域幅を確保することだ。増幅段に実装されたファイバは、

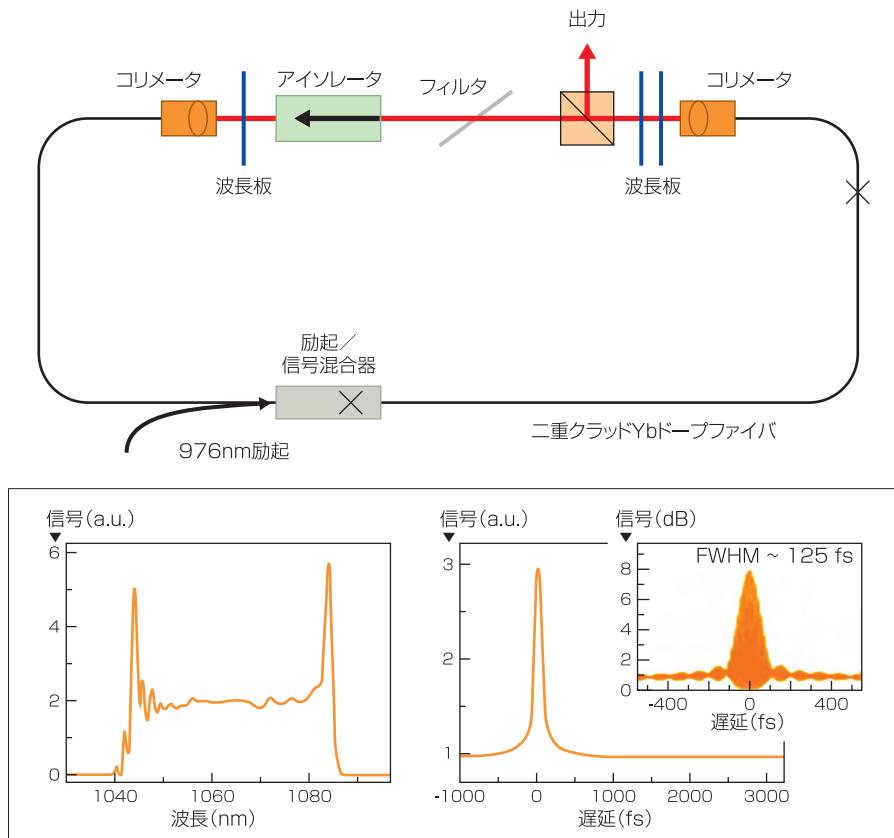


図1 高出力フェムト秒ファイバレーザ発振器の配置は、パルス幅を100fsレベルに圧縮し(上)、優れたビーム性能を得ることができる(下)。(資料提供:コーネル大学)

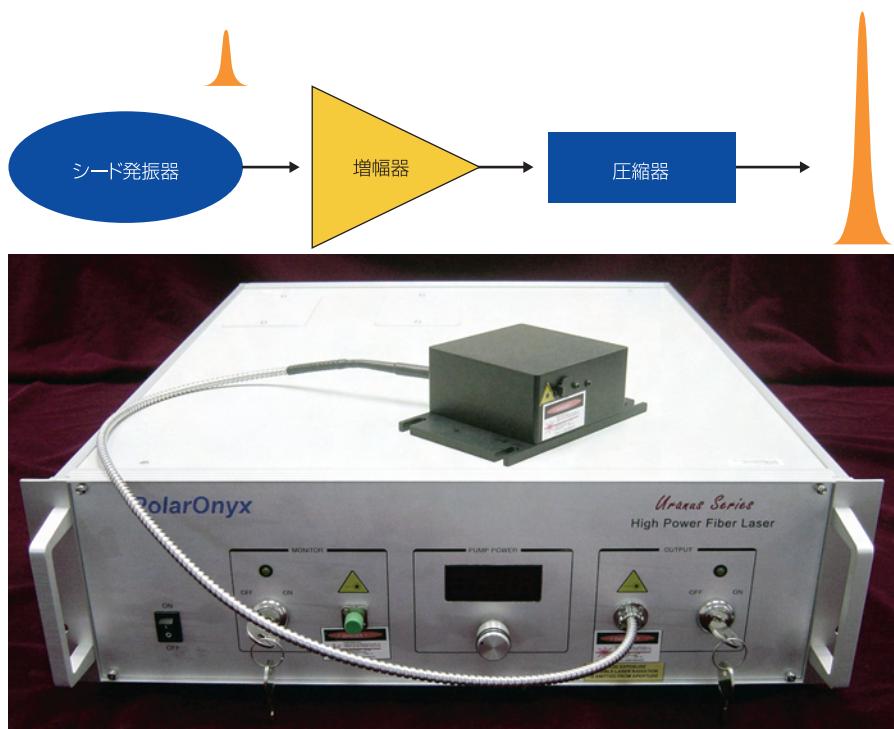


図2 MOPA配置の簡単な高出力ファイバレーザ(上)は市販の製品に実装されている(下)。(資料提供:ポーラーオニキス社)

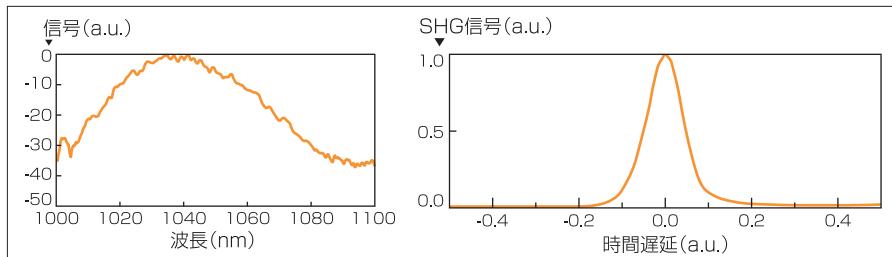


図3 1W フェムト秒ファイバレーザの光スペクトル(左)とパルス幅(右)を示している。(資料提供:ポーラーオニキス社)

要求されるスペクトル帯域幅を発生させるため、適切な長さを有していないなくてはならない。このSPM効果はパルスのピークパワーが特定のレベルに達するとスペクトル広がりを引き起こす。パルスのエネルギーレベルとパルス幅(ピークパワーを定める)に対応してファイバの形と長さを適切に選択すると、スペクトルの広がり指数は最適化される。また、SPMを適切に制御すると、ファイバ伸長器とバルク回折格子圧縮器とのTOD不整合の平衡が得られる。

これらの技術を利用すると、パワースケーリングとパルス幅広がりとの間のトレードオフが解決され、増幅された帯域幅からは100fsのパルス幅を大きな残留TODと利得狭窄効果なしに得ることができる。変換限界のパルス品質を仮定すると、100fsパルスは15nmのスペクトル帯域幅から得られる。

われわれの1Wの100fsファイバレーザは33MHzのパルス繰返し速度、30nJの圧縮パルスエネルギーおよび1.4Wの平均出力が得られる。1035nm近傍の動作波長で測定した実際のパルス幅は正規分布を仮定すると90fsであった(図3)。このファイバレーザは小型の圧縮器を集積して動作を容易にして信頼性を確保している。パルス幅が200fsの場合は5Wの高い圧縮出力パワーレベルになるが、さらに最適化を行うと、100fsのパルス幅が可能になる。また、光パラメトリック発振器(OPO)

を付加すると、可視から中赤外領域までの広い波長帯域が確保され、フェムト秒レーザの能力はさらなる拡張が可能になる。

## 応用

フェムト秒ファイバレーザには、価格、信頼性、保守などの優れた利点があり、それらが臨床応用への推進力になっている。

最近、生体内(*in vivo*)イメージングと臨床診断用の小型の多光子システムが開発された。このシステムは超短パルスレーザからのフェムト秒パルスを二重クラッドフォトニック結晶ファイバ(PCF)または中空コアフォトニックバンドギャップファイバ(PBF)に入射する。開発された小型のファイバ接続走査プローブが生体組織に柔軟にアクセスし、多光子顕微鏡(MPM)による画像を取得する。プローブはさらに小型化されるが、光源は伝統的に大型で高価、移動が難しく、精密なアラインメントを要するTi:サファイアレーザが使用されている。このTi:サファイアレーザ光源を新しいフェムト秒ファ

イバレーザ光源に置き換える、その低コスト、小型、移動可能な利点を生かすと、臨床応用を含めた研究におけるMPMの効果を大幅に増強することが可能になる。

亜細胞レーザアブレーション(SLA)は、耐荷重細胞骨格分子の機械的性質を生細胞内の状況で測定する強力な手段として発展してきた。SLAの場合、持続時間(100fs)が極短い高エネルギーレーザパルスは、高開口数の対物レンズを通して細胞小器官や細胞骨格分子などの細胞内の標的に集光される。超短パルスを使用すると、レーザが集光された物質には非線形多光子吸収が起こり、物質は光学的に破壊されるが、周囲の物質への熱移動と付随的損傷は最小の状態に抑えられる。原理証明の実験が行われ、この超短パルスシステムを用いると、生細胞中の単一ミトコンドリアは原形質膜の損傷なしに破壊されることが実証された<sup>(4)</sup>。

しかし、こうした進歩はあるものの、フェムト秒レーザが研究以外の分野にも普及して、マルチユーザの生物学施設、診療所、移動施設などでの利用が急拡大すると、ファイバ伝送方式の使いやすくて経済的な小型装置が必要になる。装置が改良されると(とくに装置のコストが低減すると)、さまざまな科学研究プロジェクトでのフェムト秒技術の利用が促進される。多くの研究グループやその応用にとって、約15万ドルの値札がつくTi:サファイアレーザは、手の届かない場所にあるのだ。

## 参考文献

- (1) K. Kieu et al., Opt.Lett. 34, 5, p.593-595(2009).
- (2) United States patents : 7,430,224; 7,440,173; 7,555,022; 7,477,666; 7,593,434; 7,529,278; 7,526,003; 7,430,226.
- (3) S. Tang et al., J. Biomedical Opt. 14, 3, p.1-3(2009).
- (4) N. Shen et al., Mechanics and Chemistry of Biosystems 2, p.17-25(2005).

## 著者紹介

チアン・リュー (Jian Liu)はポーラーオニキス社(PolarOnyx)の創設者、リーメイ・ヤン(Lihmei Yang)は同社の製品部長。e-mail: jianliu@polaronyx.com