

レーザダイオード励起 Nd:YAG レーザ

Laser-Diode Pumped Nd:YAG Lasers

湯浅 広士
YUASA Hiroshi

秋山 靖裕
AKIYAMA Yasuhiro

中山 通雄
NAKAYAMA Michio

レーザダイオード励起 Nd:YAG レーザ^(注1)は、省エネルギーで小型化が可能であり、溶接、切断、マーキングなどのレーザ加工分野への適用が期待されている。

当社では、光線追跡や熱解析シミュレーションを活用し、レーザダイオード励起 Nd:YAG レーザの開発を推進している。重電分野での加工応用をねらった高出力開発では、3 kW 以上のレーザ出力を世界最高の効率 20% で得ることに成功した。また、SHG(Second Harmonic Generation: 第2高調波発生)技術によって、緑色光を発生するレーザダイオード励起 SHG-YAG レーザを製品化し、シリコンなどの非金属加工への微細加工に適用した。

Laser-diode pumped Nd:YAG lasers are expected to be applied to laser processing fields such as welding, cutting, drilling, and marking due to their potential for high efficiency and compactness.

We are designing and developing laser-diode pumped Nd:YAG lasers using numerical analysis simulation techniques such as ray tracing and thermal analysis. We have succeeded in achieving a laser power of more than 3 kW with 20% efficiency, which is the best ever obtained. In addition, we have developed a laser-diode pumped green laser by second harmonic generation, for precision machining on silicon wafers.

1 まえがき

レーザの市場は拡大の一途にあり、特に製造分野における利用は、わが国の“モノづくり”の基盤を支えるツールの一つとして重要な位置を占めている。特に、Nd:YAG レーザ(以下、YAG レーザと略記)は、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。

当社では、この YAG レーザのよりいっそうの高性能化、省エネルギー化を目指して、レーザダイオード(LD)を励起源とした小型、高効率な LD 励起 YAG レーザを開発している。

ここでは、重電分野での厚板加工用を目指した LD 励起 YAG レーザ、及び電子部品分野での微細加工用 LD 励起 YAG レーザについて、最近の開発状況を述べる。

2 LD 励起 YAG レーザの特長

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けた大きくすることが可能な技術である。YAG 結晶の吸収スペクトルと、ランプ及び LD の発光スペクトルを図 1 に示す。

ランプの発光スペクトルは、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ことがわか

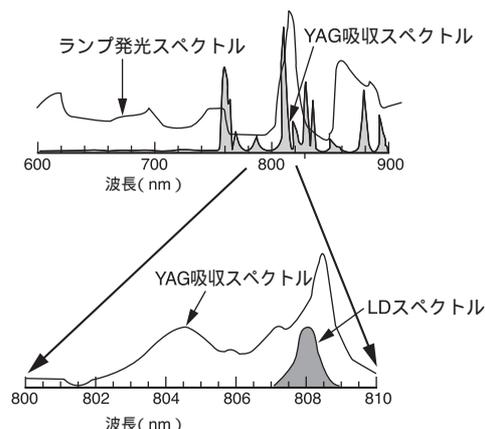


図 1 . YAG 結晶の光吸収スペクトルと、ランプ及び LD の発光スペクトル LD の発光スペクトルは、YAG 結晶の吸収スペクトルより狭いため、効率良い励起が可能である。

Absorption spectrum of Nd:YAG crystal and emission spectra of lamp and laser diode

る。一方、LD の発光スペクトルは YAG 結晶の吸収スペクトルより狭く、LD の光パワーを効率良く YAG 結晶に投入することができる。

このため、LD 励起方式は 10% 以上のエネルギー変換効率を得られ、ランプ励起方式での変換効率があたかも数%であるのに対して、約1けた大きな値が得られる。

(注1) Nd(ネオジム)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。

3 高出力 LD 励起 YAG レーザの開発

3.1 “フォトン計測加工技術”プロジェクト

高出力、高品質で高効率、低コストのフォトン(レーザー光)発生技術と、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年度に通商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”が発足した。

当社はこの中で、フォトン発生技術を担当している。この技術テーマは、既存のランプ励起方式に比べて様々な長所を持つ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。最終目標は、平均出力10 kW以上、発振効率20%以上、レーザーヘッド体積0.05 m³以下の装置を開発することである。

われわれは、この最終目標を達成するためのアプローチとして、YAGロッドと呼ばれる円柱形のYAG結晶を採用している。プロジェクトが開始された97年度から98年度前半は、要素技術開発として励起モジュールを2個直列に配置した共振器で平均出力1.8 kW、効率13%を達成した⁽¹⁾⁽²⁾。更に、98年度後半は、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。また、これまでに製作した励起モジュール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⁽³⁾⁽⁴⁾。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。

3.2 励起モジュールの設計

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、図2に示すような励起方法を採用した。まず、LD光がYAGロッドに対してp偏光(入射面と平行な偏光成分)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以前の10%から2%程度に低減した。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コリメート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

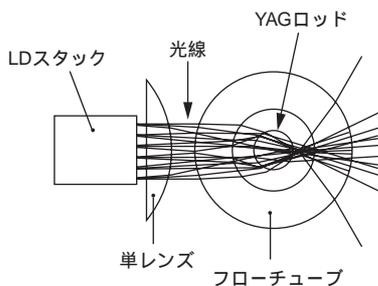


図2 . LD励起光線追跡 光線追跡シミュレーションにより、LD光を効率良くYAG結晶に照射する光学系を採用した。
Example of ray tracing simulation

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。

上記検討を基に新たに設計した励起モジュールの断面を図3に示す。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、図

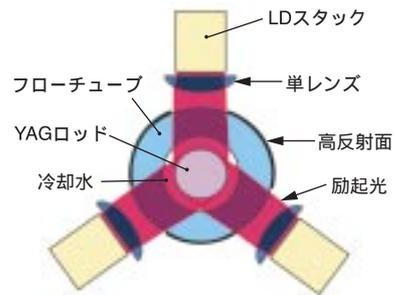
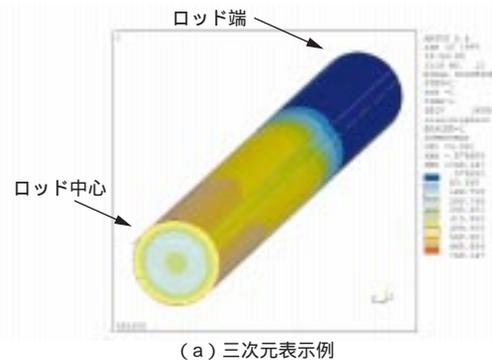
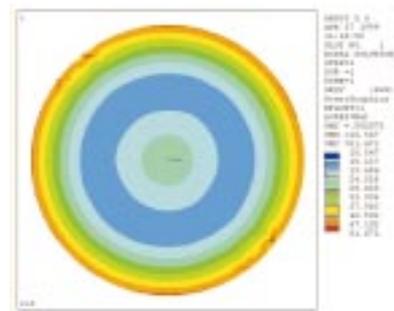


図3 .励起モジュール断面 YAG結晶内の励起分布に偏りができないように、LD光を3方向から照射している。
Cross-sectional view of pumping module



(a) 三次元表示例



(b) ロッド断面の表示例

図4 . 熱応力シミュレーションの例 有限要素法解析により励起分布や熱応力分布を解析し、設計に反映している。
Examples of thermal stress distribution simulation

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。シミュレーションの例を図4に示す。レーザ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。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ロッドが破壊する可能性がある。したがって、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。図4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。

3.3 レーザ出力特性

設計、製作した励起モジュールの性能を検証するために、レーザ発振試験を実施した。長さ200mmのYAGロッドを用い、励起用のLDスタックは、連続動作のものを用いて出力動作について試験した。

まず、この励起モジュール1個でのレーザ発振試験では、Nd:YAGレーザ出力2.02kWが効率22%で得られた。これは、室温動作でのLD側面励起Nd:YAGレーザの効率としては世界最高の値である。

次に、この励起モジュールを2個配置したレーザ共振器による2段レーザ発振器の試験を実施した。入出力特性を図5に示す。

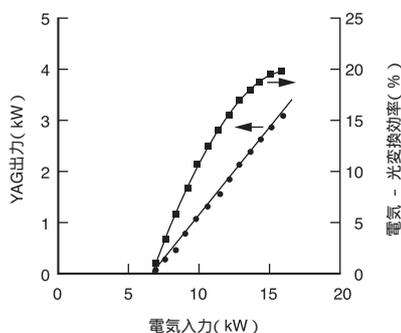


図5 . 2段レーザ発振器の入出力特性(連続動作) 3kW以上の出力が20%という高い効率で得られている。
Output characteristics of YAG laser pumped by laser diodes (continuous wave operation)

電気入力の増加に伴ってYAGレーザ出力は直線的に増加しており、電気入力15.5kWの時にYAGレーザ出力3.1kWが得られた。効率は20%であり、1個の励起モジュールを用いた場合とほぼ同じ値であった。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、世界最高効率を維持したままでレーザ出力の増加に成功した。

この2段レーザ発振器の外観を図6に示す。3kWの出力を2個の励起モジュールによって達成できたことは、レーザ発振器の小型化にとって重要な結果である。また、20%以上の効率が得られたことは、効率に関してプロジェクトの最終目標をクリアしたと言える。

最終目標が達成されれば、原子炉の保全や解体など、重電分野における厚板の溶接や切断加工に適用が可能となり、YAGレーザ加工の市場の拡大が期待できる。

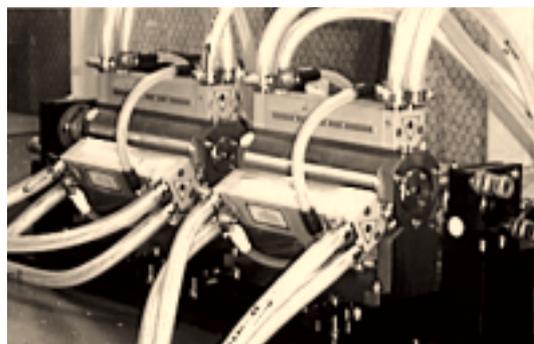


図6 . 2段レーザ発振器 2個の励起モジュールが直列にレーザ発振器内に配置されている。
Dual-head YAG laser oscillator pumped by laser diodes

4 LD 励起 SHG-YAG レーザ

4.1 非金属材料へのYAGレーザの適用性

通常のYAGレーザ加工は、溶接や切断などの金属を対象とするものがほとんどであった。しかし、最近では、半導体や液晶、情報機器などの分野で、シリコンや高分子材料などの非金属材料への加工要求が高まってきている。これらの材料は金属と異なり、特定の波長の光しか吸収しない。このため、材料の吸収波長帯に合わせた光での加工が必要となる。

YAGレーザは、非線形結晶を用いた波長変換技術の一つであるSHG技術を用いると、半分の波長532nmの緑色光を得ることができる。この技術を適用したSHG-YAGレーザが、非金属材料の加工に使われるようになってきた。

例えば、半導体パッケージへのマーキングの場合、これまで封止材である樹脂へのマーキングが大半であり、通常のYAGレーザが使われていた。しかし、ICの縮小・小型化のためにCSP(Chip Scale Package)などが出現し、基板であるシリコンへ直接マーキングする必要がでてきた。シリコンは、YAGレーザの基本波(1,064nm)ではいくらも光が透過するのに対し、SHG-YAGレーザ(532nm)の光はほぼ完全に表面で吸収する、という特性を持つ。したがって、SHG-YAGレーザを用いれば、内部デバイスに損傷を与えることなくマーキングが可能となる⁽⁵⁾。

4.2 産業用LD励起SHG-YAGレーザ

LDの寿命は1年程度であり、ランプより長寿命であるが、製造ラインでの稼働を考えた場合、メンテナンスフリーとすることは難しい。そのため、産業用LD励起YAGレーザでは、LD交換などのメンテナンス性も重要な設計要素となる。

この点を考慮して、CSPマーキング用として、LD励起SHG-YAGレーザを開発した。このレーザの特長は、1個のLDスタックだけをYAGロッドの横に配置して励起することで、小型化、低コスト化を可能にするとともにLD交換などのメンテナンス性を向上した点である。片側からの励起でもYAGロッド内に励起分布の偏りが生じないように、反対側には反射鏡が設置してある。この部分の設計にも、前述した光線追跡や有限要素法によるシミュレーションを活用し、反射鏡形状などを決定した。また、緑色光に変換するSHG部分もメンテナンス性を考慮し、非線形結晶のマウント部分をユニット化し、容易に交換ができるようになっている。ここで開発したLD励起SHG-YAGレーザは、2 W出力のCSP用レーザマーカとして、芝浦メカトロニクス(株)で製品化されている。このレーザマーカの

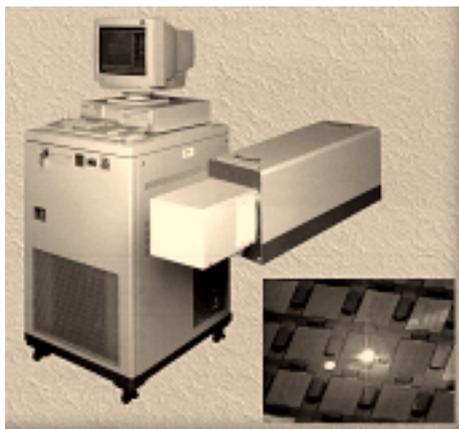


図7. CSP用LD励起SHG-YAGレーザマーカ シリコンへのマーキングに適切な緑色レーザー光によってマーキングしている。

Laser marking system using SHG-YAG laser pumped by laser diodes



図8. CSPへのマーキング例 シリコン表面だけを加工しているため、内部回路にダメージを与えずにマーキングできる。

Example of laser marking

外観を図7に、これを用いたCSPへのマーキング例を図8に示す。

このLD励起SHG-YAGレーザは、CSPのマーキング以外にも、太陽電池のスクライビングなど、他の非金属加工への応用が可能である。

5 あとがき

通商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YAGレーザを開発し、3 kW以上の出力を世界最高効率20%で達成した。最終目標の10 kWが得られれば、原子炉の保全・解体などの重電分野に応用でき、YAGレーザ加工の市場拡大が期待できる。

また、出力2 WのCSP用LD励起SHG-YAGレーザマーカを開発し、芝浦メカトロニクス(株)にて製品化した。今後更に、様々な加工用途を目的としたLD励起YAGレーザの製品化を進めていく予定である。

文 献

- (1) 秋山靖裕, 他. “1kW級ロッド型LD励起YAGレーザーの開発”. レーザー学会学術講演会第19回年次大会予稿集28p2 3. 名古屋, 1999-01, レーザー学会. 大阪, 1999, p.41.
- (2) Akiyama, Y., et al. “Efficient 1.8-kW diode-pumped cw Nd:YAG rod laser”. Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics. Baltimore, 1999-05, IEEE-LEOS, OSA. 1999, p.31.
- (3) Takada, A., et al. “Highly efficient operation of diode laser transversely pumped high-power Nd:YAG rod laser”. Technical Digest of International Forum on Advanced High-Power Lasers and Applications. Osaka, 1999-11, The Laser Society of Japan, SPIE. 1999, p.186.
- (4) 秋山靖裕, 他. “ロッド型レーザーの研究開発”. 第3回“フォトン計測・加工技術”シンポジウム講演集. 東京, 1999-01, フォトンセンター. 1999, p.14 - 19.
- (5) 岡田直忠, 他. “SHG-YAGレーザとその応用”. 第48回レーザー熱加工研究会論文集. 埼玉, 1999-12, レーザ熱加工研究会. 1999, p.85 - 89.



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



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。応用物理学学会, レーザー学会会員。

Quality Control System Technology Center



中山 通雄 NAKAYAMA Michio

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。固体レーザー発振器及び関連技術の研究・開発に従事。応用物理学学会, レーザー学会会員。

Quality Control System Technology Center