

高出力連続波ファイバレーザ

光電子技術研究所 島 研 介¹・北 林 和 大²・島 田 典 昭²・谷 川 庄 二³
田 中 弘 範²・大 道 浩 児⁴
オプトエナジー株式会社 藤 本 毅⁵

High-Power Continuous Wave Fiber Laser

K. Shima, T. Kitabayashi, N. Shimada, S. Tanigawa, H. Tanaka, K. Omichi, and T. Fujimoto

ファイバレーザには、イッテルビウム添加ダブルクラッドファイバやフォトダークニング抑圧ファイバなどの特殊ファイバ技術、高出力励起用半導体レーザ技術、ファイバ・ブラッグ・グレーティングや励起コンバイナといった光ファイバ部品技術などの当社グループの光技術が十二分に利用されている。これらの技術をいかし連続波ファイバレーザの高出力化を進め、300 W 空冷単一モードファイバレーザおよび 2 kW 水冷マルチモードファイバレーザを実現した。

A 300-W air-cooled single-mode fiber laser and a 2-kW water-cooled multimode fiber laser are achieved through our optical technologies such as specialty fiber technologies in ytterbium-doped double-clad fibers, photo-darkening eliminated fibers, and so on.; high-power pumping diode laser technologies; and fiber-optic components technologies in fiber Bragg gratings, pump combiners, laser output combiners, and so on.

1. ま え が き

ファイバレーザとは、光ファイバに添加した活性元素を半導体レーザで励起しレーザ光を発生する固体レーザの一種である。その要素技術として、特殊ファイバ、ファイバ型光部品およびファイバ接続技術など従来からの当社の得意とする光ファイバ技術に加え、当社グループ内における半導体レーザ技術が応用される製品であり、当社グループとの技術親和性が非常に高い。

今やファイバレーザの市場は全世界で 500 億円を超えるまでに成長しており、中でも材料加工分野での応用が最も多く今後も発展が予想されている。本分野における技術発展の一つの大きな方向性は高出力化であり、当社もファイバレーザ高出力化に向けた開発を進めてきた。レーザには大別して、パルスレーザと連続波レーザがある。パルスファイバレーザとは、瞬時パワーの高い光を間欠的に出射するレーザであり、ファイバレーザではマーキング、微細な溶接・切断および微細な表面加工に主に応用されている。一方、連続波レーザは、連続的あるいは低速変調の光を出射するレーザであり、ファイバレーザでは比較的厚みのあるワークの溶接や切断に

用されている。当社はパルスファイバレーザ装置の開発・製品化も行ってきたが、本稿では高出力連続波ファイバレーザ装置について紹介する。

本稿では、最初にファイバレーザの構成とその特徴について、特に高出力化の観点から説明する。次にファイバレーザの高出力化に向けた光技術について筆者らの開発を中心に述べ、最後に、これらの光技術を適用して開発した 300 W 級の単一モードファイバレーザおよびキロワット級マルチモードファイバレーザを紹介する。

2. ファイバレーザの特徴

図 1 に連続波ファイバレーザの基本的な構成を示す。ファイバレーザは、従来の固体レーザと同様、エネルギーを供給する励起光源、励起光源からの光エネルギーをレーザ波長に変換する光増幅媒体、発生したレーザ波長

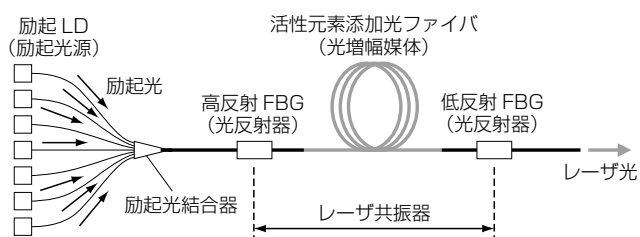


図 1 連続波ファイバレーザの基本構成
Fig. 1. Basic configuration of a CW fiber laser.

1 光技術研究部次長
2 光技術研究部
3 光ファイバ技術研究部
4 応用電子技術研究部
5 生産技術本部長

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
ファイバレーザ	Fiber laser	光ファイバが光増幅媒体であるレーザ発振器。
励起	Excitation, Pumping	量子力学で、原子や分子が外からエネルギーを与えられ、もとのエネルギーの低い安定した状態からエネルギーの高い状態へと移ること。
Yb (イッテルビウム)	Ytterbium	原子番号70の元素。希土類元素の1つ。用途としてはガラスの着色剤、固体レーザの添加物などに利用される。
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信号を反射するようにした部品。
M ² 値	M squared value	ビーム品質を表す数値。回折限界光の場合、M ² =1である。ビームの発散角とビームウエスト径の両方に比例する。M ² 値が小さいほどビーム品質が良い。

の光を光増幅媒体内で往復させながら共鳴させレーザ光とする光反射器を有している。励起光源には半導体レーザ(以下励起LD)が、増幅媒体には活性元素が添加されたガラス製の光ファイバが、共振器を構成する反射器としてファイバ・ブラッグ・グレーティング(FBG: Fiber Bragg Grating)が使用される点が従来のレーザと異なる特徴である。

上記の構成上の特徴に起因して、他のレーザに比べて、(1)高出力化が容易なこと、(2)エネルギー変換効率が高いこと、(3)出射ビームの品質が高いこと、(4)信頼性が高いことなどがファイバレーザの性能上の特徴である。

一般に固体レーザはその高出力化とともに、増幅媒体の発熱が増加しその温度上昇が一つの高出力化の制約となる。一方、光ファイバはその太さが百~数百μmと非常に細く、増幅媒体の体積に対する表面積が固体レーザの増幅媒体に比べて大きい。このファイバの比表面積の大きさが増幅媒体を効率よく冷却するのに非常に有効であり、ファイバレーザの高出力化を容易にしている。例えば、他のレーザでは水冷が必要な数百ワット級のレー

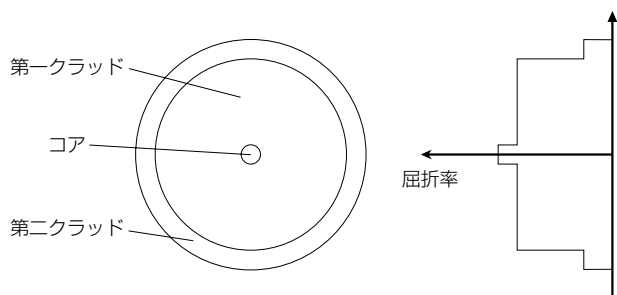


図2 ダブルクラッドファイバの屈折率構造
Fig. 2. Refractive index profile of a double clad fiber.

ザにおいても冷却ファンによる空冷で安定して動作させることが可能である。

ファイバレーザの高出力化に大きく貢献している特殊ファイバ技術としてダブルクラッドファイバ(DCF: Double Clad Fiber)がある¹⁾。DCFとは、図2に示したように第一クラッド層にも光が導波するように設計された光ファイバのことである。構造的には、コアの部分で最も屈折率が高く、それを取り巻く第一クラッドはコアよりも屈折率が低い。さらに、第一クラッド層の外側に第一クラッド層よりも低屈折率の層を有している。

ダブルクラッドファイバレーザ(DCFL: Double Clad Fiber Laser)とは、活性元素がDCFのコアに添加されたファイバを増幅媒体として用いたファイバレーザのことである。図3にDCFによる光増幅を模式的に示す。DCFLの特徴は、DCFのコアに添加した活性元素を励起するために、励起光がその第一クラッドに入射されることである。第一クラッドは当然コアよりも大きな断面積を有している。DCFの第一クラッド部分はその径の大きさから励起光を横マルチモード導波するが、これは励起光源として高出力化が可能な横マルチモードの励起LDが使用可能であることを意味しており、ファイバレーザ

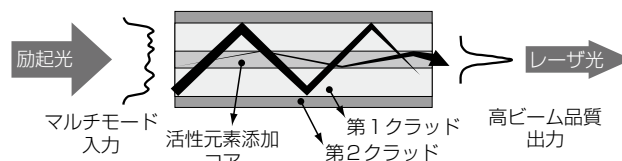


図3 増幅用ダブルクラッドファイバ中での光増幅の概念図

Fig. 3. Schematic explanation of optical amplification in an amplifying double clad fiber.

の高出力化を容易にしている。

光ファイバは曲げて使用できることから、光ファイバを光増幅媒体とするファイバレーザでは、限られたスペースにおいても長い増幅媒体を収納することが可能である。増幅媒体を長くでき、さらに光ファイバは励起光を閉じ込めて導波させられることから、効率よく活性物質に励起光を吸収させることができる。また、製造技術の進歩から光ファイバは非常に光損失の小さい光透過媒体でもある。これらのことから光増幅率を高くすることが可能となり、レーザの高効率化が可能となっている。また、ファイバレーザは半導体励起の固体レーザの一種であり、励起効率の高い波長の励起光のみを用いることができるため、放電励起させるガスレーザやフラッシュランプで励起させる固体レーザに比べ、増幅媒体中の活性物質を効率よく励起することが可能である。特に、活性物質としてイッテルビウム (Yb) を用いた場合、励起光の波長 (0.9 μm 帯) とレーザ発振させる波長 (1.0 μm 帯) の差が小さいという特徴がある。これはすなわち、励起光の光子エネルギーとレーザ発振光の光子エネルギーの差が小さく、励起光からレーザ光への波長変換に伴うエネルギー損失が小さいことを意味している。これらのことから、ファイバレーザは非常に高効率なレーザ光源となる。

ファイバレーザの増幅媒体である光ファイバにおいて、活性元素はコアと呼ばれる直径が数~数十 μm の導光部に添加されており、そこにおいてレーザ発振が生じるようにできている。したがって、発振するレーザ光の横モードは自動的に光ファイバのコアを導光可能な横モードのみに限定される。これにより、ファイバレーザからの出射ビームのビーム品質は本質的に良好なものとなる。もし光ファイバが単一横モードファイバであった場合、ファイバレーザにおいて発振されるレーザ光も単一横モードとなり、回折限界に近いビーム品質を有したレーザビームを得ることが可能である。

共振器を構成する反射器に用いられるFBGは、光ファイバのコア部に周期的な屈折率変化を与え、光ファイバ中を導波する光を回折させることができるファイバ型の光部品である。与える屈折率変化の周期や方向を適切に選択することにより、意図した特定の波長の光のみをそのまま反射することが可能である。また与える屈折率変化の大きさを調整することで、100%反射する高反射の反射器とすることも、レーザ光の取り出し側に用いる部分反射する反射器とすることも可能である。FBGは光ファイバの内部に形成された反射器であるため、従来の固体レーザのようにミラーが汚染される危険性はなく非常に安定して動作する。また、ファイバレーザは、FBG以外もその光学部品のすべてをファイバ型部品で構成することが可能である。光ファイバ同士の接続は融着が可能であるため、振動や衝撃、温度変化等によって、光学軸がずれることがなく、レーザ共振器は半永久的に安定である。また、励起に使用している励起LDの長寿命化の

技術の進展とあいまって、ファイバレーザは非常に信頼性の高いレーザ光源となっている。

以上で述べた構成や構造により、ファイバレーザは、高出力、高効率、良好なビーム品質、高信頼という特徴を本質的に備えている。特に活性元素としてイッテルビウム (Yb) を用いたファイバレーザにおいては、エネルギー変換効率が非常に高く、電気から光への変換効率が30%以上の高出力連続波単一モードファイバレーザ発振器がすでに様々な産業分野で応用がはじまっている。

3. ファイバレーザ高出力化技術

以下に、当社のファイバレーザの高出力化に関わる主要な技術についていくつか紹介する。

3.1 特殊ファイバ技術

当社のファイバレーザ用特殊ファイバ技術のひとつである、フォトダークニング抑制ファイバを紹介する。フォトダークニングとは、光照射に起因して光学媒質の透明性が失われる現象をいう。Yb添加ファイバレーザにおいて問題となるフォトダークニングは、Yb添加ファイバ (YbDF) に高強度の励起光を入射することにより生じるものである。YbDFのフォトダークニングによる損失のピーク波長は、Yb添加ファイバレーザの励起波長やレーザの発振波長よりも短波にあるが、その損失スペクトルは励起波長やレーザ発振波長まで裾をひくため、ファイバレーザの特性に影響を与える。ファイバレーザの高出力化には高強度の励起光が必要となるため、フォトダークニングの抑制はファイバレーザの出力劣化を防ぐために必須である。

フォトダークニングのメカニズムについては諸説あるが、光ファイバ中でのYbイオンのクラスタ化が関係していると言われて²⁾。これに従えば、フォトダークニングを抑制するためには、光ファイバ中のYbイオンのクラスタ化を抑える効果のある元素を共添加するのが良いと考えられる。この効果があるとされる元素として

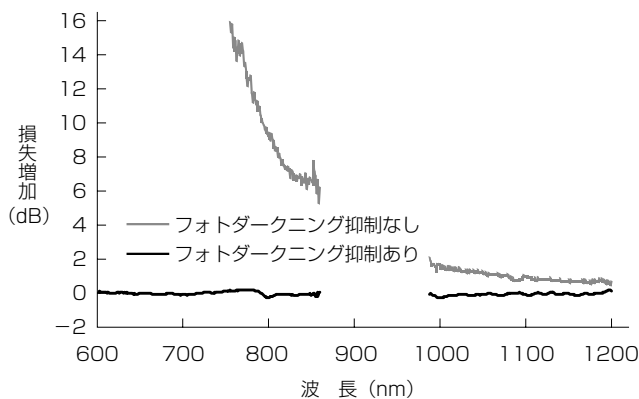


図4 アルミニウム-リン共添加YbDFにおけるフォトダークニング抑制

Fig. 4. Suppression of photodarkening by an Al-P codoped YbDF.

リンやアルミニウムなどいくつかが提案^{3), 4)}されている。当社のファイバレーザに用いられているYbDFには、リンとアルミニウムが共添加されている。図4に、規定長YbDFのコアに直接励起光を一定時間入射した後の損失増加量に関して、リンやアルミニウムを共添加していないYbDFと、両者を共添加しているYbDFの損失増加スペクトルを比較したものを示す。共添加していないYbDFでは、著しく損失増加が生じフォトダークニングが発生していることがわかるが、共添加しているものはフォトダークニングの発生がないことがわかる。フォトダークニングが抑制されたYbDFを使用することにより、当社のファイバレーザは長期にわたりフォトダークニングによる出力低下なしに動作することが可能となっている。

3.2 励起用高出力半導体レーザ

Yb添加ファイバレーザ励起用に用いられる半導体レーザ(LD)としては、波長900nm帯で発光ストライプ幅100 μm 程度に形成された、マルチモードのシングルエミッタ型LDが多用されている。シングルエミッタとは、ひとつのLD素子(チップ)上に発光ストライプが1本のみ形成されているものをいう。シングルエミッタ型のLDは、複数ストライプを有したマルチエミッタ型LDに比べ高信頼とされ、利用可能な出力も、最近の10年ほどで、1W程度から10Wを超えるまで向上し、高出力化も進んでいる⁵⁾。

図5は、弊社のグループ会社であるオプトエナジー社の励起用LDの出力特性である。独自技術⁶⁾により端面に生じる回復できないダメージの回避と高効率化を図ることによって15W出力での利用を可能にしている。

当社の高出力連続波ファイバレーザには、このオプトエナジー社製LDを搭載しており、同社の高出力LD技術は当社の高出力かつ高信頼のファイバレーザシステムを支える大きな柱となっている。

3.3 励起光結合器

数百ワットやキロワットを出力するファイバレーザを

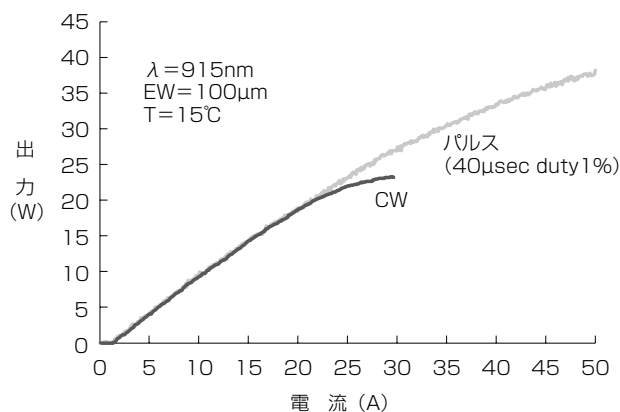


図5 オプトエナジー社製励起LDの出力特性

Fig. 5. Laser output performance of a pumping LD made by Optoenergy.

実現するためには、複数の励起LDからの光を束ねてYb添加光ファイバに入射する必要が生じる。このときに用いられる光部品が励起光結合器である。励起光結合器は片側に複数の励起光入力ポートと反対側に1本の励起光出力ポートを有した形状となっている。複数の励起光入力束ねるために、一般に、入力ポートと出力ポートの間は入力ポートから出力ポートに向かって光ファイバ径が縮小する構造をとっている。また、出力ポート側は、ダブルクラッド構造となっており、コアの部分をファイバレーザで発振させたレーザ光が通り、クラッド部分に励起光が通るようにできている。

図6は当社が開発した励起光結合器の構成である。励起LDを接続する7つの励起ポートを有する前段コンバイナとその出力それぞれを6つの励起ポートで受けYb添加コアファイバに結合する後段コンバイナの2段構成となっており、最大で42台の励起LDモジュールを接続することが可能である。後段コンバイナの中心にはフィードスルーと呼ばれるコア部分をレーザ光が通る構造のファイバを配置している。後段コンバイナにおいては光ファイバの径の縮小は行われず、光ファイバ径の縮小は前段コンバイナにおいて行われる。この構造の利点は、レーザ光が通るフィードスルー経路には光ファイバのコア径変動がなく、レーザ光の損失が小さいことである。レーザ共振器のレーザ光出力側は通過するレーザ光の強度も大きいので、損失の大きな光部品の配置は避けなければならないが、この励起光結合器はレーザ光損失が低いので、共振器の出力側にも配置することが可能である。また、Yb添加ファイバの前方からも後方からも励起光を導入することが可能であるため、より多くの励起光導入ができ、ファイバレーザの高出力化に有効である。さらに、励起光の損失も主に光ファイバの径を縮小することにより生じるが、この構造の励起光結合器の場合、その損失光により生じる発熱部位を複数箇所に分散でき、過剰な発熱による結合器の損傷を回避できるといった利点も有している。

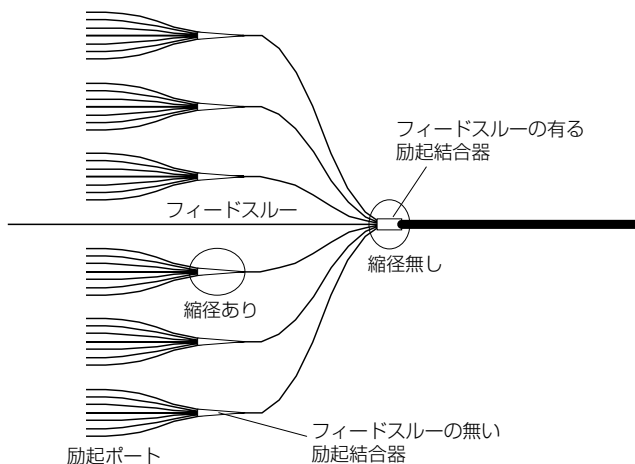


図6 開発した励起光結合器の構成

Fig. 6. Configuration of the developed pump combiner.



図7 空冷連続波単一モード300W出力ファイバレーザの外観

Fig. 7. Appearance of the developed CW 300 W single mode fiber laser.

4. 高出力連続波ファイバレーザ装置

4. 1 300 W出力単一モードファイバレーザ

図7は、3項で述べた高出力化技術を利用して当社が開発した300W出力のファイバレーザ装置の外観である。冷却効率が良いというファイバレーザの特徴を活かし、各部冷却を空冷で行うことが可能である。サイズも幅430mm×高さ222mm×奥行668mmと、同出力の他の固体レーザやガスレーザに比べて非常にコンパクトにできている。

このファイバレーザは、波長915nmの励起LDを用いたダブルクラッドファイバレーザで、Yb添加ファイバの前方および後方から励起を行っている。双方向から励起していることから、励起LDの搭載数に冗長性をもたせることが可能で、高い信頼性が得られる。

また、レーザ光の経路はすべて単一横モード構造を有したファイバとなっている。そのため図8にビーム形状を示したように、出力光のビーム品質も回折限界に近いものが得られ、 M^2 値は1.1程度が得られている。ここで M^2 値とはビームを集光した際の、ビーム最小径とビーム発散角の両方に比例する量で、回折限界光の場合の値は1.0である。また、高速の電流制御が可能なLD駆動回路の採用により、50kHzでのオン・オフ動作が可能である。このビーム品質の良好さおよび制御性から、ステンレス鋼をはじめとする金属薄板の溶接のみならず、精密穴あけや精密切断などに応用されている。

4. 2 キロワット級マルチモードファイバレーザ

ファイバレーザの本質的な特徴として、レーザ光をファイバ伝送可能であることが挙げられる。複数のファイバレーザからの出力を合成して高出力のレーザ光を得ようとした場合、光ファイバはその直径が100 μm ～数百 μm であることから、複雑な光学系を構成することなしに、ファイバレーザの出力端光ファイバを束ねることで、小さなコア面積から大出力のレーザ光を出射できる。例えば、最密にファイバを束ねた場合、光ファイバの直径の3倍の円からファイバレーザ7台分のレーザ光を出射できる。また、出力コンバイナと呼ばれる励起

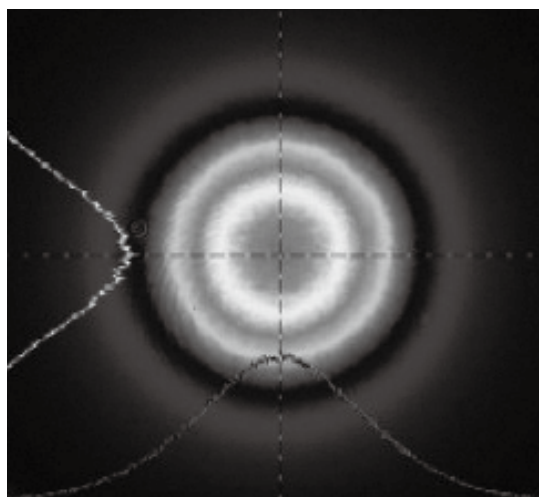


図8 300Wファイバレーザの出力ビーム形状
Fig. 8. Beam profile from the developed 300 W fiber laser.



図9 試作したキロワット級ファイバレーザの外観
Fig. 9. Appearance of a trial sample of a kilo-watt CW fiber laser.

光結合器の前段コンバイナと類似のデバイスを用いて光ファイバ径の縮小を行えば、より細かいコアの光ファイバにレーザ光を集光することも可能となる。また、このようなデバイスは、レーザ光を光ファイバの中に閉じ込めたまま光の合波ができるため、光軸のずれが生じず、非常に信頼性の高い高出力レーザを実現することが可能である。

図9は、筆者らの試作したキロワット級ファイバレーザの外観である。この試作機においては、5台の水冷

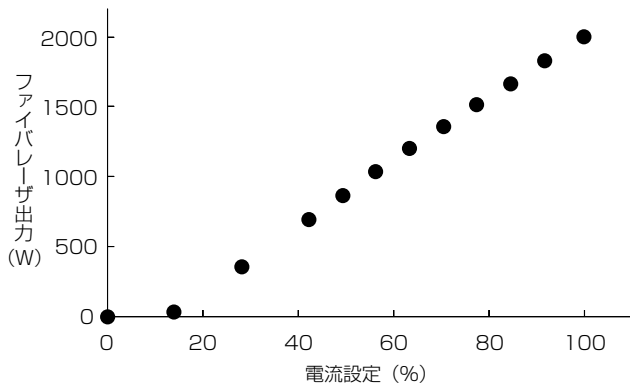


図 10 キロワット出力連続波ファイバレーザの出力特性
Fig. 10. Experimental result of the output property of a kilo-watt CW fiber laser.

400 W 級単一モードファイバレーザからの出力を出力コンバイナによりコア直径 105 μm 、開口数が 0.22 の光ファイバに結合している。

図 10 にキロワット級ファイバレーザ試作機の出力特性を示す。このときの出力コンバイナにおける光の透過率は 95%以上であり、2 kW の出力が得られた。

5. む す び

高出力連続波ファイバレーザは、Yb 添加ダブルクラッドファイバやフォトダークニング抑圧ファイバなどの特殊ファイバ技術、高出力励起用半導体レーザ技術、FBG、励起光結合器、出力光結合器といったファイバ型光部品技術など当社グループの光技術を結集した製品といえるだろう。これまで、空冷 300 W 単一モードファイバレーザ、および 400 W 超の水冷単一モードファイバレーザの出力合成により 2 kW マルチモードファイバレーザを実現した。今後もさらなるファイバレーザの高出力化を推進し産業の発展に寄与していく。

なお、本論文で紹介した励起光結合器は、独立行政法人新エネルギー産業技術開発機構 (NEDO) の委託事業にて開発されたものである。

参 考 文 献

- 1) E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B.C. McColum: "Double clad offset core Nd fiber laser", Technical Digest of Optical Fiber Sensors Conf., paper PD5, 1988
- 2) A.D. Guzman Chavez, A.V. Kir'yanov, Yu.O. Barmenkov, and N.N. Il'ichev: "Reversible photo-darkening and resonant photobleaching of Ytterbium-doped silica fiber at in-core 977-nm and 543-nm irradiation", Laser Phys. Lett., 4-10, p.734, 2007
- 3) T. Kitabayashi, M. Ikeda, M. Nakai, T. Sakai, K. Himeno, and T. Ohashi: "Population inversion factor dependence of photodarkening of Yb-doped fibers and its suppression by highly aluminum doping", Technical Digest of Optical Fiber Communication Conf. and National Fiber Optic Engineers Conf., paper OthC5, 2005
- 4) A.V. Shubin, M.V. Yashkov, M.A. Melkumov, S.A. Smirnow, I.A. Bufetov, and E.M. Dianov: "Photodarkening of aluminosilicate and phosphosilicate Yb-doped Fibers", Conf. Digest of Conf. on Laser and Electro-Optics -European Quantum Electronics Conf., paper CJ3-1-THU, 2007
- 5) 藤本 毅, 山形友二, 山田由美, 齊藤 剛: 「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, S7, 2011
- 6) T. Fujimoto, Yumi Yamada, Yoshikazu Yamada, A. Okubo, Y. Oeda, and K. Muro: "High power InGaAs/AlGaAs laser diodes with decoupled confinement heterostructure," In-Plane Semiconductors III, Proc. SPIE 3628, p.38, 1999