

4 kW出力連続波ファイバレーザ

光電子技術研究所 杉本 亮¹・市井健太郎²・後藤龍一郎³・
柏木正浩⁴・北林和夫⁵・島田典昭⁵

4 kW Continuous Wave Fiber Laser

R. Sugimoto, K. Ichii, R. Goto, M. Kashiwagi, T. Kitabayashi, and N. Shimada

近年、金属加工用途としてkW級出力の連続波ファイバレーザの需要が高まっている。当社グループはファイバレーザを構成するための主要技術の全てを保有しており、それらを活用することにより4 kW出力の連続波ファイバレーザの開発・製品化に成功した。当社の4 kW出力連続波ファイバレーザは独自の構造で加工時に問題となる反射光に対する耐性を高めており、これにより反射光の影響を受けない安定した材料加工の提供を可能としている。

In recent years, demand for the continuous wave fiber lasers of several kW output power is increasing in use for metal material processing. Fujikura group have all principal technologies required for constituting fiber lasers. We succeeded in commercializing the continuous wave fiber laser of 4 kW output power by using those technologies. Our 4 kW CW fiber laser product has a high tolerance for the back reflection light from the workpiece due to our original structures, and can provide stable material processing.

1. ま え が き

波長約1 μm の近赤外領域で発振するイッテルビウム (Yb) 添加ファイバレーザは、既存の固体レーザに比べてビームの集光性や電力効率、信頼性など多くの面で優れていることから、マーキング、スクライビング、溶接及び切断などの材料加工分野での普及が急速に進んでおり、ファイバレーザの市場規模は全世界で700億円を超えるまでに成長している。その中でも金属加工用途としてkW級出力の連続波ファイバレーザの需要が年々高まっており、今後も堅調な成長が予想されている¹⁾。

図1にファイバレーザの基本構成を示す。ファイバレーザは、コアにYb等の希土類元素を添加した光増幅用ファイバ、希土類元素を励起するための励起用半導体レーザ (励起LD)、励起LDからの励起光を光増幅用ファイバに結合させるための励起光コンバイナ、光増幅用ファイバ内で発生する光のうち、特定波長の光のみを反射して繰り返し増幅させるための1組のFiber Bragg Grating (FBG) で構成される。当社グループでは、光通信分野でつちかっただけの光ファイバ技術、光部品技術、光接

続技術、高出力半導体レーザ技術等、ファイバレーザを構成するために必要となる多くの主要技術を保有しており、これらを活用して、これまでに高出力パルスファイバレーザや300 W級出力連続波ファイバレーザ等の優れた製品を開発してきた²⁾。

今回、われわれは連続波ファイバレーザの更なる高出力化をはかり、4 kW出力の連続波ファイバレーザの開発・製品化した。本稿にて概要、および特徴を報告する。

2. 基本性能

当社の4 kW出力連続波ファイバレーザの内部構成を図2に示す。複数台の連続波ファイバレーザユニットからの出力光を出力結合器で結合することにより、4 kW出力を実現している。ファイバレーザユニットはシングルモードでレーザ発振しており、それぞれ数百Wを出力する。出力結合器は、伝搬するレーザ光強度が最も高くなる箇所であるため、低い伝搬損失と高度な耐光パワー性能が求められる。われわれの出力結合器は光部品技術を活用した独自構造を採用することにより結合損失5%以下を達成しており、4 kW出力に耐え得る高い信頼性を備えている。

図3に4 kW出力連続波ファイバレーザの外観を、表1に主要諸元を示す。本製品はコア径50 μm のフュードファイバから波長1080 nmで4 kWのレーザ光を出力する。材料加工品質に影響するパラメータである

1 光技術研究部 グループ長

2 光ファイバ技術研究部

3 光ファイバ技術研究部 グループ長

4 光技術研究部 (科学博士)

5 光技術研究部

略語・専門用語	正式表記	説明
BPP (ビームパラメータ積)	Beam Parameter Products	ビームウエストの半径とビームの発散角の半値半幅の積として定義され、単位は [mm・mrad] で表される。ビーム品質を評価する際に用いられる。
FBG	Fiber Bragg Grating	光ファイバのコアに回折格子を作製することで特定の波長の光を反射するようにしたファイバ型光部品。ファイバレーザ共振器を構成するために用いられる。
YbDF	Ytterbium Doped Fiber	コアに希土類元素であるイッテルビウムを添加した光増幅用ファイバ。

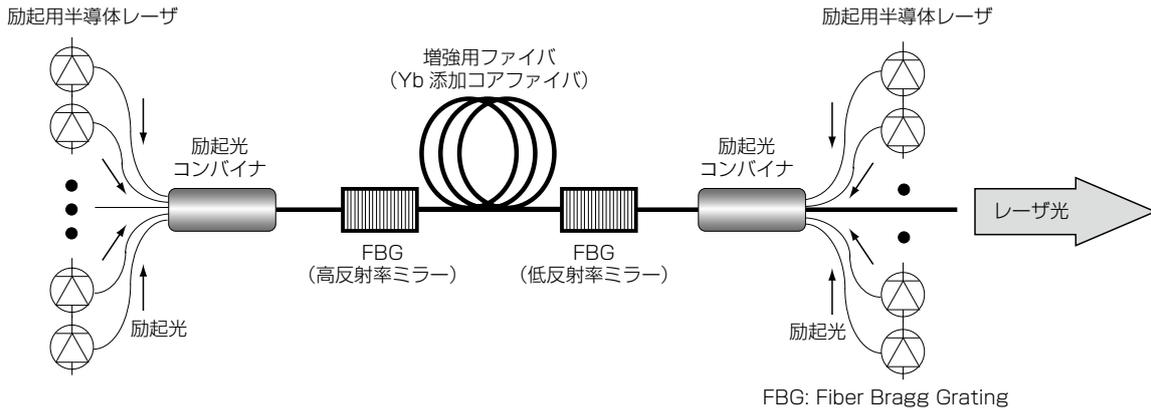


図1 ファイバレーザの基本構成
Fig. 1. Basic configuration of fiber laser.

ビームパラメータ積 (BPP) は 2.5 mm・mrad 以下であり、十分な加工性能を有している。また、本体キャビネットは国際規格 IP 54 相当の防塵・防水構造となっており、様々な設置環境に対応できるようになっている。

図 4 にファイバレーザの出力特性を示す。励起 LD 投入電力に対するレーザ光出力変換効率は 36 % 以上、ファイバレーザ装置全体の消費電力に対する変換効率 (ウォールプラグ効率) は 26 % 以上であり、従来の固体レーザと比較して省電力性能に優れている。

複数個使用している励起 LD には冗長性を持たせており、励起 LD 出力が低下してきた場合においても冗長分の励起 LD を駆動することでファイバレーザ定格出力が継続して得られるように設計されている。これによりファイバレーザシステムとしての長寿命を確保している。

3. ファイバレーザの高出力化技術

kW 級出力のファイバレーザを材料加工用途に用いる場合、加工に必要な基本性能を満たすこと以外に、解決しなければならない課題がいくつかある。当社は、強みである豊富なプラットフォーム技術を活用して多くの課題解決を果たした。

本章ではファイバレーザが持つ代表的な課題と、それらに対する当社の取り組みを紹介する。

3.1 フォトダークニングの抑制

フォトダークニングは高強度の光が光ファイバ内に入

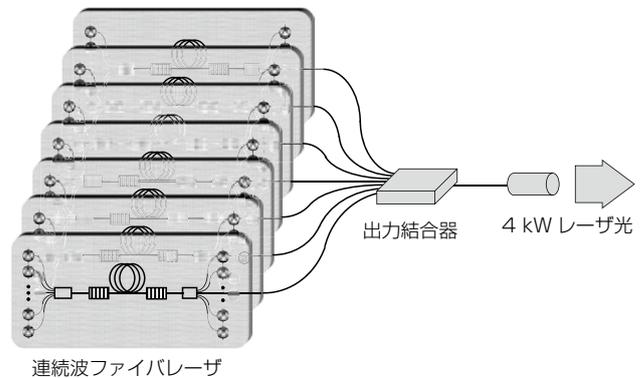


図2 4 kW 出力ファイバレーザの構成
Fig. 2. Configuration of 4 kW CW fiber laser.

射することにより光学媒質の透明性が失われ、その結果光ファイバ損失が増加する現象である。ファイバレーザでは、高強度の励起光とレーザ光が共存する Yb 添加光増幅用ファイバ (YbDF) において発生する。フォトダークニングが発生するとファイバレーザの出力は劣化してしまうため、フォトダークニングの抑制は高出力ファイバレーザにとって必須の技術である。

フォトダークニングの抑制には光増幅用ファイバ中の Yb イオンのクラスタ化を抑えることが有効とされている³⁾。当社ではクラスタ化を抑える効果のある元素としてアルミニウムを共添加した YbDF を発表⁴⁾ するなど、フォトダークニング抑制のためのガラス製法技術開発に



図3 4 kW 出力連続波ファイバレーザの外観
Fig. 3. Appearance of 4 kW CW fiber laser product.

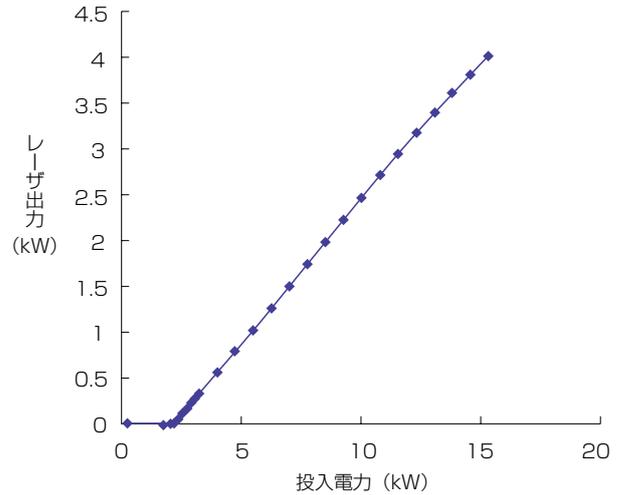


図4 4 kW 出力連続波ファイバレーザの出力特性
Fig. 4. Output characteristics of 4 kW CW fiber laser.

表1 4 kW 出力連続波ファイバレーザの諸元
Table 1. Specifications of 4 kW CW fiber laser product.

項目	仕様
中心波長	1080 nm (Typ.)
定格出力	4 kW
BPP	$\leq 2.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
フィードファイバコア径	50 μm
出力安定度	$< \pm 2 \%$
最大変調周波数	10 kHz
電源	三相 200 V (50 / 60 Hz)
冷却方式	水冷
外形寸法	幅 690×奥行 1200×高さ 1570 (突起物除く)

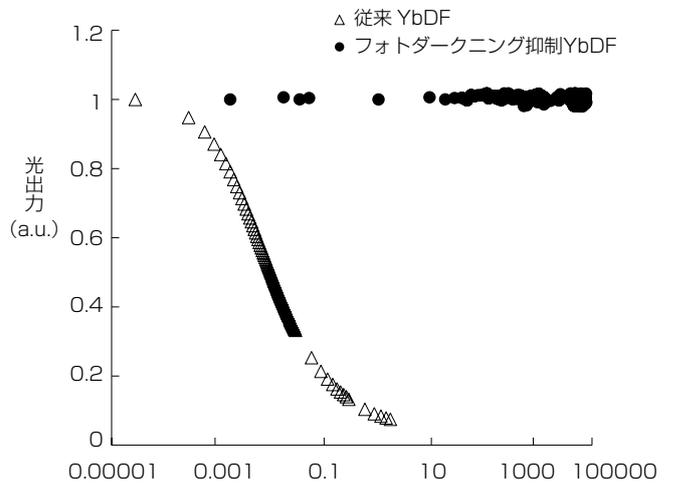


図5 フォトダークニングの抑制
Fig. 5. Suppression of photodarkening.

取り組んできた。図5はYbDFにおけるフォトダークニング現象を観測した結果である。ここでは短時間でフォトダークニングの影響を観測するため、実使用条件より入射励起光のパワー密度を高めて実験を行っている。フォトダークニング抑制をしていない従来YbDFは短時間のうちに本来の出力の10%以下まで出力が低下してしまうのに対し、われわれが開発したフォトダークニング抑制YbDFには出力劣化が見られないことがわかる。当社のすべてのファイバレーザ製品にはこのフォトダークニング抑制技術が採用されている。

3.2 加工物からの反射光耐性

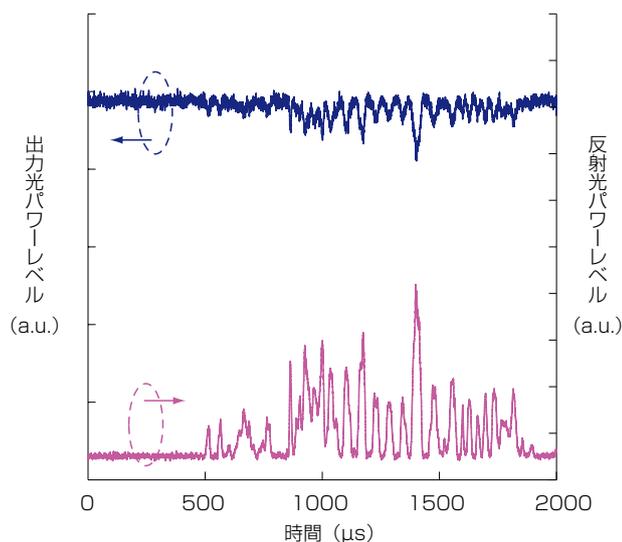
ファイバレーザはその構造上、加工物からの反射光に対する耐性が弱いことが以前から指摘されている。ファイバレーザの射出端から光ファイバ内部に戻った加工物からの反射光が、光増幅用ファイバ内で増幅されて高強度になってしまい、それらが光部品や励起LDに到達す

ることによって故障が生じてしまう。そのため、特に銅などの高反射材料の加工においては、現状は加工ヘッドを傾けるなどにより、反射光がファイバレーザ内に戻らないようにして加工せざるを得ない。加工の自由度を上げるためにも、ファイバレーザの加工物からの反射光耐性を高めることが重要である。

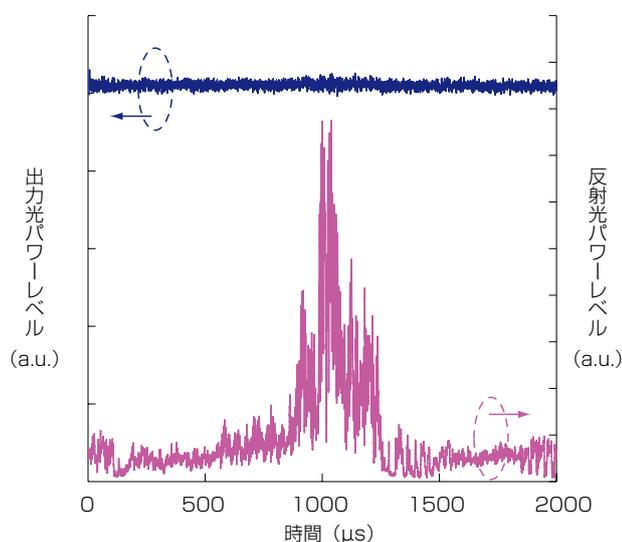
加工物からの反射光による励起LD故障を防ぐため、当社では独自構造の励起光コンバイナを開発し、励起光コンバイナ内での反射光の拡散を抑え、励起LDが接続される光ファイバに反射光が結合することを抑制した。これにより反射光が励起LDに到達することを防ぎ、製品の保護に成功している。

3.3 加工時の出力安定性

加工物からの反射光が引き起こすもう一つの問題として出力光強度の変動がある。反射光がファイバレーザ内部に戻るとレーザ発振状態が不安定になり、ファイバレ



(a) 従来のファイバレーザ



(b) 反射光の影響を抑制したファイバレーザ

図6 レーザ出力安定度
Fig. 6. Output power stability.

レーザ出力が変動する。その結果、加工エラー等が生じ、安定した加工ができなくなってしまう。

われわれは光ファイバの構造パラメータを見直し、最適化を行うことで反射光の影響を抑制し、安定したレーザ出力特性を実現した。図6にファイバレーザ内部に戻った反射光レベルおよびレーザ出力光レベルの時間変化を示す。反射光の影響を抑制していないファイバレーザでは、加工物から反射光が戻ると同時にレーザ出力も変動しているのに対し、反射光の影響を抑制したファイバレーザの出力光レベルは、反射光が戻った場合でもその影響を受けずに安定して動作していることがわかる。この技術により、当社のファイバレーザは加工物からの反射にほとんど影響されず、安定した加工を提供することができる。

表2 加工事例
Table 2. Processing examples

加工内容	材質	厚さ (mm)	レーザ出力 (kW)	ステージ速度 (mm/s)
切断	セラミック	1.5	2.5	80
	CFPR	0.6	1	100
	SS 400	16	2	12
	銅	3	2	33
	銅	3	4	100
	銅	4	3	30
	銅	5	3.5	20
	真鍮	5	3	20
突合せ溶接	SPCC	3	3	33
	銅	3	3	5

4. 加工事例

4 kW出力連続波ファイバレーザを用いて行った金属加工例を表2に示す。多種にわたる材料に対して加工実験を行い、十分な加工性能を有していることを確認した。また、高い反射光耐性により、高反射材料である銅の切断加工も加工ヘッドを傾けることなく実現することができた。これらは一例であり、今後も高出力と高反射耐性を兼ね備えた当社のファイバレーザを用いて加工技術検討を行うことにより、加工速度の向上、切断加工板厚の増加、適応材料の増加などが期待できる。

5. むすび

製品化に成功した4 kW出力連続波ファイバレーザについて、その基本性能及び搭載されている当社の独自技術を紹介した。4 kW出力連続波ファイバレーザは当社の強みである高レベルの光ファイバ関連技術を活用し、各構成部品をkW級出力ファイバレーザ用に最適化することにより実現できたものである。今後もその独自性を活かしたファイバレーザ製品を開発していき、産業界の発展に貢献していく。

参考文献

- 1) The Worldwide Market for Lasers, Strategies Unlimited, pp10-11, 2013
- 2) 姫野邦治:「ファイバレーザと先進的光技術」, フジクラ技報, 第123号, pp.33-37, 2012
- 3) A.D. Guzman Chavez, et al: "Reversible photo-darkening and resonant photobleaching of Ytterbium-doped silica fiber at in-core 977-nm and 543-nm irradiation", Laser Phys. Lett., 4, No. 10, pp. 734-739, 2007
- 4) T. Kitabayashi, et al: "Population Inversion Factor Dependence of Photodarkening of Yb-doped Fibers and its Suppression by Highly Aluminum Doping", OFC/NFOEC 2006, paper OthC5, 2006