ロッド型高出力10 kW全固体レーザー

湯浅 広士, 秋山 靖裕[†], 高田 弘之[†], 西田 直人

(株)東芝 生産技術センター(〒235-0017 神奈川県横浜市磯子区新磯子町33)

High-Power 10-kW All-Solid-State Rod-Type Laser

Hiroshi YUASA, Yasuhiro AKIYAMA,[†] Hiroyuki TAKADA,[†] and Naoto NISHIDA

Corporate Manufacturing Engineering Center, Toshiba Corporation

33 Shin-isogo-cho, Isogo-ku, Yokohama, Kanagawa 235-0017

(Received May 28, 2003)

Because of their compactness and possibility of attaining high efficiency, laser-diode-pumped Nd:YAG lasers are expected to be applied to laser-based processes such as welding, cutting, drilling and marking. In the "Advanced Photon Processing and Measurement Technologies" project, we have developed and designed a high-power laser-diode-pumped Nd:YAG laser using simulation techniques such as a ray tracing, thermal analysis, and so on. We have successfully obtained a maximum output power of 12 kW with an efficiency of 23%, which to the best of our knowledge are the highest values for an Nd:YAG laser.

Key Words: Laser diode, Nd:YAG, Rod laser, All solid-state laser

1. はじめに

レーザー加工は、材料の非接触加工、局所的加工が可能で、古典的な機械加工に比べて、より自由度が高く、高精度な加工、プロセスが可能のため、製造分野において、重要な加工ツールの一つとしての位置を占めている。特にNd:YAGレーザー(以下単にYAGレーザーと記す)は、レーザー媒質が固体(結晶)で取り扱いが容易であることなどの理由から、その使い勝手の良さのために、一般的に広く利用されている。

近年、レーザー加工によって製造される製品にも、より高い性能が望まれるようになっており、YAGレーザー加工分野においても、これを満足するために、より精密な製造技術が必要となってきた。これに対応するためには、より質の高いレーザー光の発生と共に、材料の特性、加工現象を十分に考慮した高度な加工が必要不可欠である。また、これらの材料特性や加工現象を理解するためには、より高い精度の計測技術も重要な要素技術であり、これらを同時に開発する必要もある。

このような背景のもと、高出力、高品質で高効率、低コストのフォトン(レーザー光)発生技術および、これを用いた高度な加工技術、計測技術を、産官学が連携して開発することを目指して、1997年度から5年間の「フォトン計測・加工技術」プロジェクトが発足した。

我々はこのプロジェクトの中で、フォトン発生技術を担当してきた。この技術テーマは、レーザーダイオード(LD)励起方式を用いて、高出力、高効率、小型の完全固体化レーザー装置を開発するのが目的である。既存のランプ励起方式に比べLD励起方式は、全て固体素子で構成されるため装置の小型化や軽量化が可能である、レーザー媒質内部に発生する熱を大幅に低減することが可能なため高変換効率や高品質ビームを得ることができる、堅牢かつ長寿命のLDを用いた完全固体化レーザーであるためメンテナンスが容易である、などのさまざまな長所を有している。

LDや発光ダイオードを励起源とした固体レーザーの研究は、早く1964年には報告されている¹⁾。1970年代には国内においてもいくつかの研究開発^{2,3)}がなされ、1980年代には盛んに研究開発されるようになった^{4,5)}。

一方、1980年代後半よりLDの高出力化⁶⁾も急速に進み、LD励起方式による高出力YAGレーザーの研究開発が活発に行われるようになった。1997年には、ドイツのSchoneらは、LDによる高密度励起を行い、平均出力750 Wを得ている⁷⁾。また、米国のChangらは、平均出力451 W、第2高調波出力182 Wを達成した⁸⁾。このように、LD励起方式によるYAGレーザー出力の大幅な向上が期待できるようになり、機械材料・構造体などの溶接・切断・穴あけなどの加工技術に必要なkWクラスのLD励起YAG

[†]現在の住所：芝浦メカトロニクス(株)レーザシステム事業部(〒243-0401 神奈川県海老名市東柏ヶ谷5-14-1)

[†]Laser Systems Division, Shibaura Mechatronics Corporation 5-14-1, Higashikashiwaya, Ebina, Kanagawa 243-0401

レーザーの実現が望まれるようになった。

これらの状況のもと、プロジェクトの最終目標は、平均出力10kW以上、発振効率20%以上、レーザーヘッド体積0.05 m³以下のLD励起YAGレーザー装置を開発することに設定された。本稿では、この5年間のプロジェクトにおける開発成果を述べる。

2. 10 kW級LD励起YAGレーザーの開発

2.1 基本性能試験

我々は、プロジェクトの最終目標を達成するためのアプローチとして、共振器内に複数のYAGロッドを直列に配置する構造を採用した。YAGロッドを採用したのは、加工に適した円形対象のレーザービームが得られるからである。また、複数のYAGロッドを直列に配置する構造は、加工に必要な出力に合わせて、使用するYAGロッドの本数を選択することが可能となるため、加工対象に合わせた装置を容易に構成することができるからである。

プロジェクトが開始された1997年度から1998年度前半は、基本性能試験として、LD励起YAGレーザー高出力化のための基礎特性データ取得を行い、励起モジュールを2個直列に配置した共振器で平均出力1.8 kW、効率13%を得た⁹⁾。1998年度後半は、1997年度の結果を基に、効率改善を目的とした励起モジュールの改造を行い、レーザー出力1 kWを効率19.3%で得た。さらに、高出力化の試験として、1997年度に製作した励起モジュール2個と1998年度に製作した励起モジュール2個の合計4個を組み合わせた多段共振器で、YAGレーザー出力3.3 kWを得たが、効率は13.5%であった¹⁰⁾。出力1 kWでは最終目標の効率20%に近い値が得られたが、3.3 kW出力では低い効率であり、高い効率を維持したまま出力を増加させるという課題が残った。

2.2 高効率化

Fig. 1にLD励起YAGレーザーにおける効率を示す。YAGレーザー光の効率は、Figに示したように、6種類の効率の積で表すことができる。LD効率 η_{LD} とは、LDへの電気入力に対するLD光出力の効率である。伝達効率 η_t とは、全LD光のうち、YAGロッドに照射される割合であ

Fig. 1 Energy transfer process in the laser-diode-pumped YAG laser.

り、LDとYAGロッドの相対的な配置や光学系の設計に依存する値である。吸収効率 η_a は、YAGロッドに照射されたLD光がYAGロッドに吸収される割合であり、レーザー遷移効率 η_u は、吸収されたLD光がYAGレーザー光に変換される割合である。吸収効率とレーザー遷移効率は、使用するYAGロッドにドーパされたNdの濃度などによって決定される値であることから、使用する材料に固有の値といえる。オーバーラップ効率 η_b は、YAGロッド中の励起されている領域とレーザー共振器によって定まるYAGレーザービームとの重なり度合いを表すものであり、この重なりが大きいほど、励起領域が有効に活用されることになる。最後のカップリング効率 η_c は、レーザー共振器内で発振したYAGレーザー光を共振器外部に取り出す割合であり、これを適正な値に選定することで、効率良くYAGレーザー光を取り出すことが可能となる。

上述の効率検討でも明らかなように、レーザーシステムの高効率化、小型化を実現するためには、まず、高出力・高効率LDによる固体レーザー媒質の高密度励起が必要である。しかしながら、レーザーとして取り出せない励起エネルギーは、YAGロッド内で熱として発生し、熱応力を生じさせる要因となる。Brown¹¹⁾によると、YAGロッド励起時の熱発生は、レーザー未発振時でLD入力力の30~40%になり、レーザー発振時は10~15%軽減されるとしている。このとき励起分布に偏りがあると、熱応力の分布にも偏りができ、YAGロッドにかかる熱応力の不均衡を招き、結果としてYAGロッドが破壊する場合がある。

LDを高い効率で使用するためには、LDをしきい値から離れた高出力領域で動作させることが必要である。高出力のLDスタックには、LDバーとして20 Wタイプを用いているものと40 Wタイプをもちいているものがある。20 Wタイプの最大発光効率は、連続動作で40%、パルス動作で35%程度である。一方、LDバー毎に冷却するアクティブ冷却方式のLDスタックでは、より高効率動作が可能な40 WタイプのLDバーを用いることが可能であり、40 Wバーを使用すると連続動作、パルス動作ともにLD発光効率45~50%が可能である。そこで励起には、40 Wバーを用いたアクティブ冷却方式のLDスタックを用いることとした。

ここで問題となるのは、レーザーロッドの破壊限界である。レーザーロッドの破壊は、熱歪みにより発生する。この破壊限界は、ロッド中の応力と表面状態によって決定され、励起分布が均一であると仮定し、レーザーロッドの長さ L とすると、破壊限界入熱量 P_a は下式によって表される¹³⁾。

$$\frac{P_a}{L} = 8\pi R \quad (1)$$

ここで、

$$R = \frac{K(1-\nu)}{\alpha E} \sigma_{\max} \quad (2)$$

ここで、 R は熱衝撃パラメータと呼ばれるもので、熱伝導度 K 、ポワソン比 ν 、線膨張係数 α 、ヤング率 E 、最大応力 $\sigma_{\max}$ によって算出される。この熱衝撃パラメータは母材に

よって異なり、ガラスでは1, YAGでは7.9, サファイアでは100である。上記(1)式によれば、YAGロッドの場合、単位長さ(cm)当たりの限界入熱量は、約200 W/cmとなる。また、Koechnerは、経験的に見積もられた限界入熱量は115 W/cmであり、ロッドの表面状態によって異なり3倍程度変化するとしている¹³⁾。そこで、最大定格で動作させた場合でも、励起密度は上記の破壊限界を超えないようにLDスタックを配置した。

さらに、高密度励起を行うためには、YAGロッド内で生ずる熱応力はなるべく均一で、YAGロッドの中心に対して対称であることが望ましい。そこで、これらをトータルに評価するため、我々はシミュレーションによる検討を行った。

まず、励起用のLD光を有効にYAGロッドに入射させるために、光線追跡によるシミュレーションを用いて、Fig. 2に示すような励起方法を採用した¹²⁾。LD光がYAGロッドに対してp偏光で入射するようにLDスタックを配置することで、YAGロッド表面での反射損失を2%程度に抑えている。また各構成要素の相互位置を検討することにより、LD光をYAGロッドに照射するためのレンズの枚数を最小にすることができ、かつ単レンズを使用することで、ここでの損失も2%以下に抑制することができた。

上記検討をもとに、新たに設計した励起モジュールの断面を示したのがFig. 3、外観を示したのがFig. 4である。YAGロッドの周りに冷却水を流すためのフローチューブ、コリメート用単レンズ、LDスタックの順に配置されている。LDスタックは、YAGの吸収スペクトルに合致させるため、20℃において発振波長が808 nm～810 nmとなるものを使用した。LDスタックから出力されたLD励起光は単レンズでコリメートされた後、フローチューブの反射防止コート面を透過し、ロッドに入射する。1パス目で吸収されなかったLD励起光は、対向するフローチューブの高反射コート面で反射し、再びYAGロッドに入射するようになっている。LDスタックは、Figに示すようにYAGロッドの周囲3方向に等配置され、YAGロッドの中の励起分布に偏りが生じないようにしてある。

励起分布に偏りがないかどうかは、有限要素法によるシミュレーションにより確認した。前述の光線追跡によ

Fig. 3 Schematic view of the pumping module.

Fig. 4 Photograph of the pumping module.

り、YAGロッドに照射されるLD光が算出され、このデータからYAGロッド内の励起分布を計算することができる。そして、この励起分布から、有限要素法を適用することで、YAGロッド内の温度分布、熱応力分布、屈折率分布など、レーザー共振器を設計する上で重要な知見が得られる。Fig. 5にシミュレーションの例として、熱応力の計算結果を示す。Fig. 5の結果から、発生する熱応力はYAGロッドに対して中心対称であり、良好な励起分布であることが予想できる。

設計、製作した励起モジュールの性能を検証するために、レーザー発振試験を行った。励起用のLDスタックに連続動作のものを用いて連続出力動作に関する試験を行った。

Fig. 2 Example of a ray tracing.

Fig. 5 Example of a thermal stress distribution.

まず、この励起モジュール1個でのレーザー発振試験を行った。使用したYAGロッドのNd濃度は0.6 %で、直径8 mm、長さは200 mmであった。共振器長は230 mm、共振器ミラーは、ともに平面ミラーで構成し、出力ミラーの反射率は70 %とした。また、冷却水温度は20 °Cであった。このときの入出力特性を示したのがFig. 6である。

電気入力9 kWの時に平均出力2 kWが得られた。このときの光-光変換効率 η_{opt} は48 %、電気-光変換効率 η_{eopt} は22 %であり、励起モジュール単体で20 %以上の効率を得ることができた¹⁴⁾。

2.3 高出力化

高出力化は、前述した励起モジュールをレーザー発振器内に複数個配置して、多段レーザー発振器を構成することで実現している。この多段発振器を概念的に示したのがFig. 7である。

Fig. 7 (a)は、一般的なレーザー発振器であり、両端のミラーで構成されるレーザー共振器内に1個の励起モジュールが配置されている。これに対して、Fig. 7 (b)に示したのが多段レーザー発振器である。各励起モジュール内のYAGロッドは、LDによって励起される際に発生する熱の影響で、レンズのような振る舞いをする。これは、熱レンズ効果と呼ばれており、ロッド型のレーザー結晶を用いた場合に一般的に見られる現象である。多段発振器では、この熱レンズ効果を利用して、共振器内にレンズ導波路を構成している。このような多段レーザー発振器では、対象配置(周期的配置)の共振器において、広

い安定動作範囲を持ち、励起モジュール1個による共振器でのビームパラメータを維持したまま高出力化が可能であることが知られている¹⁵⁾。したがって、各励起モジュールの熱レンズ効果を把握し、これらのバランスを取ることで、対象配置で安定な共振器を構成し、レーザービームを損失無く閉じ込めることができる。これにより、励起モジュール1個を用いた場合に得られるレーザー発振器の効率を保ったまま、出力を向上することが可能となる。

このような方法でFig. 4に示した励起モジュールを6個配置したレーザー共振器による6段レーザー発振器の試験を実施した。20 %以上の効率で10 kW以上の出力を得るために、Fig. 6で得られた特性を維持するように励起モジュールを配置した。したがって、このときの共振器長は1380 mmであり、オーバーラップ効率 η_b は約95 %であった。出力鏡反射率15 %における入出力特性を示したのがFig. 8である。

電気入力の増加に伴ってYAGレーザー出力は直線的に増加しており、電気入力52 kWの時にYAGレーザー出力12 kWが得られた。効率は23 %であり、1個の励起モジュールを用いた場合とほぼ同じ効率であった。これは、損失なく多段共振器が構成できていることを示しており、高効率を維持したままレーザー出力を増加させることができた。このときのレーザービームの品質は約400 mm・mradであり、光ファイバ伝送のためには、コア径1.5 mm程度のもが必要となる。一般的に、出力数kWの加工用YAGレーザーでは、コア径0.6 mm程度の光ファイバが用いられている。今回の結果は、これに比べると、伝送可能な光ファイバの径は太いが、出力は10 kW以上が得られるため、厚板の溶接などには適用可能と考えられる。Fig. 9にこの6段レーザー発振器の外観図を示す¹⁶⁾。このときのレーザーヘッド体積は、0.045 m³であり、本研究のレーザーヘッド体積に対する最終目標である0.05 m³を下回することに成功した。また、10 kW以上の出力と同時に20 %以上の効率が得られたことは、出力および効率に関してもプロジェクトの最終目標をクリアしたといえる。

Fig. 6 Output characteristics of the laser-diode-pumped YAG laser with the pumping module.

Fig. 7 Design of the multi-module resonator.

Fig. 8 Output characteristics of the 10-kW laser-diode-pumped YAG laser.

Fig. 9 Photograph of the 10-kW laser-diode-pumped YAG laser.

4. おわりに

我々は、「フォトン計測・加工プロジェクト」の高出力LD励起YAGレーザー開発において、10 kW以上の出力を発振効率(電気-光変換効率)22%で得ることができた。

今後は、得られた成果を溶接、切断加工などの加工応用に適用することによって、低ランニングコストで小型のkW級レーザー加工装置の実現を目指していく。本プロジェクトの成果により、自動車関連分野や造船、橋梁などの大型構造物、原子力分野などの加工応用にLD励起YAGレーザーが数多く適用されるようになり、レーザー加工市場がさらに大きく成長していくことが期待できる。

謝 辞

本研究開発は、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。

付 録

プロジェクトで得られた成果は、実用化開発に活用され、製品化に結びついている。

製品化した高出力LD励起YAGレーザー装置は、コア径600 μm の光ファイバー伝送に適した装置と、さらに細径のコア径300 μm の光ファイバー伝送にまで適用できる装置の2種類が用意されている。コア径600 μm の光ファイ

Fig. 10 Photograph of the laser-diode-pumped YAG laser product (LAL-240A).

バー伝送用が、1~6段までのヘッド数に応じて、750Wから4.5 kW、コア径300 μm の光ファイバー伝送用が、1~4段で500 Wから2.0 kWまでの出力が得られる。Fig. 10に、出力3 kWの装置(LAL-240A)の外観^{††)}を示す。

参考文献

- 1) R. J. Keyes and T. M. Quist : Appl. Phys. Lett. **4** (1964) 50.
- 2) K. Washio, K. Iwamoto, K. Inoue, I. Hino, S. Matsumoto, and F. Saito : Appl. Phys. Lett. **29** (1976) 720.
- 3) K. Kubodera and K. Otsuka : Appl. Optics **16** (1977) 2747.
- 4) T. J. Kane and R. L. Byer : Opt. Lett. **10** (1985) 65.
- 5) T. Y. Fan, G. J. Dixon, and R. L. Byer : Opt. Lett. **11** (1986) 204.
- 6) M. Sakamoto, G. L. Harnagel, D. F. Welch, C. R. Lennon, W. Streifer, H. Kung, and D. R. Scifres : Opt. Lett. **13** (1988) 378.
- 7) W. Schone, S. Knoke, S. Schirmer, and A. Tunnermann : *Advanced Solid State Lasers, Technical digest, Orland 1997* (OSA, Washington, DC, 1997) p. 241.
- 8) J. Chang, E. Dragon, C. Ebers, I. Bass, and C. Cochran : *Advanced Solid State Lasers, Technical digest, Coeur d'Alene, 1998* (OSA, Washington, DC, 1998) p. 300.
- 9) Y. Akiyama, T. Takase, A. Takada, H. Yuasa, and A. Ono : *Technical digest of Conference on Laser and Electro-Optics, Baltimore 1999* (OSA, Washington, DC, 1999) p. 31.
- 10) A. Takada, Y. Akiyama, T. Takase, S. Yoshida, H. Yuasa, and A. Ono : *Technical digest of International Forum on Advanced High-Power Lasers and Applications, Osaka, 1999* (LSJ, Osaka, 1999) p. 186.
- 11) D. Brown : IEEE J. Quantum. Electron. **QE-34** (1998) 560.
- 12) H. Yuasa : *Technical digest of The 4th Pacific Rim Conference on Laser and Electro-Optics, Chiba, 2001* (IEEE, Piscataway, 2001) p. I-558.
- 13) W. Koechner : in *Solid-State Laser Engineering, 5th Revised and Updated Edition*, (Springer - Verlag, New York, 1999) p.482.
- 14) 湯浅 広士 : レーザー学会学術講演会第20回年次大会予稿集, 20pIV1 (2000).
- 15) J. M. Eggleston : IEEE J. Quantum. Electron. **QE-24** (1988) 1821.
- 16) 湯浅 広士, 高田 弘之, 秋山 靖裕, 中山 通雄, 西田 直人 : レーザー学会学術講演会第22回年次大会予稿集, 20pIV1 (2000).

^{††)} 芝浦メカトロニクス(株)カタログ