

# パルスファイバレーザのパワーを増大する 高飽和エネルギー Yb ファイバ

ミッシェル・ベガン、ベルトラン・モラッセ

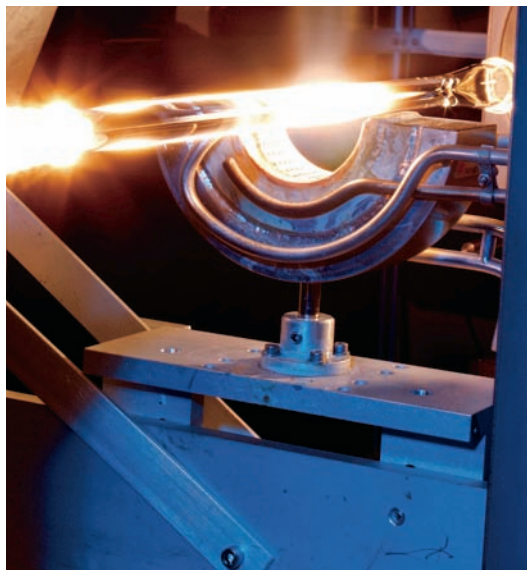
高飽和エネルギーイッテルビウム (Yb) ドープガラスマトリックスを利用した 40W、2mJ のパルスファイバレーザは、従来の Yb ドープファイバの長所を維持しながら限界の多くを解決する。

産業、医学、ソーラーなどの市場では、新材料加工用の高エネルギー、高ピークパワーのパルスレーザが必要になった。この新しいチャンスに応じて市況も変化し、より低価格、より革新的、より費用効率が高い技術を求めてレーザメーカーに対する圧力を強めた。最近数年間に、ファイバレーザはそういった要求に対して大きな将来性を示し、固体レーザと炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) レーザからマーケットシェアを徐々に奪いつつある。

約 1 $\mu$ m 波長帯の材料加工用パルスファイバレーザは一般に Yb ドープシリカガラスを利用している。しかし、高エネルギーのパルスファイバレーザ設計は、従来型の Yb ドープ光ファイバでは乗り越えがたい多くの課題を突きつけた。幸いなことに、高飽和エネルギーガラスマトリックスから作製された新しい Yb ドープファイバベースの高エネルギーパルスファイバレーザは従来型の Yb ドープファイバに関する多くの限界を解消し、同時に新たな長所を付け加えた。

## 光ファイバの考察

シリカベースの光ファイバは、従来の気体または結晶ベースのレーザに比べて優れたビーム品質、大きな熱散逸、高パワー操作、ロバスト性をもつため、



特に利得媒質として好まれている。

1 $\mu$ m 窓におけるレーザ発振では、Yb ドープファイバが、高い効率、高いドープ濃度、広いポンプ吸収バンドにより使用されている。さらに、ダブルクラッド光ファイバ (DCOF) 構造は、DCOF ファイバクラッドに結合された低輝度で高出力のポンプダイオードから大量の出力を可能にし、高いビーム品質をもつ小さなコア内で高いパワーレベルに増幅される高輝度信号を可能にする。Yb DCOF の 0.9~1.0 $\mu$ m の吸収バンドで光を放射する、低価格で高輝度のファイバ結合半導体ポンプダイオードの入手可能性がファイバレーザの利用をよりいっそう魅力的にしている。

性能とコスト要求に見合った最良の

利得ファイバを選択することは高エネルギー、高ピークパワーのパルスファイバレーザ設計における最重要課題である。DCOF ファイバは相互作用長が長いので、誘導ラマン散乱 (SRS) や自己位相変調 (SPM) などの非線形効果が発生しやすく、それらの適切な管理が必要になる<sup>(1)</sup>。主発振器電力増幅器 (MOPA) 配置では、半導体シードレーザは狭い波長線幅によるモードを含み、誘導ブリルアン散乱 (SBS) を増幅過程で発生する可能性があるため、信頼できるシステム動作を得るにはそれを十分に抑制しなくてはならない。

それゆえ、これらの非線形効果を軽減するために、アクティブファイバの選択が重要にある。下記のような特性と対応する属性を持つ利得ファイバが望ましい。それらは、低いパルス変形と高い非線形効果閾値をもたらす高い飽和エネルギー、より高い非線形効果閾値とより短いファイバ長を可能にする高いポンプ吸収、ポンプパワー経費と熱管理問題を低減する高い効率、光黒化効果による劣化を抑制する安定な長期出力、高いビーム品質の出力などである。

これらのパラメータを一望すれば、いくつかのトレードオフが不可避であることが見えてくるだろう。例えば高

表1 CorActive社製のYbドープ高飽和エネルギー光ファイバのFAシリーズの仕様

モデル	コア径(μm)	クラッド径(μm)	コア数値開口(NA)	ポンプ吸収@915nm(dB/M)	アプリケーション
DCF-YB-7/128-FHA	7	128	0.19	1.3	前置増幅器
DCF-YB-15/28P-FA	15	128	0.13	5.5	パワー増幅器(10W/0.5mJ)
DCF-YB-20/128P-FA	20	128	0.11	9	パワー増幅器(20~30W/1mJ)
DCF-YB-30/250P-FA	30	250	0.11	5.5	パワー増幅器(30~40W/1~2mJ)
DCF-YB-50/400P-FA	50	400	0.11	4.5	パワー増幅器(>40W、>2mJ)

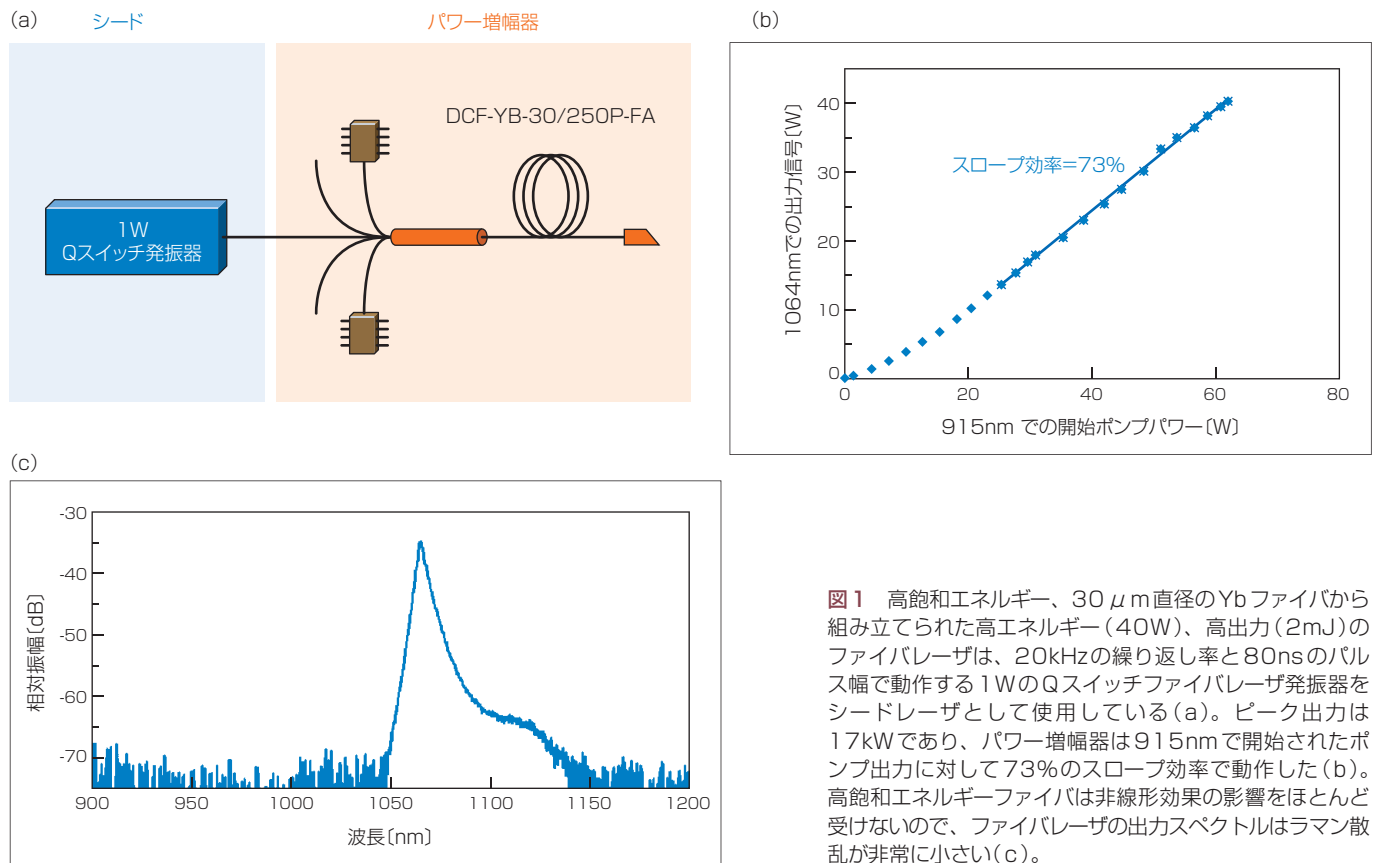


図1 高飽和エネルギー、30μm直径のYbファイバから組み立てられた高エネルギー(40W)、高出力(2mJ)のファイバレーザは、20kHzの繰り返し率と80nsのパルス幅で動作する1WのQスイッチファイバレーザ発振器をシードレーザとして使用している(a)。ピーク出力は17kWであり、パワー増幅器は915nmで開始されたポンプ出力に対して73%のスロープ効率で動作した(b)。高飽和エネルギーファイバは非線形効果の影響をほとんど受けないので、ファイバレーザの出力スペクトルはラマン散乱が非常に小さい(c)。

い飽和エネルギーは、通常ビーム品質に有害なより大きなコア径を必要とする。高い吸収は大きなコア径またはYb濃度の増加によって達成することができるが、後者は一般に増大した光黒化効果を伴う。

### 従来型のYbドープファイバ

高パルスエネルギー(>50μJ)では、パルスひずみが望ましい出力パルス波形を厳しく制約し、非線形効果の閾値

低下をもたらす不必要な高いピークパワーを発生する。非線形効果はシードダイオード信号の様々なパルス成形スキームを通して低減できることは周知の事実である。しかしながら、任意のパルス波形はシードダイオードレベルによって容易に生成できるが、高出力エネルギーで増幅する際にそれを保存することは非常に困難である。増幅がパワーアンプの飽和エネルギーに達すると、パルス前縁が利得を枯渇させ、

パルスの残る部分を増幅しなくなる。

この現象は、ファイバ増幅器において何人かの著者によって報告されたように、利得媒質の飽和エネルギーによるものであり、以下の式で計算される。

$$E_{sat} = \frac{(hc_0/\lambda_0)A}{(\delta_e + \delta_a)\Gamma}$$

ここで $h$ はプランク定数、 $c_0$ は真空中の光速、 $\lambda_0$ は真空中の信号波長、 $A$ はファイバコア面積、 $\Gamma$ はYbイオンと

重なる信号モードプロファイルの割合、 $\sigma_o$ と $\sigma_a$ はそれぞれ信号波長での放射と吸収断面積である<sup>(2)~(6)</sup>。

1.06 $\mu$ mで動作させた20 $\mu$ mのコア径と約1の重なり因子をもつファイバの場合、その飽和エネルギーは従来型のガラスファイバで0.15mJである。これは、0.15mJに近いこれを越えるいかなる増幅もパルスを変形させるであろうことを意味している。

ファイバ増幅器は優れたビーム品質と容易な集積を可能にするが、小さなコア面積はシステムの飽和エネルギーを急激に制限する。ビーム品質の低下なしに、あるいは、ファイバ集積とパッケージングを損なうことなしにコア面積を増大させることを可能にするほど大きな柔軟性はない。

## 高飽和のガラスマトリックス

もう1つの解は、利得ファイバの断面積パラメータを下げることであり、これは使用するガラスマトリックスに依存する。特に、異種ガラスホストの利用は、純シリカガラスの優れた機械的性質と熱特性を維持しながら、Yb断面積が従来のガラスファイバに比べて最高2倍まで小さくなるので、特に魅力的である。標準的なシリカガラスファイバへの結合性に影響を与えないことも言及に値する。

例えば、20 $\mu$ mコアファイバは異なる

ガラスホストで約0.35mJの飽和エネルギーを持ち、従来型のYbドープファイバで使用されてきたシリカガラスの値の2倍以上である。他のガラスマトリックスとしてはゲルマノシリケートやフッ化物ガラスも使用できるが、光誘起特性または機械的性質が好ましくない。代替案は、様々な高出力パルス化ファイバレーザ応用に適した、さまざまなコア径およびクラッド径を持ち、高飽和エネルギーのガラスマトリックスから作られたカナダCorActive社によるFAシリーズのYbドープファイバである(表1)。

## 実験結果

CorActive社のDCF-YB-30/250P-FA光ファイバを使って組み立てられた高エネルギー(40W)、高パワー(2mJ)のファイバレーザは、シードレーザとして、20kHzの繰り返し率と80nsのパルス幅で動作する1WのQスイッチファイバレーザ発振器を使用している(図1)。達成されたピークパワーは17kWであったが、このファイバで達成可能な最高ピークパワーはそれほどのラマン散乱なしに40kW以上になるであろう。これは直径30 $\mu$ mの利得ファイバに比べてかなり高い。最高ピークパワーはポンピング方式、ポンプ波長、デリバリファイバ長に依存し、パワー増幅器は915nmで制作されたポンプ出力に対し

て73%のスロープ効率で動作した。

標準の光ファイバに比べて、高飽和エネルギーファイバは非線形効果に対して本質的によりロバストである。出力スペクトルプロットで見られるように、40W/2mJパワー増幅器からの信号は極めて小さなラマン散乱を示した。ほとんどの非線形効果がファイバ内を伝搬するピーク出力に直接比例するので、SBSやSPMなどの他の非線形効果もまた、高飽和エネルギーファイバを使うことで低減されるであろう。したがって、より高い飽和エネルギーと低いピーク出力を持つファイバはこれらのファイバの非線形性を緩和する。

## ビーム品質

高飽和エネルギーファイバのガラスマトリックス特性は、一般に最高0.20までの高い開口数(NA)を創る傾向がある。しかしながらNAは、ペDESTALタイプのファイバ設計を使って下げることができる。それは、有効NAを減少させるためにコア周辺に高屈折率領域を加えることから成る(図2)<sup>(7),(8)</sup>。

高飽和エネルギーファイバのペDESTAL設計は以下の利点、すなわち、高ポンプ吸収が得られる高濃度ドーピング、高い非線形効果閾値用の大きなモード面積、自励レーザ発振効果低減用のより少ない増幅された誘導放出、低損失(<0.1dB)スプライス用の標準ファ

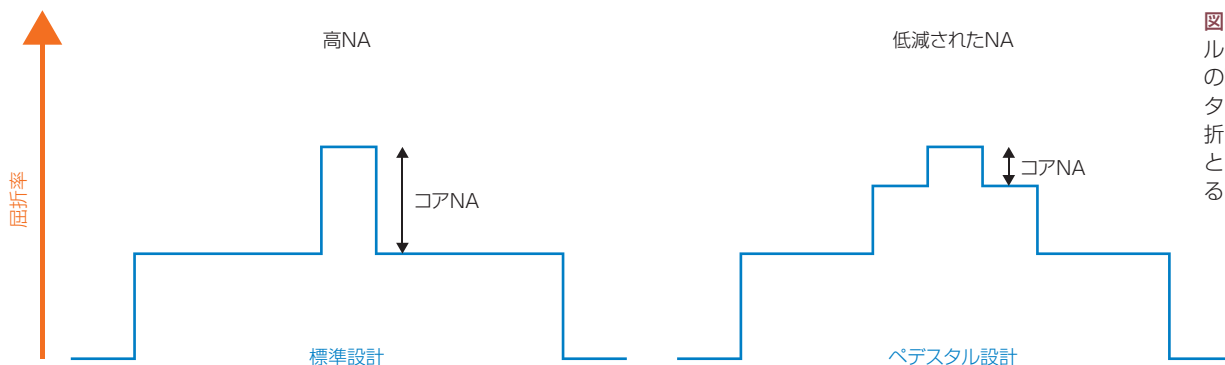


図2 高飽和エネルギー光ファイバの開口数はペDESTALタイプの屈折率設計を使うことによって低減することができる。

# Q e-DMプログラムを ご存じですか？

Laser Focus World Japanのe-DMプログラムなら、業種・職種・購買関与製品・担当製品など、ご希望の対象者に限定してメール配信を行うことが可能です。弊誌読者の皆さまは、レーザー/フォトリソ/フォトエレクトロニクス応用技術/製品の開発、研究、マーケティングなどに携わっている方だけ。光産業に特化した専門誌ならではの広告プログラムです。

# A こんなご要望に お応えできます。

- 既存顧客以外に  
新製品DMを送りたい
- 製品カタログを送りたい
- 人材募集を行いたい
- 研究者対象の製品  
アンケートを実施したい
- 技術者限定で  
セミナー告知を行いたい

### e-DM 広告掲載料金 (税抜)

データ使用料金	@70円
(抽出条件1項目につき+)	@10円
データ配信料金	@20円

お問い合わせ・お申し込みは…

株式会社 ICS コンベンションデザイン  
電話:03-3219-3641 Email:led@ics-inc.co.jp

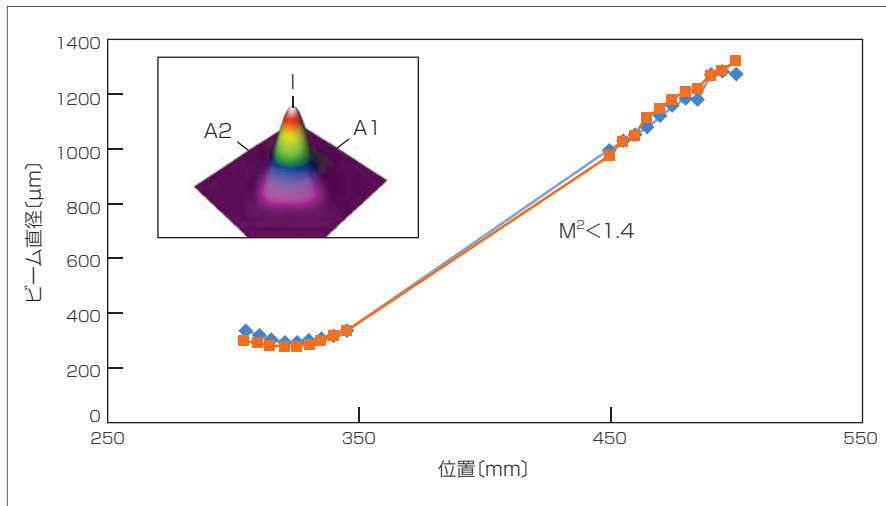


図3 ビーム品質は素晴らしく ( $M^2 < 1.4$ )、高飽和エネルギーのCorActive社のDCF-YB-30/250P-FA光ファイバでガウス成形されている。

イバへの優れた結合性を提供する。

ペダスタル設計の高飽和エネルギーファイバのコアNAは一般に0.10近傍の値にまで低下する。しかし、われわれは、NAを0.06レベルまで減らすことは有利でないことに気付いた。実際に、低NA、ラージモードエリア(LMA)ファイバ(大きなコア径と低いコアNA)の使用は伝搬するモードの数を制限し、通常はタイトなファイバコイルで行う高次モードの除去を可能にし、準シングルモード動作を達成する。

このタイトなファイバコイルは一般に再現性に乏しく、生産環境での制御が困難であるので、生産に不向きなタ

イトファイバコイルを用いない高NA、マルチモード、高飽和エネルギーのファイバが高効率のシングルモード動作の達成に好ましい。シングルモード動作は、高飽和エネルギーファイバの基本モードをデリバリファイバの基本モードに整合させることによって実現される。

高飽和エネルギー Yb ドープガラスファイバは、皆無に近い非線形効果、高い効率、ガウスビームプロファイルによる1.4以下の低い $M^2$ 値を提供するので、高エネルギー、高ピーク出力のファイバレーザ設計において好ましい選択になるであろう(図3)。

#### 参考文献

- (1) G.P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, San Diego, CA (2001).
- (2) K.T. Vu et al., Opt. Exp., 14, 23, 10996-11001 (2006).
- (3) D.N. Schimpf et al., Opt. Exp., 16, 22, 17637-17646 (2008).
- (4) M.N. Zervas et al., "High peak power, high rep-rate pulsed fibre laser for marking applications," Proc. SPIE, 6102, 61020Q-1 (2006).
- (5) F. He et al., Opt. Exp., 14, 26, 12846-12858 (2006).
- (6) A.E. Siegman, Lasers, University Science Books, Sausalito, CA (1986).
- (7) P. Laperle et al., "Yb-Doped LMA Triple-Clad Fiber Laser," Proc. SPIE, 6343, 63430X-1 (2006).
- (8) P. Laperle et al., "Yb-Doped LMA Triple-Clad Fiber for Power Amplifiers," Proc. SPIE, 6453, 645308-1 (2007).

#### 著者紹介

ミッシェル・ベガン (Michel Bégin) はカナダ CorActive 社の製品ラインマネージャ、ベルトラン・モレッセ (Bertand Morasse) は R&D 科学者。e-mail: michel.begin@coractive.com URL: www.coractive.com.