

ファイバレーザと先進的光技術

光電子技術研究所／光応用製品事業推進室 姫野邦治¹

Fiber lasers and their advanced optical technologies

K. Himeno

近年、ファイバレーザが注目されています。当社ではファイバレーザに必要なすべての光技術を集積しており、ファイバレーザの高性能化および製品化に向けて精力的に研究開発を進めてきました。本報告では、高出力パルスファイバレーザ、高出力連続波ファイバレーザおよび波長変換用ファイバレーザの試作成果や製品を紹介しながら、これらの製品分野ごとに光技術に関する当社独自の先進的な研究開発成果について述べます。

Fiber lasers have attracted much attention in recent years. Fujikura has accumulated all of the optical technologies required for fiber lasers, and researched intensively on fiber lasers in terms of their sophistication and commercialization. This report introduces Fujikura's fiber laser prototypes and products on high-power pulsed fiber lasers, high-power continuous-wave fiber lasers, and fiber lasers for wavelength conversion. This paper also describes original and advanced results from Fujikura's research and development activities corresponding to these fiber laser categories.

1. ま え が き

ファイバレーザは、希土類元素を光ファイバのコアに添加した光ファイバを増幅媒体とするレーザです。なかでも波長約 1 μm の近赤外波長域で発振するイッテルビウム (Yb) を添加したファイバレーザは、固体結晶や気体を増幅媒体とする既存のレーザに比べて、出力パワー、レーザビームの集光性、電力効率、スペース効率、信頼性などのあらゆる面において優れています。このため、マーキング、スクライビング、溶接および切断などの材料加工分野での普及が進んでいるだけでなく、医療、バイオ分析など様々な分野への応用が期待されています。

図 1 にファイバレーザの基本構成を示します。当社グループでは、本特集のほかの報告にて紹介されている通り、光通信分野でつちかかってきた増幅用光ファイバなどの光ファイバ技術、ファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG) や励起コンバイナなどの光部品技術、各光部品や光ファイバを接続する光接続技術、光励起用の高出力半導体レーザ技術といったファイバレーザを構成するのに必要なすべての光技術を保有しています。これらの技術は全て世界トップクラスのレベルにあり、当社ではこれらを十二分に活用しファイバレーザの高出力化および高性能化に精力的に取り組んできました。

ファイバレーザの研究開発における進展の方向性は、(1) 高出力化・高輝度化、(2) 発振波長の多様化、(3) 短

パルス化であるといえます。フジクラではこれまでおもに (1) および (2) の方向性を見すえて研究開発を行ってきました。本報告では、高出力パルスファイバレーザ、高出力連続波ファイバレーザおよび波長変換用ファイバレーザの試作成果および製品を紹介します。あわせてこれらの製品分野ごとに光技術に関する当社独自の先進的な研究開発成果について述べます。

2. 高出力パルスファイバレーザ

パルスファイバレーザは、マーキング、彫刻、各種パターニングなどの表面加工、あるいは微細な溶接・切断に応用されています。当社ではパルス幅 100 ns レベルの Q スイッチ動作のパルスファイバレーザに関して、世界

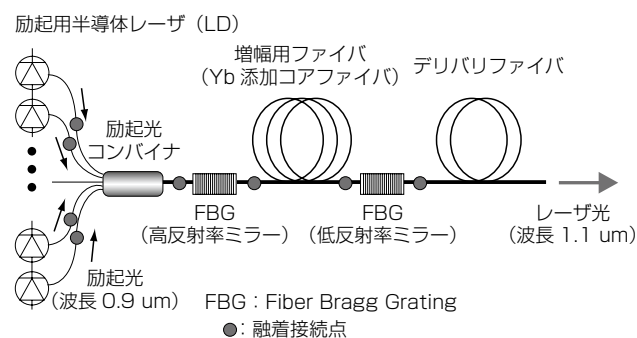


図 1 ファイバレーザの基本構成
Fig. 1. Basic configuration of fiber laser.

¹ 光技術研究部部長／ファイバレーザ製品部部長

略語・専門用語	正式表記	説明
フォトダークニング (PD)	Photodarkening	強い光によりガラスなどの透明材料に欠陥が生成され不透明となる現象。特に近赤外光よりも短い波長領域で顕著に表れる。
ファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG)	Fiber Bragg Grating	光ファイバのコアの長手方向に屈折率の周期構造を設けた光ファイバ部品。光を空間に取り出すことなく、ファイバ中にミラーやフィルタの機能を付与できる。
フォトリック・バンドギャップ・ファイバ (PBGF)	Photonic Bandgap Fiber	光ファイバ断面に設けた屈折率の周期構造により、断面方向に光を閉じ込め導波する光ファイバ。従来のコア/クラッド構造で導波する光ファイバに比べて、フィルタ機能などさまざまな機能を付与できる。
非線形光学効果	Nonlinear optical effect	物質に強い光を入射したときに光の強度に依存して光の位相や周波数が変化する現象。入射した光の波長に着目すると、入射光の強度と出射光の強度が1次関数(線形)の関係ではなくなる。光の応用分野では問題となる場合が多いが、反対に積極的に活用することもできる。
誘導ラマン散乱 (SRS)	Stimulated Raman scattering	物質に光が入射すると物質の格子振動によりその光が変調を受けることで格子振動の周波数成分だけ周波数がシフトした光の成分であるストークス光が生じ(ラマン散乱)、さらに非常に強い光を入射すると、ストークス光が光の強度に比例して増幅される現象。

に先駆けて平均出力 30 W を達成¹⁾し、現在では世界最高レベルの 50 W 出力まで製品化しています。当社の空冷パルスファイバレーザ製品に関して、図 2 に外観を表 1 に諸元を示します。

パルスファイバレーザの開発において最初の課題は、Yb をコアに添加した増幅用ファイバに高強度の励起光を入射した際に生じる、フォトダークニング (PD) という損失増加現象を抑制することでした。当社では、世界で初めて、Yb とともに高い濃度でアルミニウムをコアに共添加することにより PD を大幅に抑制できることを発表しました²⁾。引き続き PD 現象の機構解明の研究を継続し、現在では PD の完全な抑制に成功しています。

パルスファイバレーザでは、通常、主発振器で発生したパルス光を単数あるいは複数のパワーアンプで増幅する MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 構成が採用されます。MOPA 構成のファイバレーザでは、加工対象

物からの反射光などに起因するレーザ内部での各種戻り光に関する対策が必要となります。まず、パワーアンプで増幅された高強度の戻り光パルスが、励起コンバイナとパワーアンプ用ファイバとの接続点において励起ポートに漏洩すると、半導体レーザが損傷されてしまうという問題がありました。当社では、信号用コアの外側に漏洩した戻り光パルスを閉じ込める外側コアを有する独自構造の励起コンバイナ³⁾を開発し、半導体レーザの保護に成功しています。

次に、高強度の戻り光パルスが主発振器または前段のパワーアンプに戻るとファイバや各種光部品を損傷するという問題もありました。これに対しては、光ファイバ中での非線形光学効果の一つである誘導ラマン散乱 (SRS) を活用した「ラマンシフタ」と呼ばれる独自の戻り光抑制機構⁴⁾を開発し、低コストで戻り光抑制を実現しました。



図 2 空冷パルスファイバレーザ製品の外観
Fig. 2. Appearance of air-cooled pulsed fiber laser product.

表 1 空冷パルスファイバレーザ製品の諸元
Table 1. Typical specifications of air-cooled pulsed fiber laser product.

項目	仕様 (標準値)
中心波長	1085 nm
定格出力	最大 50 W
ビーム品質 M ²	≤2.0
パルス周波数	50-100 kHz
パルス幅	100-200 ns
パルスエネルギー	最大 1 mJ
ピークパワー	5-10 kW
インターフェース	アナログ/デジタル, RS-232
電源	DC 24 V
寸法	幅 310 × 高さ 181 × 奥行 416 mm
質量	15 kg

図 3 に MOPA 構成の基本構成とラマンシフタの概念を示します。主発振器で生成された波長 λ の高強度のレーザー光パルスは、ラマンシフタ内の誘導ラマン発生用ファイバを通過する際、誘導ラマン散乱により $\Delta\lambda$ だけ波長がシフトした波長 $\lambda + \Delta\lambda$ のパルス光（ストークス光）を生成します。一方、パワーアンプからの戻り光に関しては、フィルタ 2 の効果により波長 $\lambda + \Delta\lambda$ の成分しか前段には戻れません。この波長成分の強度が弱ければ波長 $\lambda + \Delta\lambda$ の成分のまま誘導ラマン発生用ファイバを通過し、高強度であればさらに $\Delta\lambda$ だけ波長がシフトして波長 $\lambda + 2\Delta\lambda$ のパルスとなります。しかし、いずれの成分も波長 λ のみを透過させるというフィルタ 1 の効果により前段の主発振器部には戻れません。このようにして、パワーアンプからの戻り光の主発振器に対する影響を排除でき、励起コンバイナ構造の効果とあいまって、戻り光に強いパルスファイバレーザを実現しています。

3. 高出力連続波ファイバレーザ

一定のレーザー光出力や変調されたレーザー光出力を発生させる連続波レーザは、溶接・切断などの材料加工に用いられています。出力に応じて加工速度や加工できる材質が決まるため、加工速度の向上や高反射材料の加工に

は、数 100 W から kW クラスにおよぶファイバレーザの高出力化が必要となります。すでに、2000 年初頭から高出力ファイバレーザの開発に着手し先行している米国の 1 社からは 10 kW を超えるファイバレーザが製品化されており、現在各社がこれを追って高出力化にしのぎを削る状況にあります。

このようなファイバレーザの高出力化には、(1) 半導体レーザの高出力化・高輝度化、(2) 励起コンバイナの半導体レーザ用入力ポート数の増加、(3) 各種光部品および光パワーへの耐力向上が必須となります。(1) に関しては、当社グループのオプトエナジー社において、端面に生じる回復できないダメージの回避技術と高効率化独自技術により 15 W という世界最高出力輝度の半導体レーザ⁵⁾を開発しました。

(2) および (3) に関しては、たとえば当社独自の 2 段構造を有する入力 42 ポートの励起コンバイナを開発しました⁶⁾。これらの技術を用いることで、当社では日本ではじめて 300 W 空冷連続波シングルモードレーザを製品化しています。本製品の外観を図 4 に諸元を表 2 に示します。さらに、図 5 に示す外観を有する 2 kW 水冷連続波マルチモードレーザの試作機も完成しており、現在その製品化およびさらなる高出力化に取り組んでいます。

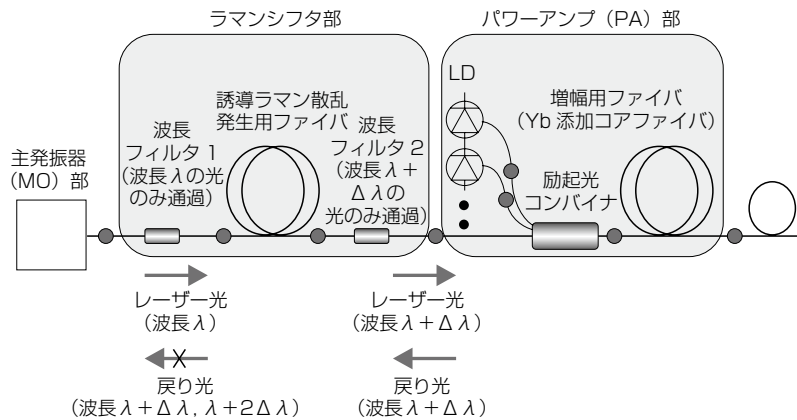


図 3 MOPA 構成とラマンシフタの概念図
Fig. 3. MOPA configuration and concept of Raman shifter.



図 4 空冷 300 W 連続波シングルモードファイバレーザ製品の
外観
Fig. 4. Appearance of air-cooled continuous-wave single-mode fiber laser product.

表 2 空冷連続波シングルモードファイバレーザ製品の
諸元

Table 2. Typical specifications of air-cooled continuous-wave single-mode fiber laser product.

項目	仕様 (標準値)
中心波長	1095 nm
定格出力	最大 300 W
ビーム品質 M^2	≤ 1.3
最大変調周波数	50 kHz
最小パルス幅	10 μ s
電源電圧	AC 200 V
インターフェース	アナログ/デジタル, RS-232
寸法	幅 440 × 高さ 222 × 奥行 668 mm
質量	50 kg



図5 水冷2 kW 連続波マルチモードレーザー試作機の外観
Fig. 5. Appearance of water-cooled continuous-wave multimode fiber laser prototype.

将来の高出力化，特にシングルモードファイバレーザにおけるさらなる高出力化に向けては，レーザからの出射光を加工対象まで伝送するデリバリファイバの長尺化の際に問題となる非線形光学効果を抑制する必要があります。非線形光学効果のうち最も影響が大きいのがSRSです。当社では，SRS抑制手法に関してフォトニックバンドギャップファイバ（PBGF）に着目し，特殊ファイバ設計および製造技術を活かし様々なファイバを開発してきました。まず，ファイバの阻止波長帯をラマン散乱のストークス波長に設定し，ファイバ長手方向にストークス光をフィルタリングするファイバを用いることによりSRSを抑制する手法を開発しました⁷⁾。図6に本ファイバの断面写真を示します。さらに，コア内の光強度を低減することによりSRSを抑制すべく，従来のコア/クラッド構造の光ファイバでは実現できない程度まで実効コア断面積（ A_{eff} ）を大幅に拡大したPBGFも開発しており，世界トップクラスの A_{eff} である $650 \text{ } \mu\text{m}^2$ を実現しました⁸⁾。これらの技術の活用により 10 kWクラスのレーザ光をシングルモードで伝送可能となることが期待できます。

4. 波長変換用ファイバレーザ

従来の固体レーザと同様，非線形光学効果を応用した波長変換素子に近赤外の基本波レーザ光を通過させ，2次高調波など高次の高調波を発生させることにより，ファイバレーザにおいても可視光や紫外光の発生が可能です。図7に波長変換用ファイバレーザの構成とそれを用いた

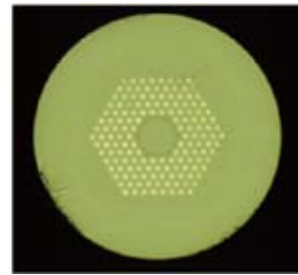


図6 SRS抑圧PBGFの断面
Fig. 6. Cross section of PBGF for SRS suppression.

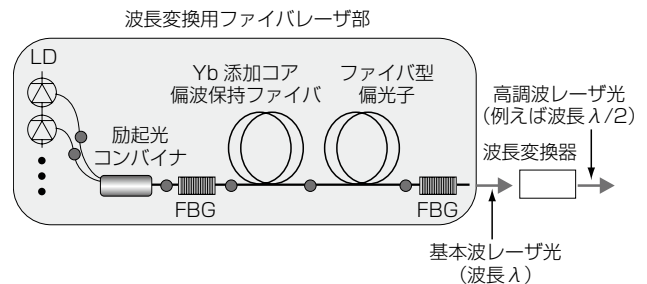


図7 波長変換用ファイバレーザの構成と波長変換光回路の構成
Fig. 7. Configurations of fiber laser and optical circuit for wavelength conversion.

波長変換光回路の構成を示します。ファイバレーザによる基本波レーザ光はビームの集光性がよく波長変換素子中のパワー密度を向上できるため，このようなシンプルな構成で高効率で高出力な可視光あるいは紫外光の連続波レーザを実現できます。このため，ファイバレーザを用いた波長変換レーザは，材料加工の分野だけでなく，半導体関連の検査装置，医療（治療），バイオ分析機器，ディスプレイなどへの応用も期待されています。当社は早くからファイバレーザの波長変換用レーザとしての優位性に着目し，この分野に関しても研究開発を行ってきました。

波長変換素子の変換効率は入射光の直線偏波の方向に大きく依存性するため，波長変換用ファイバレーザでは単一の直線偏波で発振させることが必要です。フジクラは世界トップのPANDA型偏波保持ファイバに関する技術を有しており，これを活用してPANDA型単一偏波Yb添加コアファイバを開発しました。図8に本ファイバの断面写真を示します。本ファイバを用いることで，連続波レーザとしては実現困難な 10 Wの緑色出力を達成しています⁹⁾。

ファイバレーザは固体レーザに比べて利得波長帯域が広いことも特徴であり，従来の固体レーザでは発振不可能な波長の基本波レーザ光を発生させることが可能です。このため，ファイバレーザを基本波レーザとすることで，固体レーザを基本波レーザとした場合には発生できない波長の可視光あるいは紫外光を発生させることが期待されます。しかしながら，固体レーザでは発振不可能でフ

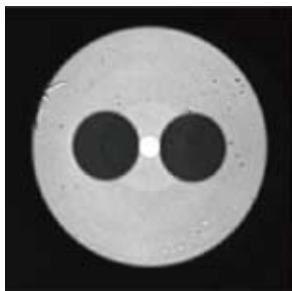


図8 PANDA型単一偏波Yb添加コアファイバの断面
Fig. 8. Cross section of PANDA-Type single-polarization Yb-doped-core fiber.

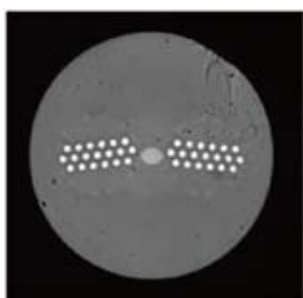


図9 Yb添加コア偏波保持PBGFの断面
Fig. 9. Cross section of Yb-doped-core polarization-maintaining PBGF.

ファイバレーザにおいても利得の低い波長域においてファイバレーザを発振させると、所望する波長領域以外の利得の高い波長域で寄生発振を生じるという問題がありました。当社では、ここでもPBGFの特徴に着目し、ファイバの阻止波長帯を寄生発振の波長に設定する手法を開発しました。まず、偏波保持特性を付与したYb添加コアPBGFの構造を提案し、さらにこの構造を発展させて通常のYb添加コアでは容易に寄生発振を生じてしまう短波長域を阻止波長域とするYb添加コア偏波保持PBGFを開発しました。本ファイバの断面写真を図9に示します。本ファイバを用い図7中に示す波長変換用ファイバレーザを構成することで、波長 $1.18 \mu\text{m}$ において単一の共振器構成では世界最高の出力である 10 W 以上のレーザ光を得ました¹⁰⁾。この基本波レーザ光を波長変換することで、従来得られなかった $0.59 \mu\text{m}$ という橙色のレーザ光を高出力で得ることが可能となります。

5. む す び

高出力パルスファイバレーザ、高出力連続波ファイバレーザおよび波長変換用ファイバレーザの試作成果および製品を紹介し、これらの製品分野ごとに当社の研究開発成果について述べました。ここで述べた技術には、高出力化に伴う問題の解決、とくに非線形光学効果の抑制あるいは積極的活用に特色があり、独自性および先進性の非常に高い光技術であると考えています。今後とも、これまでの成果をファイバレーザ製品に導入し続け、さらに先進的な光技術を開発することで、ものづくりを中心とする産業界に貢献してまいります。

参 考 文 献

- 1) M. Nakai, et. al.: "30 W Q-SW fiber laser, PhotonicsWest 2007," Proc. of SPIE Vol. 6453 645319-1, 2007.
- 2) T. Kitabayashi, et. al.: "Population inversion factor dependence of photodarkening of Yb-Doped fibers and its suppression by highly aluminum doping," OFC/NFOEC2005, OThC5, 2005.
- 3) 田中弘範ほか：「ファイバレーザにおける励起LDへの戻り光抑制構造」, レーザ学会学術講演会第27回年次大会講演予稿集, B5-18aVIII10, p. 50, 2007.
- 4) 柏木正浩ほか：「誘導ラマン散乱を用いたファイバレーザ用インラインアイソレータ」, レーザ学会学術講演会第30回年次大会講演予稿集, B84p-I 004, p. 48, 2010.
- 5) 藤本毅ほか：「ファイバレーザ励起用レーザダイオードの高出力化の展望」, レーザ学会学術講演会第31回年次大会講演予稿集, S209a I 4, pp. S7-S8, 2011.
- 6) 島研介ほか：「ファイバレーザと省エネルギー」, 日本光学会年次学術講演会 Optics&Photonics Japan 2009 予稿集, Paper 24aAS5, 2009.
- 7) 柏木正浩ほか：「分布型フィルタ機能を有した光ファイバーのファイバレーザ応用」, レーザ学会学術講演会第31回年次大会講演予稿集, S109a I 03, pp. S5-S6, 2011.
- 8) M. Kashiwagi et. al.: "Low bending loss and effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with an effective area of $650 \mu\text{m}^2$," Optics Lett., vol. 37 issue 8, pp. 1292-1294, 2012.
- 9) 柏木正浩ほか：「高効率単一偏波ファイバレーザ」, フジクラ技報, vol. 2, no. 117, pp. 1-4, 2009.
- 10) M. Kashiwagi et. al.: "Over 10 W Output linearly-polarized single-stage fiber laser oscillating above 1160 nm using Yb-Doped polarization-maintaining solid photonic bandgap fiber," IEEE Journal of Quantum Electron., vol. 47, no. 8, pp. 1136-1141, 2011.