高出力 CW ファイバレーザ技術

High Power Continuous Wave Fiber Laser Technologies

金 田 恵 司*
Keiji KANEDA

Key Words: High Power Fiber Laser, Stimulated Raman Scattering, Reflection Resistance, Metal Processing

1. まえがき

波長約 $1\ \mu\text{m}$ 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 Nd: YAG レーザ、 CO_2 レーザなどに比べてビーム品質や電力効率、信頼性など多くの面で優れており、切断、溶接、マーキングおよびスクライビングなどの材料加工分野での普及が急速に進んでいる。

当社は光通信分野において、増幅用ファイバなどの特殊ファイバ技術、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ファイバ接続技術をつちかってきた。近年は高出力半導体レーザ (LD) を自社の要素技術に加え、ファイバレーザに必要な全ての技術を保有するに至っている。

本稿では、当社の純国産高出力ファイバレーザの特長、機能、製品ラインアップについて述べる。

2. ファイバレーザの構成

2.1 ファイバレーザ共振器の基本構成

Fig.1 に希土類添加コア高出力ファイバレーザの基本構成を示す。複数の励起 LD 光は、励起コンバイナを介し増幅用ファイバに導入され、コア中の活性元素の電子を励起

波長に応じたエネルギー準位に励起する。励起された電子が基底準位に遷移する際、両準位間のエネルギー差に応じた波長の光を自然放出 (発光) する。

増幅用ファイバの両側には光ファイバのコアに回折格子を形成した FBG がある。FBG は、特定波長を反射するミラーとして働き、片側を高反射率、もう片側を低反射率とすることでレーザ共振器を構成する。この共振器中で、自然放出光のうち FBG で選択的に反射された特定波長成分の光を種として光の誘導放出が起こる。誘導放出された光は、共振器内部を伝搬し両 FBG で反射される。この間誘導放出が繰り返されることでレーザ光が生成され、低反射率側の FBG 出口より出射される。

2.2 高出力ファイバレーザの構成

当社の 8 kW ファイバレーザの構成を Fig.2 に示す。6 台の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、8 kW 出力を実現している。各ファイバレーザユニットは横モードシングルでレーザ発振しており、それぞれ 1.4 kW を出力する。

Fig.1 Fundamental Fiber Laser Optical Circuit.

Fig.2 Schematic of 8 kW Multi-mode Fiber Laser.

*株式会社フジクラ エネルギー・情報通信カンパニー ファイバレーザ事業部 (〒 285-8550 千葉県佐倉市六崎 1440)
Fiber Laser Division, Power & Telecommunication Systems Company (1440 Mutsuzaki, Sakura-shi, Chiba 285-8550 Japan)

Fig.3 8 kW CW Fiber Laser.

Table 1 Specification of 8 kW CW Fiber Laser.

Items	Spec. Values
Center Wavelength	1070 nm (Typ.)
Rated Power	8 kW
BPP	$\leq 4.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (3.0 mm·mrad, Typ.)
Feed Fiber Core dia.	100 μm
Output Stability	$< \pm 2\%$
Max. modulation freq.	10 kHz
Power Supply	Three-phase 200 V (50/60 Hz)
Cooling	Water
Dimension	690W × 1200D × 1570H in mm

出力結合器は、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 3 % 以下を達成しており、8 kW 出力に耐え得る高い信頼性を備えている。

Fig.3 に 8 kW ファイバレーザの外観を、Table 1 に主要諸元を示す。本製品はコア径 100 μm のフィードファイバから波長 1070 nm で 8 kW のレーザ光を出力する。出力光のビームパラメータ積 (BPP) は 4.5 mm·mrad (典型値：3.0 mm·mrad) であり、十分な加工性能を有している。本体キャビネットは IP54 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する。

Fig.4 にファイバレーザの出力特性を示す。ファイバレーザ装置全体での変換効率（ウォールプラグ効率）は 38 % 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。

また励起 LD を複数個搭載し冗長性をもって駆動することにより、励起 LD 出力が低下してきた場合においても、

Fig.4 Characteristics of 8 kW CW Fiber Laser.

Fig.5 Characteristics of Photo-Darkening Suppressed Yb-Doped Fiber.

駆動電流を増加させることで、継続して得られるよう長寿命設計されている。

3. ファイバレーザの高出力化技術

3.1 フォトダークニングの抑制

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、光ファイバ損失が増加するいわゆるフォトダークニングが問題となる。レーザ出力劣化を抑えるため、フォトダークニングの抑制は高出力ファイバレーザに必須の技術である。

従来の YbDF は短時間のうちにフォトダークニングによって本来の 10 % 以下まで出力が低下してしまうが、当社が独自技術で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 (Fig.5)。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 誘導ラマン散乱 (Stimulated Raman Scattering: SRS) 光の抑制

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たことが以前から指摘されている。

反射光耐性を妨げる大きな要因として、ファイバ内で発生する誘導ラマン光があげられる。高出力ファイバレーザ

Fig.6 Generation of SRS in Fiber Laser.

Fig.7 Time variation of Output/Reflection Power.

では、出力光に非線形光学現象の一つである誘導ラマン散乱 (SRS) 光が含まれる。出力光に含まれる SRS 光が加工物で反射しファイバレーザ内に戻った場合、ファイバを逆方向に伝播しながらラマン増幅される。この際、出力光は反射 SRS の励起光となり、SRS 光の増幅に伴い減少する (Fig.6)。結果、レーザ出力は不安定となり、また増幅された SRS 光は高反射 FBG を突き抜けて光部品や励起 LD に到達し、最悪の場合機器を故障に至らしめる。

特に銅やアルミなどの高反射材料の加工では、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かった。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。

Fig.8 Cutting Performance.

われわれは光ファイバの構造パラメータを最適化し、SRS 光の発生を抑制し、安定したレーザ出力特性を実現した。Fig.7 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。SRS の発生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、SRS の発生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ヘッドを垂直に設置しても、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。

4. 加工事例

Fig.8 に当社製高出力ファイバレーザを用いて行った銅、アルミの窒素雰囲気下における切断実験の結果を示す。

加工ヘッドは対象物に対して垂直に設置し実験を行ったが、当社製ファイバレーザの高い反射光耐性により、高反射材料に対する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、当社の高出力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、適応材料の拡大などが期待できる。