

10 kW ファイバレーザとその加工特性

茅原 崇, 梅野 和行, 高木 武史
江森 芳博, 藤崎 晃

古河電気工業株式会社 (〒 290-8555 千葉県市原市八幡海岸通 6 番地)

10 kW Fiber Laser and Their Process Characteristics

KAYAHARA Takashi, UMENO Kazuyuki, TAKAGI Takeshi
EMORI Yoshihiro and FUJISAKI Akira

(Received July 17, 2019)

Key words : fiber laser, optical fiber, laser diode, material processing, welding

1. はじめに

連続発振動作する kW 級高出力のイッテルビウム (Yb : Ytterbium) ドープファイバレーザは金属材料の切断や溶接加工の応用開発が拡大しており, 従来この分野で優位であった炭酸ガスレーザから, 主役の座を奪い取ったと言っても過言ではない. 100 kW の出力¹⁾も実現しているファイバレーザの市場成長, 応用分野の拡大を後押ししているのは, 比類ない高いビーム品質, 優れたエネルギー効率, ファイバ伝送による加工装置の堅牢性, システム化の容易性等々からもたらされる周辺技術も含めた継続的な技術進歩とコストダウンである. 希土類ドープファイバを使った光通信用の光増幅器の事業を長年取り組んできた当社も, ファイバレーザの主要部品である特殊光ファイバ, 光受動部品, 光半導体の技術開発を行いながら, Yb ファイバレーザの出力の向上と高ビーム品質の実現に取り組んできた²⁾⁻⁷⁾. 当社製のファイバレーザ発振器の大きな特徴は完全なシングルモードを実現したキャビティ設計にあり, LP01 モード以外は一切の高次伝搬モードを光ファイバ導波路の設計により完全に抑圧している. この発振器をテーパ化したファイババンドルによりさらに合波する構成によりマルチモード化したレーザは, 同様に高ビーム品質を維持している. 本稿では, 10 kW の出力を実現したファイバレーザの設計と加工事例について報告する.

2. 構成部品とその設計

2.1 励起半導体

ファイバレーザの励起光源には, 電気-光変換効率 (WPE: Wall-Plug Efficiency) が高い光源であるマルチモード半導体レーザ (MM-LD : Multi-Mode Laser Diode) が用いられる. 当社の MM-LD は, 高信頼性が要求される光通信用 LD の設計, 製造, さらには信頼性保証技術を基盤としている. 光通信用半導体レーザとの共通点が多く, GaAs 系の半導体材料, シングルエミッタ設計, 信頼性保証技術が基本と

なり, モジュール化とその量産化技術も応用展開されている. 高出力ファイバレーザ用の励起半導体チップに要求される特性は, 10 W 以上の定格光出力とともに, 60% 以上の高い WPE と, コストの大半を占める主要構成部品として高い歩留まりで製造できる量産性である. ファイバレーザ励起用 MM-LD の半導体ウエハは, n-GaAs 基板上にクラッド層・導波路層として AlGaAs 層を, 活性層として InGaAs 量子井戸層を有機金属気相成長法によりエピタキシャル成長させて製造している. この材料系では, 一般に, レーザ出射端面での COD (Catastrophic Optical Damage) と呼ばれる端面溶融による故障モードが信頼性を支配しているため, 高出力・高効率化に特化しながら, 信頼性を担保することが必要である. また, ファイバレーザ励起用途では, 高い放熱性や結合効率が要求されるため, チップオンサブマウント (COS : Chip on Sub-mount) や複数のチップ出力を空間結合して光ファイバ出力させる励起 LD モジュール (LDM : Laser Diode Module) への実装に対しても多くの配慮を設計に加えている.

半導体レーザにより励起されるファイバレーザは輝度・波長変換装置として動作している. LD から出射されたマルチモードレーザ光は, Yb ドープされたアクティブファイバ (YDF : Ytterbium doped Fiber) に吸収され, ファイバグレーティングにより形成された共振器を通じて 1070 nm 帯のシングルモードレーザ光に変換される. 励起が行われる YDF の吸収波長帯は 915 nm 帯および 976 nm 帯の二つの帯域があり, それぞれ, コスト面と効率面とで長短がある. ファイバレーザ発振器ではシステムとして 40% 程度の WPE が要求されており, 高 WPE と低コストの両立は重要な課題である. 976 nm 励起は量子効率で優位性があるが, 吸収帯域が狭いため何らかの波長制御が必要になる. 当社は, 吸収帯域が広い 915 nm 帯を励起 LD の発振波長とし半導体チップ自体の WPE を改善することでシステム全体の WPE の改善を進めてきた. 半導体チップの WPE は, $WPE = \text{光出力} / (\text{動作電圧} \times \text{動作電流})$ で与えられる. 当

社の MM-LD は、種々の光出力と動作電圧のトレードオフの関係を考慮して最適な設計を適用し、現在、第 2 世代の MM-LD および LDM 製品に移行している。たとえば、共振器長を長くすれば、電極の面積が増加するためコンタクト抵抗は小さくなるが、微分効率が低下するため光出力が低下し、同一口径ウエハからの収率も悪化する。また、一般に移動度が小さく電気抵抗の高い p 型層抵抗を小さくするため、正孔濃度を高濃度ドーピングにより増加すると、光吸収が大きくなり、内部損失が増加して光出力が低下するというトレードオフがある。第 2 世代では、これらのトレードオフを考慮しつつ、第 1 世代と比較して、MM-LD 共振器の最適設計による光出力の増加、電気抵抗の徹底的な低減による動作電圧の低減技術などを適用しながら、製造面でも高く安定な歩留まりを維持する等、最終的な製品のコストを考慮した設計を採用している。これらの設計は、高度なシミュレーション技術と製造技術に支えられている。

単一 LD からの光出力を増加させるためには発光層のストライプ幅を広げれば良いが、LDM に取り付けられるマルチモードファイバ (MMF: Multi-Mode Fiber) のコア/クラッド径は通常は一定であるため、単純にストライプ幅を広げると結合効率の低下や NA (Numerical Aperture) の増加が生じる。そこで、当社の LDM は、汎用的に用いられるクラッド径 125 μm 、NA0.22 の MMF の技術をベースに、第 1 世代の 60 W 級から、次のような工夫を施し、第 2 世代では 120 W 級の定格光出力を実現している⁸⁾。第 2 世代における光出力の増加には、LDM に搭載する COS 数の増加とともに、COS に実装されている MM-LD の定格出力も増加させている。また、LDM の高 WPE を維持するため、空間合波のみで MMF に結合させるとともに、低い NA を維持する光学設計を適用することで、極めて優れた特性を有している。Fig. 1 は高密度実装を実現する第 2 世代 LDM である。

2.2 ファイバレーザ発振器

Fig. 2 は 1 kW 出力シングルモードファイバレーザ発振器の光学構成である。YDF は共振器を構成するファイバブラッググレーティング (HR: High Reflector, OC: Output Coupler) に接続されさらに励起光を YDF のクラッドに導

入するためのファイバ溶融型の光部品である TFB (Tapered Fiber Bundle) に融着接続されている。Fig. 2 の左下の図は TFB の外径 250 μm の断面形状で、励起光の入力ポートは 18 本あり前述の励起 LDM のクラッド径 125 μm の出力ファイバが接続される。Fig. 2 の右上の図の通り YDF のクラッド形状は星形となっているが、これはクラッドに導入される励起光がコアを通過しないいわゆるスキュー光線を排除するため、コア吸収の効率を高める事に貢献している。星形ファイバの平均クラッド径は 250 μm で TFB のテーパ溶融延伸後の径と同じになっており、融着接続することで丸型外形のファイバとほぼ損失なく接続されている。

またファイバレーザのビーム品質を決める YDF のコアのモードフィールド径は 14 μm となっており Fig. 3 に示す 300×300×17 mm の実装筐体に収納した状態で完全なシングルモード動作する設計となっている。これはファイバの設計製造段階で LP01 以外の高次の伝搬モードを完全に抑圧しているため、出力側に接続されるフィードファイバも含めて原理的に LP11 以上の高次のモードは一切伝搬することができず、kW 超のシングルモードファイバ発振器では他社には見られない最も大きな特徴となっている。

この完全シングルモードを実現するために Yb ファイバのみならず出力側のフィードファイバ、デリバリーファイバも含めてその設計および製造には大きな努力が払われている。トレードオフ要因として高出力化や高反射材料の加工時の阻害要因である誘導ラマン散乱 (SRS) の抑圧や、長期信頼性に影響し出力の低下をもたらす YDF のフォトダークニング現象の排除等製品の均一性の観点も含めて量産技術が確立できている。数 kW の光出力を数 10 m 伝

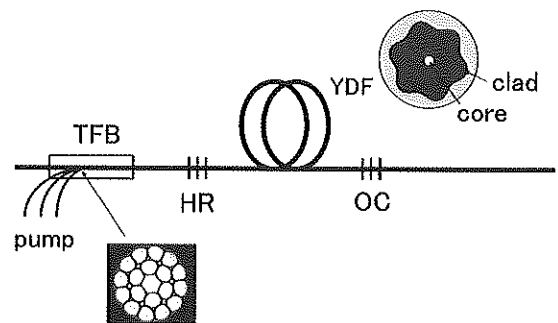


Fig. 2 1 kW laser cavity optical configuration.

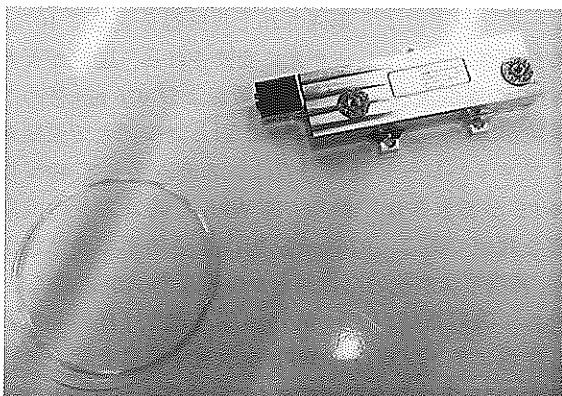


Fig. 1 2nd generation laser diode module.

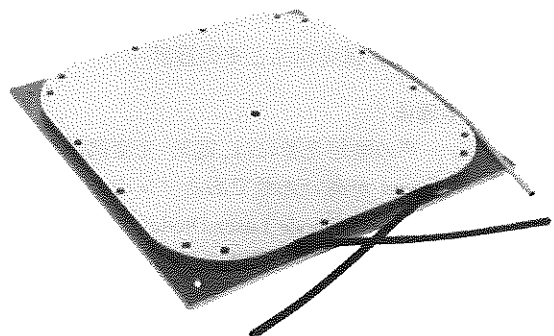


Fig. 3 Laser cavity package.

送させる究極の技術を支えているのは、100 mW 程度の光信号を数千 km 伝送させる超長距離の海底ケーブル用の光ファイバ技術で、シミュレーションをベースにした光導波路の設計手法、さらに製造技術等共通点も非常に多くほぼ同じチームが開発を進めている。

Fig. 4 は励起光源も含めていくつかの状態監視モニターも実装した 1.5 kW 出力のシングルモードファイバレーザユニットで、出力光の BPP は 0.34 mm·mrad, M² 換算では測定上の誤差、再現性を考慮しても常に 1.05 程度に測定される。

2.3 ビームコンバイナ

ビームコンバイナは TFB と同様にファイバ熔融延伸で複数のシングルモードファイバレーザからの出力光を一本のマルチモードファイバに合波する構造の光受動部品で、当社ではこれまで 4×1, 6×1, 18×1 の構造 (別途モニターポートとして 1 心確保) を設計、製作してきている。出力側には NA = 0.22 マルチモードファイバが接続され 50 μm, 80 μm, 100 μm のコア径が標準のサイズになっている。6x1 構造のコンバイナを 50 μm の出力の構造で製作した場合の BPP は典型値で 1.6 mm·mrad, M² 換算で 4.7 であった。また 18×1 構造のコンバイナは出力ファイバのコア径が 100 μm で BPP の典型値は 3.3 mm·mrad, M² に換算すると 9.68 程度であった。

NA = 0.22 でコア径 100 μm のファイバを全励振した場合の出力光の BPP は 11 mm·mrad (M² = 32.5) 程度であり、それに比較すると 1/3 以下の値となりマルチモードファイバの低モード側だけが励振され高いビーム品質が維持されていることがわかる。これはコンバイナへの入射光がすべて完全なシングルモード光で構成されているため、出力光のビームモードは非常に安定しておりデリバリーファイバを動かしたり振動させたりしてもまったく変動することがない。

3. 10 kW システムとその加工特性

3.1 10 kW ファイバレーザ発振器

前述の 18×1 構成のコンバイナを使用し、11 台の 1 kW 出力のシングルモードファイバレーザを合波させることで 10 kW 出力のファイバレーザを構成した。Fig. 5 は光出力特性で制御信号に対してリニア動作する。

Fig. 6 に光スペクトラム波形を示す。レーザの中心波長は 1070 nm で、13.16 THz の周波数シフト、すなわち 1123

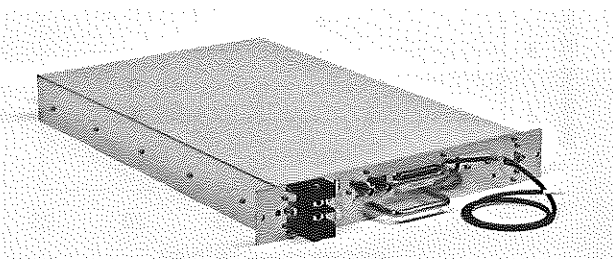


Fig. 4 1.5 kW output fiber laser engine.

nm 付近に発生する SRS が十分抑圧されていることがわかる。当社では独自の光ファイバ融着技術をフィールド適用する事でフィールドファイバとデリバリーファイバを同径コアで提供しており、10 kW のファイバレーザ発振器の出力光の BPP はレーザコンバイナの典型値と同じ 3.3 mm·mrad となり、ユーザ加工点における高いビーム品質をサポートしている。

3.2 加工事例

BPP の小さい高いビーム品質のレーザ光は、加工光学系で形成されるレーザ光集光点で高いパワー密度を維持することに貢献し、溶接加工では深い溶け込み深さを実現することが可能である。Fig. 7 は出力 1 kW の 14 μm モードフィールド径のシングルモードファイバレーザのステンレス (SUS304)、アルミ合金 (A5052) および純銅 (C1100) に対するビードオンプレートの溶け込み深さのビーム移動速度依存性の測定結果である。溶接速度 1 m/min の低速領域では、ステンレスは約 5 mm, アルミ合金は約 3.2 mm, 純銅は約 1.2 mm の溶け込み深さを実現している。Fig. 8 は同様の 1 kW の出力でコア径 50 μm のマルチモードファイバレーザによる同等の評価結果で、速度 1 m/min の低速領域においては、ステンレスは約 4 mm, アルミ合金が約 2.6 mm, 純銅が約 1 mm 程度の溶け込み深さとなっており、同じレーザパワーでも 20 ~ 30% 程度、ビーム品質が高いレーザの方が溶け込み深さが深くなっている。

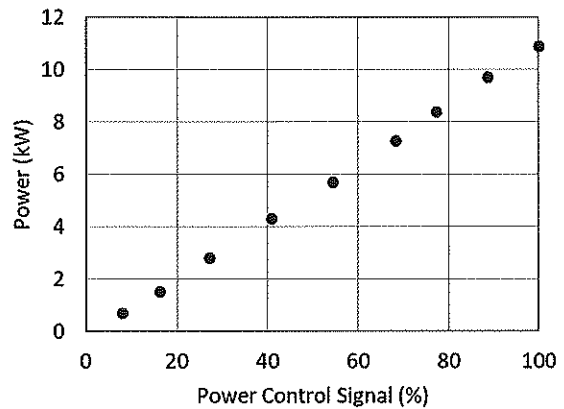


Fig. 5 10 kW output characteristics.

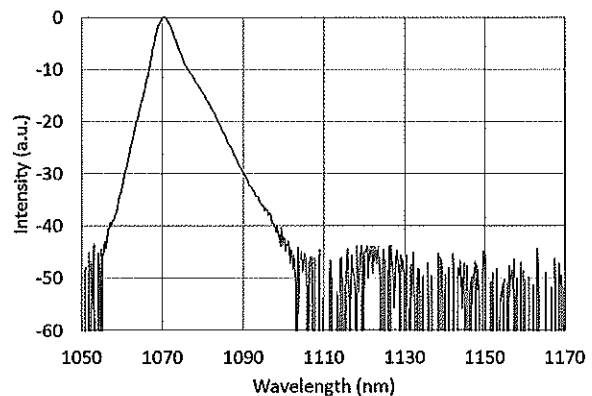


Fig. 6 Output spectrum at 10 kW output.

Fig. 9 は出力 6 kW のマルチモードファイバレーザのステンレス (SUS304), アルミ合金 (A5052) および純銅 (C1100) に対するビードオンプレート (BOA) の溶け込み深さのビーム移動速度依存性の測定結果である。溶接速度 1 m/min の低速領域では, ステンレスは約 11 mm, アルミ合金は約 9 mm, 純銅は約 6 mm の溶け込み深さを實現している。溶接速度 10 m/min の高速領域においては, ステンレスおよびアルミ合金が約 6 mm, 純銅が 4 mm 程度の溶け込み深さが得られている。

Fig. 10 は 10 kW 出力時のマルチモードファイバレーザのステンレス (SUS304), アルミ合金 (A5052) の溶け込みの断面観察写真で, 非常にアスペクト比の高い深い溶け込みが實現できている事がわかる。溶接速度 1 m/min の低速領域では, ステンレス, アルミ合金共には約 16 mm の溶け込み深さであった。溶接速度 10 m/min の高速領域においては, ステンレスが約 8 mm, アルミ合金が約 10 mm 程度の溶け込み深さであった。Fig. 11 に溶け込み深さのビーム速度依存性を示す。10 kW を超える出力では溶け込み深

さが 15 mm 以上の領域になり焦点位置の設定次第で溶け込み深さ自体も多少変化し, またその観察も容易にできるようになってくるが, 今回の集光位置はワーク表面とした。さらに高出力領域で, より高いビーム品質のレーザを扱う場合, 加工光学系の熱レンズ効果についても十分な配慮が必要であり, 当社としてもレーザ性能に合致した光学ヘッドの開発も並行して進めている。

一方で, 高ビーム品質から得られる高パワー密度は, 溶接における溶け込み深さおよび溶接速度に貢献できるが, すべての加工において良好な結果になるとは限らない。通常の 1 点に絞られたレーザ光が加工対象に照射されるとキーホールが形成される。キーホール内部では急激な温度変化と激しい湯流れが引き起こされ, スパッタやブローホール等の溶接欠陥が発生する。結果として, 各種検査やスパッタ除去工程の導入が必要になり, ファイバレーザを使用した多くの生産工程において, これら溶接欠陥の発生が課題となっていた。この課題を解決するため, 当社はレーザ光の強度分布を精密に制御可能なファイバレーザ用ビームモード制御技術を開発した。この技術は, 加工光学系の集光レンズ前のコリメートビーム内に挿入するだけで構成でき, 非常に単純でかつ着脱も可能であるため, ガルバノ

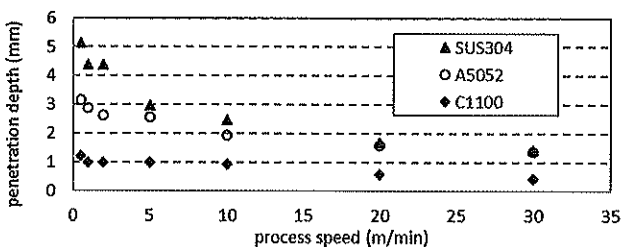


Fig. 7 Penetration depth using 1 kW single mode fiber laser.

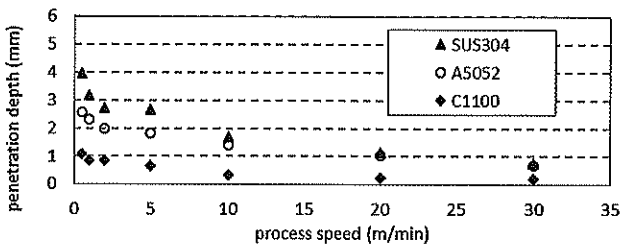


Fig. 8 Penetration depth using 1 kW 50 μm multimode fiber laser.

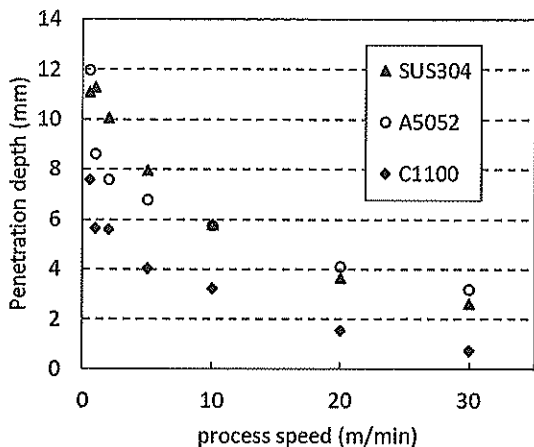


Fig. 9 Penetration depth at 6 kW.

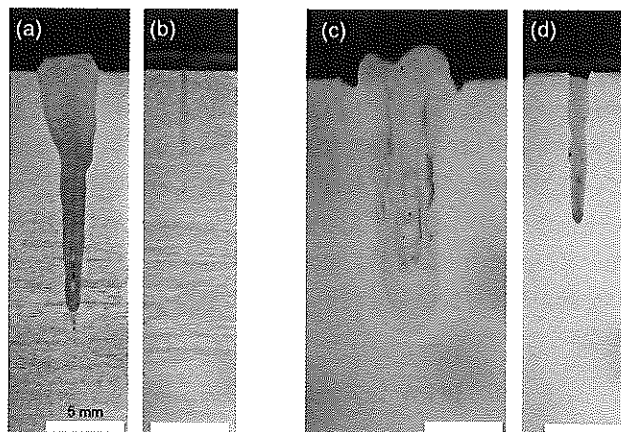


Fig. 10 Penetration at 10 kW. SUS304 (a) 1 m/min, (b) 10 m/min. A5052 (c) 1 m/min, (d) 10 m/min.

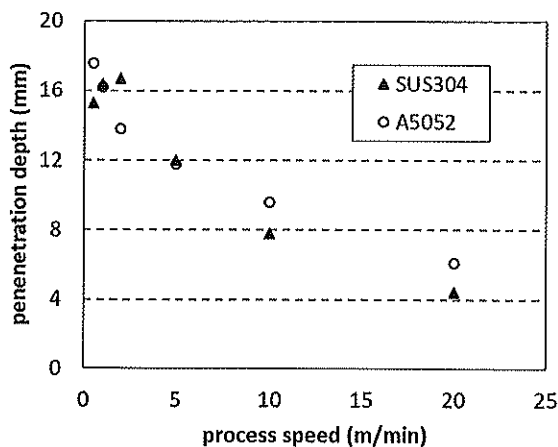


Fig. 11 Penetration depth at 10 kW.

スキャナ等も含めたごく一般的なレーザ加工ヘッドに容易に組み込むことができる。

Fig. 12 にビームモード制御例を示す。(a) はビームモード制御前の形状で、(b)、(c) のように、レーザ光の配置やエネルギー分配比率を自由に設計できるため、材料種、溶接・切断等の加工種類および加工条件等に合わせた最適なビームモードを形成可能である。またこのビームモード制御光学系は原理的に十分なパワー耐性があることがわかっており、スパッタやブローホールが大量に発生する 10 kW 超ファイバレーザを用いた加工においても適用が可能である事がすでに確認されている。

Fig. 13 の写真は 3 kW のレーザを使ったステンレス板 (10 mm 厚) のビードオンプレートの実験の様子で、(a) はビームモード制御なし、(b) はビームモード制御を行ったものである。Fig. 14 にそれぞれの溶接ビード外観をそれぞれ示す。(a) はビームモード制御を行わない場合で、多くのスパッタの発生が見られた。一方で、(b) はビームモード制御を使用した際の加工外観で、劇的にスパッタ発生が抑制されている。溶接ビードの外観においても、従来の集光スポットを用いた溶接ではスパッタの付着とビードの不安

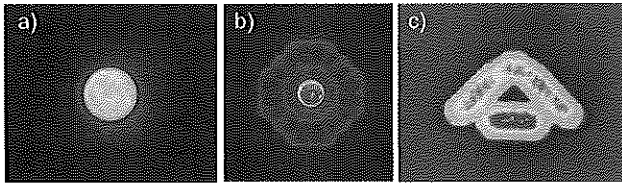


Fig. 12 Beam mode control example. (a) Original, (b) center + ring, (c) Custom beam shape

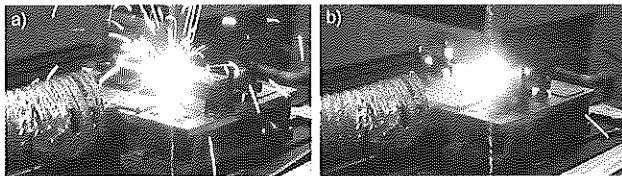


Fig. 13 Beam mode control process at SUS304 using 3 kW laser. (a) Original, (b) with beam mode control

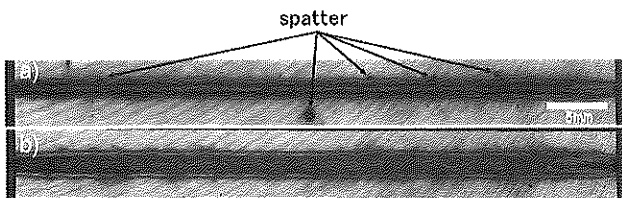


Fig. 14 Beam mode control process at SUS304 using 3 kW laser. (a) Original, (b) with beam mode control

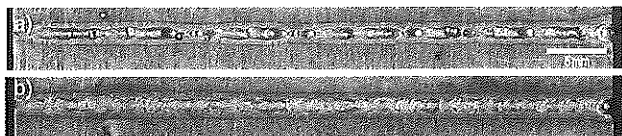


Fig. 15 Welding bead sample on C1100 pure copper using 6 kW laser. (a) Original, (b) with beam mode control

定さが見られる。ビームモード制御を適用した場合には、スパッタの付着が少なく、ビード形状が安定する結果が得られた。

Fig. 15 は同様に 6 kW のレーザによるビームモード制御を 10 mm 厚の純銅板に適用した時のビードオンプレートのビード外観である。純銅はファイバレーザの波長 1070 nm では 95% の反射率があり、非常に加工が難しい材料であることが知られているが、ビームモード制御によりステンレスと同等の良好なビードを形成することができた。この純銅溶接ではステンレスの加工の際とは異なる当社ファイバレーザの高パワー密度を活かしたカスタム形状のビームモードを使用している。

Fig. 16 に厚さ 2 mm の 6000 系アルミ合金重ね溶接ビード外観と断面観察結果を示す。6000 系アルミは通常の集光スポットを用いた場合、溶接部内部にブローホールが発生しやすいという課題があった。10 kW マルチモードファイバレーザとビームモード技術を用いて溶接条件を最適化することで溶接欠陥を大幅に削減することが可能となった。

4. 結 論

当社ではファイバレーザの特徴を最大限生かすべく、単なる出力の向上だけに留まらず、同時に高いビーム品質を維持したファイバレーザの開発を進めてきた。その特徴はビームモード制御に大きな優位性をもたらし、比類ないレーザ性能により従来不可能だった金属材料加工が数多く実現してきている。ビームモード制御をさらに拡張しアーク溶接等の他の溶接技術とのハイブリッド加工でもいろいろ効果があることがわかってきており、その組み合わせは無限度で適用範囲はどんどん広がっている。当社としてはこの特徴をさらに拡張するべく、プロセスのモニターやフィードバック手法等も取り入れながら、ファイバレーザ加工システムとしてのソリューションを提案していく所存である。

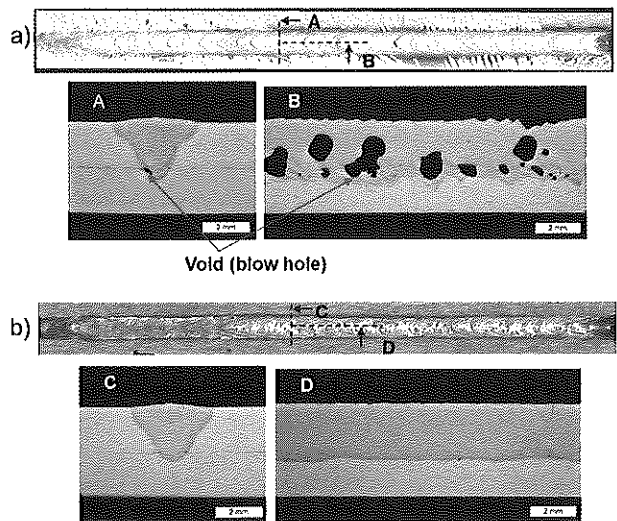


Fig. 16 6000 Aluminum alloy lap welding using 10 kW laser. (a) Original, (b) with beam mode control

参考文献

- 1) Shcherbakov1, E. A., Fomin1, V. V., Abramov1, A. A., Ferin1, A. A., Mochalov1, D. V., Gapontsev, V. P.,: Industrial grade 100 kW power CW fiber laser, Proc. ASSL2013 Ath4A.2 (2013).
- 2) Fujisaki, A.: Kilowatt-Level, High Power CW Fiber Lasers, The Review of Laser Engineering Vol.38 No.11 (2011).
- 3) Fujisaki, A.: Single Mode Fiber Laser and Their Process Applications, Journal of JLPS 19-1 (2012).
- 4) Miyato, T., Kayahara, T., Fujisaki, A., Furukawa, K., Matsushita, M., Muramatsu, M., Harada, Y., Niino, H.: High power single-mode fiber laser and its application to metal and non-metal materials SPIE 8963-3I (2014).
- 5) Miyato, T., Fujisaki, A., Furukawa, K., Matsushita, M., Harada, Y., Niino, N.: CFRP Cutting with High Power Fiber Laser, Proc. ALPS15-4 (2015).
- 6) Kashiwagi, K., Adachi, A., Kajiwara, K., Kayahara, T., Nishigata, N., Fujisaki, A.: Development of Kilowatt-Level QCW Fiber Laser, Journal of JLPS 23-1 (2016).
- 7) Nishigata, Y., Kashiwagi, K., Adachi, A., Takagi, T.: Development of Multi-mode High Power Fiber Laser Journal of JLPS 23-3 (2016).
- 8) Ishige, Y., Kaji, E., Katayama, E., Ohki, Y., Gajdatsy, G., Cserteg, A.: 120 W, NA_0.15 fiber coupled LD module with 125- μ m lad/NA 0.22 fiber by spatial coupling method, Proc. SPIE I0514 (2018).

著者紹介



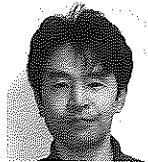
茅原 崇
KAYAHARA Takashi
1980年生。2004年近畿大学理工学部電気工学科卒。2006年大阪大学工学研究科生産科学専攻修了。同年古河電気工業株式会社入社。主としてレーザ加工技術およびモニタリング技術の開発に従事。レーザ学会会員



梅野和行
UMENO Kazuyuki
1983年生。豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 博士(工学), 2010年古河電気工業株式会社入社, AlGaIn系パワーデバイス, AlGaAs系半導体レーザおよびファイバレーザ発振器の開発に従事。第26回(2009年春季)応用物理学学会講演奨励賞受賞。応用物理学学会会員。



高木 武史
TAKAGI Takeshi
1977年生。2001年東京大学工学部電子工学科卒。同年古河電気工業株式会社入社。主として光空間結合モジュール, SHGレーザ, ファイバレーザの研究開発, 製品化に従事。



江森芳博
EMORI Yoshihiro
1970年生。東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻修了, 博士(工学), 1997年4月から現在まで古河電気工業株式会社に在籍, ファイバレーザ用光部品の研究開発に従事。



藤崎 晃
FUJISAKI Akira
1964年生, 1987年早稲田大学理工学部電気工学科, 2015年東北大学工学部工学研究科通信工学専攻終了, 博士(工学), 1987年より古河電気工業株式会社, 光ケーブル, 光通信工用機器, エルビウム光ファイバ増幅器, 高出力ファイバレーザ等の研究開発, 事業部に従事, 1990年第53回篠原記念学術奨励賞, 電子情報通信学会, レーザ学会