

10 kW 級レーザダイオード励起 Nd:YAG レーザ

10 kW Diode-Pumped Nd:YAG Laser

秋山 靖裕 湯浅 広士

AKIYAMA Yasuhiro

YUASA Hiroshi

当社は、1997年度から5か年計画で経済産業省“フォトン計測・加工技術”プロジェクトに参画し、鉄鋼やアルミニウム材の高速・高品質溶接を実現する高出力・高効率のレーザダイオード(LD)励起Nd:YAGレーザ^(注1)を開発した。このプロジェクトで当社は、光線追跡シミュレーション技術や熱解析技術を活用し、高効率の励起モジュールを開発、多段の共振器構成を採用して、LD励起Nd:YAGレーザで世界最高出力の12kWを、効率23%で達成した。このプロジェクトの成果は、芝浦メカトロニクス(株)に技術移管され、既に4.5kW機までの製品化が完了している。

In the Advanced Photon Processing and Measurement Technologies Project, Toshiba has been developing a laser diode (LD)-pumped Nd:YAG laser with an output power of more than 10 kW as a tool for high-speed and highly precise material welding. The LD pumping module is constructed by arranging several LDs around the laser rod, while the resonator head is configured by arranging several LD pumping modules in a series to achieve an average output power of 10 kW.

Toshiba has succeeded in obtaining an output power of 12 kW with an efficiency of 23%, which are, to our knowledge, the highest values for an Nd:YAG laser. The Technology has been transferred to Shibaura Mechatronics Corp., which has started to supply the LD-pumped Nd:YAG laser system with an output power of 4.5 kW.

1 まえがき

近年、LDの高出力化が急速に進み、LD励起による高出力Nd:YAGレーザの研究開発が活発に行われている。LD励起方式は、すべて固体素子で構成されるため、従来のランプ励起方式に比べ、装置の小型・軽量化が可能である。更に、レーザ媒質内部に発生する熱を大幅に低減できるため、高変換効率・高品質ビームが得られる。また、堅ろうでかつ長寿命のLDを用いた完全固体化レーザであるため、メンテナンスが容易である。これらの特長を生かして、機械材料や構造体の溶接、切断、穴あけなどの加工技術に必要なkWクラスのLD励起Nd:YAGレーザの開発が望まれていた。

このような背景から、97年度から、通商産業省(現：経済産業省)産業科学技術研究開発制度に基づく“フォトン計測・加工技術”プロジェクトがスタートした。このプロジェクトにおいて、当社はロッド型YAG結晶により平均出力10kW以上、効率20%以上の高出力LD励起Nd:YAGレーザを開発している。プロジェクトの開発状況とプロジェクトの成果を基にした製品化の状況を以下に述べる。

(注1) Nd(ネオジウム)を含むイットリウム-アルミニウム-ガーネット結晶を用いたレーザ。

2 LD励起ロッド型Nd:YAGレーザ

ここでは、LD励起方式の特色と、マルチロッド方式によるNd:YAGレーザの高出力化の手法を説明する。

2.1 LD励起による高効率化

LD励起方式は、従来のランプ励起方式と比較してエネルギー変換効率を約1けた大きくできる技術である。一般にランプの発光スペクトルは、Nd:YAG結晶の吸収スペクトルに比べて広く、励起に寄与しないむだな成分が多い。一方、LDの発光スペクトルは、Nd:YAG吸収スペクトルより狭く、LD光パワーを効率よくNd:YAGに投入できる。LD励起Nd:YAGレーザの発振効率の内訳を図1に示す。発振効率は、LD光源効率、LDからNd:YAGロッドへの移行効率、ロッドへの吸収効率、レーザ上準位への移行効率、励起領域と共振器とのビーム重なり効率、及び共振器からの取出し効率の積で与えられる。それぞれの効率は、図1に示した値の範囲と考えられ、エネルギー変換効率は、14%から30%と推定される。通常のランプ励起方式での変換効率がたかだか2%から3%であるので、約1けた大きい値となっている。

2.2 マルチロッド方式による高出力化

次に、ロッド型レーザによりkW以上のレーザ出力を取り出す方法について述べる。レーザロッドを用いたレーザ共振器の基本構成を図2に示す。レーザロッド1本を用いた1

段ヘッド構成では、レーザロッドと2枚のレーザミラーまでの距離を等しくすると、安定共振器が構成できる。1段ヘッド構成の共振器で得られた特性を維持したまま高出力化する手法としては、励起モジュールを直列に多段接続する多段共振器がある。この場合、ロッドとロッドの間隔をロッドとミラーの間隔の2倍に設定すればよい。これにより、効率を維持したまま、高出力化できることがわかっている。また、レーザヘッド数が、3～4段以上の多段共振器では、発振器部と増幅器部から成るMOPA(Master Oscillator Power Amplifier)方式を採用するのが一般的である。これは、レーザ光強度がレーザ媒質の飽和光強度より高くなり、増幅により十分な

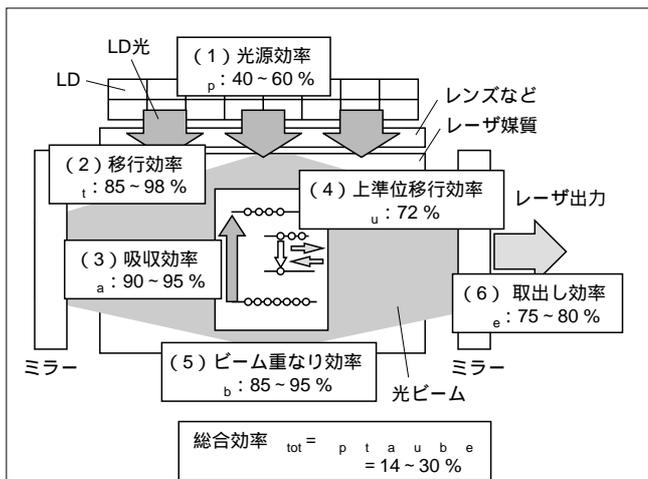


図1 . LD 励起 Nd:YAG レーザの変換効率 - LD 励起 Nd:YAG レーザの変換効率の内訳を示す。従来のランプ励起に比べ、LD 励起では約10倍効率が向上する。

Conversion efficiency of LD-pumped Nd:YAG laser

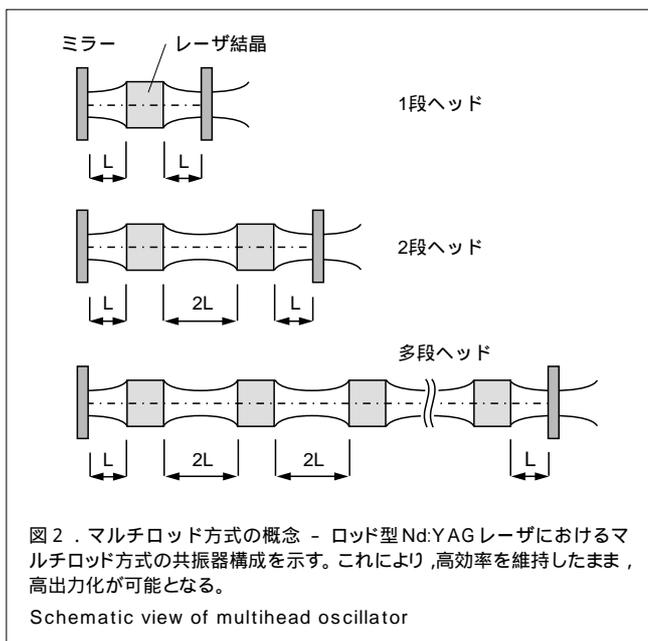


図2 . マルチロッド方式の概念 - ロッド型 Nd:YAG レーザにおけるマルチロッド方式の共振器構成を示す。これにより、高効率を維持したまま、高出力化が可能となる。

Schematic view of multihead oscillator

エネルギーを取り出せるためである。

3 プロジェクトにおけるロッド型レーザの研究開発

当社は、フォトン計測・加工技術プロジェクトに参画、平均出力10 kW、発振効率20%、レーザヘッド体積0.05 m³以下のロッド型レーザを開発している。開発期間は97年度からの5か年間で、97年度は1 kW級レーザ装置を開発し、平均出力1.8 kW、効率13%を達成した⁽¹⁾⁽²⁾。98～99年度は、中出力機として3 kW級レーザ装置を開発した。始めに、基本励起モジュールを高出力・高効率化して、平均出力2 kW、効率22%を達成し、更に3段共振器構成で、平均出力5.4 kW、効率22%を達成した⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。2000～2001年度は、最終評価機として10 kW級レーザ装置の開発に着手し、6段共振器構成で、平均出力12 kW、効率23%を達成した⁽⁶⁾。以下に、高出力・高効率LD励起モジュールの開発、及び多段化による高出力化について述べる。

3.1 高出力・高効率LD励起モジュール

99年度に開発された励起モジュールの断面図を図3に示す。ロッドの周りにフローチューブ、コリメート用レンズ、LDスタックアレイの順に配置されている。LDスタックアレイはロッドの周囲3方向に配置する構成とした。この励起モジュールでは、レーザロッドに対してLD出力光をP偏光(入射面と平行な偏光成分)で入射する構成とし、ロッド表面での反射損失を低減した。また、LD出力光コリメート用に単レンズを用いてコリメートレンズでの損失を従来の10%以上から2%以下に抑制した。

LDスタックアレイは、幅10 mmのLDバーを複数個スタックしたものである。98年度までは、出力20 WのLDバーを

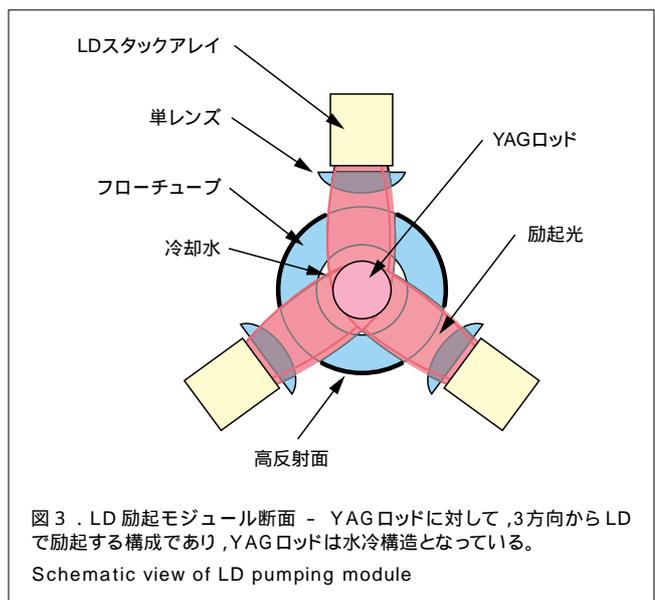
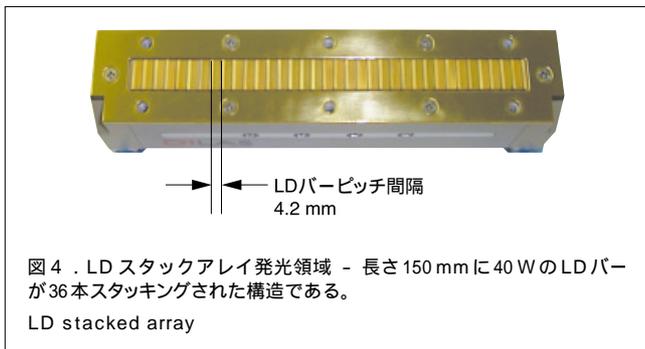


図3 . LD 励起モジュール断面 - YAGロッドに対して、3方向からLDで励起する構成であり、YAGロッドは水冷構造となっている。

Schematic view of LD pumping module

用いていた。その最大発光効率は、連続出力タイプで40%、パルスタイプで35%程度と低かった。そこで、99年度からは、最大発光効率45%が可能な出力40WのLDバーにより構成されるLDスタックアレイを採用した。しかし、標準的な連続タイプのLDスタックアレイは、スタック間隔が1.7mmで、LD出力光のパワー密度は約240W/cm²となり、Nd:YAGロッドの熱破壊限界を超えてしまう。そこで、LDスタックアレイのスタック間隔を調整し、レーザロッドの破壊限界以下となるようにLD発光密度を調整した。連続タイプLDスタックアレイを図4に示す。連続タイプでは、LDスタック数が36個でLDバーのスタック間隔は4.2mmに設定した。



3.2 励起モジュール発振試験

励起モジュール単体で入出力特性を取得した。レーザロッドの長さは203mm、共振器長は230mm、入出力ミラーはともに平面ミラーで構成した。出力鏡反射率は70%、Nd濃度は0.6%、冷却水温度は20℃である。発振実験は、連続動作、パルス動作について行った。連続動作では、電気入力9kWのときに平均出力2kWが得られ、このときの効率は22%であった。パルス動作では、LDをパルス幅400μs、繰返し625Hz、デューティ比25%で用いた。電気入力8kWのときに平均出力2kW、ピークパワー8kWが得られた。このときの効率は26%であった。

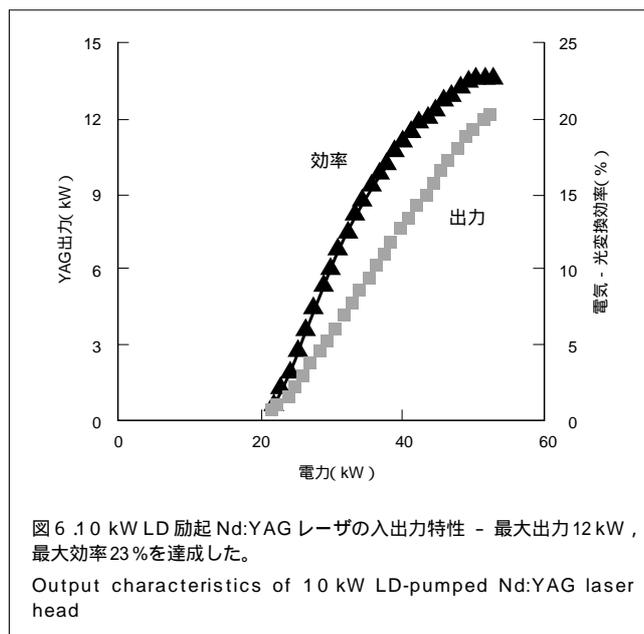
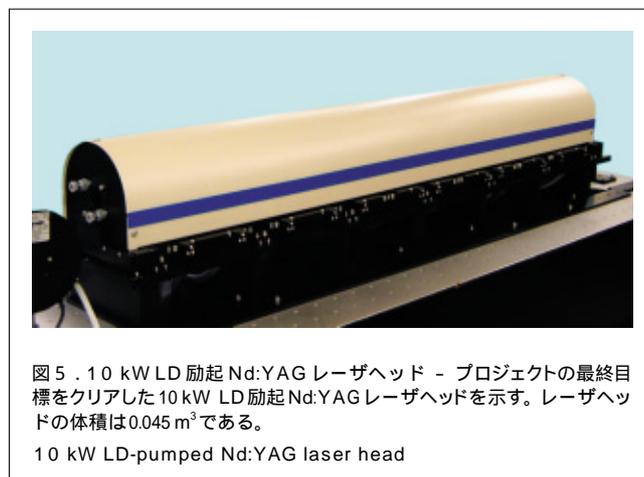
3.3 多段発振試験

99年度は、連続動作の励起モジュール3個を用いた多段共振器構成で、平均出力5.4kWを効率22%で達成した。また、2000年度には、連続動作の励起モジュール3個とパルス動作の励起モジュール1個による混合動作により平均出力7.2kWを達成した。以上の結果から、励起モジュール1個当たりの抽出能力は1.8kW以上であることがわかった。したがって、10kW以上を達成するためには、励起モジュール6個が必要なることがわかった。ここで課題となるのは、共振器構成である。レーザ共振器の最適な出力鏡の透過率 T_{opt} は、次式によって示される。

$$T_{opt} = (\sqrt{2g_0 \ell / L} - 1) \ell \quad (1)$$

g_0 は小信号利得係数、 ℓ は利得長、 L は共振器内の損失を表す。レーザヘッド段数が増加すると利得長積 $g_0 \ell$ と共振器内損失 L は線形に増加するため、最適な出力鏡透過率は大きくなり、100%を超えた場合は、レーザ共振器を構成できない。これまでに得られたレーザヘッド段数とそれぞれの段数での最適な出力鏡透過率から類推すると10kW以上が得られる6段発振器構成での出力鏡の透過率は90%となる。そこで、励起モジュール6段の発振器構成を用いて、レーザ発振試験を行った。

6段共振器構成の外観を図5に、入出力特性を図6に示す。出力鏡反射率は15%、共振器長は1,380mmである。電気入力52.7kWの際に、レーザ出力12kWが得られた。そのときの効率は23%であった。また、このときのレーザヘッド体積は0.045m³で、これによりプロジェクトの最終目標がすべて達成されたことになる。



4 フォトン計測・加工技術プロジェクト成果の製品

フォトン計測・加工技術プロジェクトで得られた成果を基に、芝浦メカトロニクス(株)において、通商産業省の99年度産業技術研究開発成果実用化技術開発費助成金を得て、製品化を実施した。ここではその概要を述べる。

4.1 製品概要

芝浦メカトロニクス(株)では、従来からランプ励起によるkW級Nd:YAGレーザ加工装置を製造販売してきたが、2kWクラスになると電源・冷却機が大掛かりになるため、主に原子力分野など重工業産業分野に限られていた。今回、エネルギー利用効率を格段に向上させた高出力LD励起Nd:YAGレーザ加工装置を製品化し、自動車産業を中心とする幅広い産業分野への導入を目指している。

製品ラインアップを表1に示す。また、LD励起Nd:YAGレーザ(LAL-240)を図7に示す。今回のプロジェクトで開発された励起モジュール構造を適用して、コア径0.3mmファイバ伝送の場合でも、最大効率15%を実現した。また、製品ラインアップとして、効率重視のヘッド1段で750Wのレーザ出力をコア径0.6mmの光ファイバから得られるAタイプと、ビーム品質重視のヘッド1段で500Wのレーザ出力をコア径0.3mmの光ファイバから得られるBタイプとをそろえた。これらのモジュールを複数個直列接続して、高効率のAタイプの場合コア径0.6mmの光ファイバで4.5kW、高輝度のBタイプの場合コア径0.3mmファイバで2kWのレーザ出力が加工点で得られる。

また、LDは半導体素子のためランプに比べて寿命が長く、メンテナンス頻度も激減する。製品では特にLDの劣化に伴う励起光の減少やLDのドライブ電流の増加を考慮した長寿命化設計を採用して、最大定格出力で連続運転時のLD推定寿命は2万時間以上となっている。

標準の製品ラインアップは、表1の計7機種(レーザ出力は



図7 .LD励起YAGレーザ製品(LAL240A) - 芝浦メカトロニクス(株)から製品化された。
LD-pumped Nd:YAG laser product (LAL240A)

光ファイバ出口での値)であるが、ヘッド段数を増やして更に高出力の製品構成も可能である。

4.2 溶接加工例

従来のランプ励起レーザでは、コア径0.6mm光ファイバ伝送が一般的であった。しかしこの製品では、LD励起による高ビーム品質化によりコア径0.3mm光ファイバでの伝送が可能である。細径ファイバ伝送の利点は、以下の点が挙げられる。

- (1) 焦点深度が大きく取れるため、高アスペクト比の溶接が可能となる。
- (2) 光学系が小型になり、操作性が向上する。
- (3) 作動距離を大きく取れるため、スパッタによる汚染を軽減できる。
- (4) 加工点でのスポット径を小さくできるため、高速切断・溶接で、熱ひずみの少ない加工が実現できる。

厚さ6mmのステンレススチールSUS304を用いて、ファイバコア径を変えたときの溶込み深さを、ビードオンプレート試験で調べた結果を図8に示す。加工点出力は600Wで一定とした。光ファイバはすべてステップインデックス型で、コア径0.3, 0.4, 0.6mmで試験をした。加工レンズは倍率0.75倍(作動距離100mm)で、加工点での集光径はそれぞれ0.22, 0.30, 0.45mmとなる。パージガスとしては窒素を用いた。コア径の細いファイバを用いたほうが、速度15~90mm/sの範囲で深い溶込みが得られている。また、溶込み深さ0.9mmとなる速度はコア径0.6mmファイバでの15mm/sに対し、コア径0.3mmファイバでは90mm/sとなっており、6倍の高速化が実現できた。

また、加工点出力2kWの場合のビードオン溶接部断面を図9に示す。このときのファイバコア径は0.3mm、加工レンズ倍率2倍、材料はSUS304である。溶接速度0.1m/minの

表1 . 高出力LD励起Nd:YAGレーザ製品ラインアップ
High-power LD-pumped Nd:YAG laser product lineup

型名	LAL-210A/B	LAL-220A/B	LAL-240A/B	LAL-260A
定格出力(ファイバ出力)(kW)	0.75/0.5	1.5/1.0	3.0/2.0	4.5
出力安定度 (%)	±2以下			
光ファイバ(コア径)(mm)	0.6 / 0.3			
LD期待寿命 (h)	約20,000			
電源 (V)	三相AC200 ± 10%			
消費電力 (kW)	7.0/6.3	14.0/12.5	28/25	42
冷却水	水冷チラー方式: 70 l/min(32℃) 水水熱交換式: 47 l/min(22℃)	水冷チラー方式: 110 l/min(32℃) 水水熱交換式: 約100 l/min(22℃)	188 l/min(32℃)	約160 l/min(30℃)
外形寸法(幅×奥行×高さ)(mm)	1,850 × 750 × 1,650	2,550 × 750 × 1,410	3,400 × 750 × 1,410	

LAL-210とLAL-220は冷却器込み、LAL-240とLAL-260は冷却器抜き装置寸法。

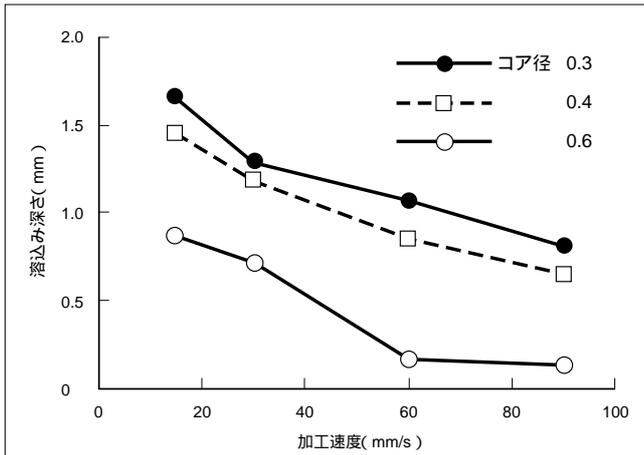


図8. 加工速度と溶込み深さの関係 - 光ファイバのコア径をパラメータとしてレーザー溶接の溶込み深さと溶接速度の関係を調べた結果を示す。細径ファイバのほうが、溶込みが深くなる。
Penetration depth as function of welding speed

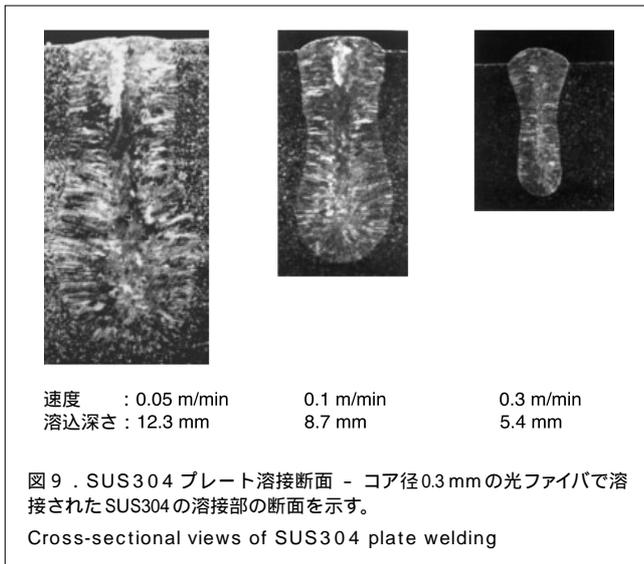


図9. SUS304 プレート溶接断面 - コア径0.3 mmの光ファイバで溶接されたSUS304の溶接部の断面を示す。
Cross-sectional views of SUS304 plate welding

ときに溶接深さ8.7 mmが得られた。

5 あとがき

経済産業省の産業技術基盤研究開発プロジェクト“ フォトン計測・加工技術 ”に参画し、高出力LD励起Nd:YAGレー

ザを開発、Nd:YAG レーザとしては世界最高の平均出力12 kW、効率23%をレーザヘッド体積0.045 m³で達成した。これらの結果により、プロジェクトの最終目標をすべてクリアした。

更に、プロジェクトで得られた成果を基に、芝浦メカトロニクス(株)で製品化を進めた。今後更に、様々な加工用途を目的としたLD励起Nd:YAGレーザの製品化を進めていく。

謝辞

この研究開発は、経済産業省の産業科学技術研究開発制度に基づく“ フォトン計測・加工技術 ”の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けた(財)製造科学技術センター・フォトンセンターからの再委託業務として実施したものである。関係各位に深く感謝します。

文献

- (1) TAKADA, A., et al. "Diode laser-pumped cw Nd:YAG lasers with more than 1-kW output power". OSA Trends in Optics and Photonics. 26, Advanced Solid-State Lasers, Optical Society of America. Washington, DC, 1999, p.21 - 23.
- (2) AKIYAMA, Y., et al. "Efficient 1.8-kW diode-pumped cw Nd:YAG rod laser". Technical Digest of International Conference on Lasers and Electro-Optics. Baltimore, 1999-05, IEEE-LEOS, OSA, 1999, p.31.
- (3) AKIYAMA, A., et al. "Efficient 2-kW diode-pumped cw Nd:YAG single rod laser". OSA Trends in Optics and Photonics. 34, Advanced Solid-State Lasers, Optical Society of America, Washington, DC, 2000, p.48 - 51.
- (4) 湯浅広士,ほか. レーザダイオード励起Nd:YAGレーザ. 東芝レビュー. 55, 4, 2000, p.21 - 24.
- (5) TAKADA, A., et al. "High-efficient operation of diode-pumped high-power Nd:YAG rod laser". in High-Power Laser Ablation III, Proceedings of SPIE. 4065, 2000, p.782 - 789.
- (6) AKIYAMA, Y., et al. "Efficient 10 kW diode-pumped Nd:YAG rod laser". LaserOpto. 33, 4, 2001, p.46 - 49.



秋山 靖裕 AKIYAMA Yasuhiro, D.Eng.

生産技術センター 光応用システム技術センター研究主務、工博。固体レーザー発振器及び関連技術の研究・開発に従事。応用物理学会、レーザー学会会員。
Quality Control System Technology Center



湯浅 広士 YUASA Hiroshi

生産技術センター 光応用システム技術センター主任研究員。固体レーザー発振器及び関連技術の研究・開発に従事。レーザー学会会員。
Quality Control System Technology Center