

LD 励起固体レーザー

サイバーレーザー(株)
住吉哲実

1 はじめに

各種最先端デバイス製造において、レーザー加工技術の導入が目覚ましい。製品性能の差別化を図る上で、従来の機械加工技術を上回る、極微細加工、難加工物質の整形、高速加工などが必要とされているためである。その範囲は自動車産業、半導体産業、バイオ・メディカル産業はいうに及ばずあらゆる分野に及ぶ。前回、光関連機器の市場動向の中で、レーザープロセス装置の市場拡大率として2002年度は15%以上の伸びが見込まれ、今後とも順調に拡大する可能性が高いことを紹介した。光産業技術振興協会(www.oitda.or.jp/index-j.html)がまとめた、レーザー装置に期待される高性能化のロードマップを図1に示した。LD励起型固体レーザーの高出力化、高品質化、新型レーザーの探索が期待されていることがわかる。具体的には、2010年にはビーム品質 $M^2 \sim 1$ において20 kW動作が目標となっており、レーザープロセスに

おけるビーム品質と出力の重要性を垣間見ることができる。

本稿では、LD励起Nd:YAGレーザーを中心に解説する。まず、動作特性として、電気から光への変換効率、ビーム品質について説明し、その高性能化を支える要素技術として共振器技術、レーザー媒質の材料技術に言及する。次に実際のNd:YAGレーザーの構成に触れ、LD励起型の採用によって産業用途に資する装置化が可能になった事例をあげる。最後にエネルギーフローの制御によって従来の波長(1 μm)とは異なる波長での固体レーザーの実現に言及する。

2 LD励起Nd:YAGレーザーの動作特性

Nd:YAG(ネオジウムヤグ)レーザーは、早くから産業用途に貢献しもっとも一般的な固体レーザーと認知されている。その理由は、レーザーイオン Nd^{3+} がレーザー発振が容易な典型的4準位エネルギー構造を有し、レーザー技術の創生期においてすでに高効率動作を実現したからである。また、発振波長1.064 μm が石英系光ファイバーにより加工応用上低損失でフレキシブルなエネルギー伝送が可能であったことも大きな要因である。

現在、生産現場での主流はランプ励起型で、Nd:YAGレーザーの電気-光変換効率は1%程度である。ここで電気-光変換効率の定義は(レーザー出力パワー)/(ランプに与える電力)である。そのため、100 Wのレーザーを作るためには、10 kW級のランプ光が必要である。レーザー出力に変換されない余剰のランプパワーは熱

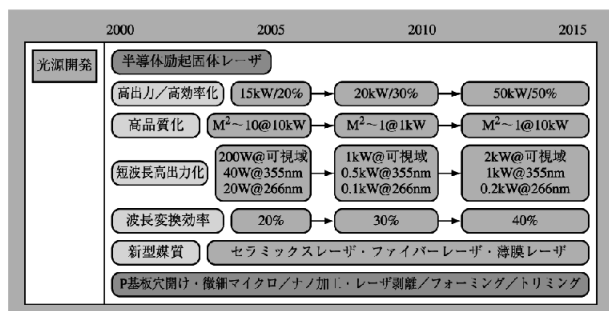


図1 固体レーザー技術の予測¹⁾

に変わるが、その熱を排出するための冷却機もまた、10 kW級の電力を必要とするなど、装置全体の電気から光への変換効率は0.1%オーダーときわめて低い。

この低効率動作・大型装置という問題を一挙に解決する手法として期待されているのがレーザーダイオード(LD)励起方式である。光学的な特性の違いとしてLDはスペクトルが狭く(単色性、半値全幅<3 nm)、ランプはスペクトルが広いことがあげられる。そのため、LD光はNd³⁺イオンの励起したいエネルギー準位に選択的にエネルギー注入でき、レーザー出力に寄与せず無駄になる励起エネルギーの割合が低くなる。図2にNd³⁺のエネルギー準位と吸収スペクトル曲線を示した。

典型値として、100W級のLD励起Nd:YAGレーザーの光-光変換効率は30%、総合的な電気効率(冷却機含む)は約10%となり、LD励起型はランプ励起型に比して100倍の優位性が得られる。このことは、LD励起固体レーザーの市場ならびに応用範囲拡大の牽引力となっている。

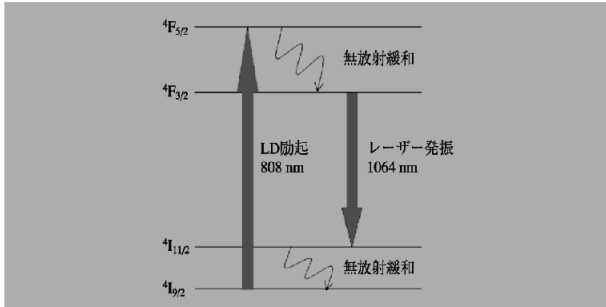


図2 (a) Nd³⁺のエネルギー準位図

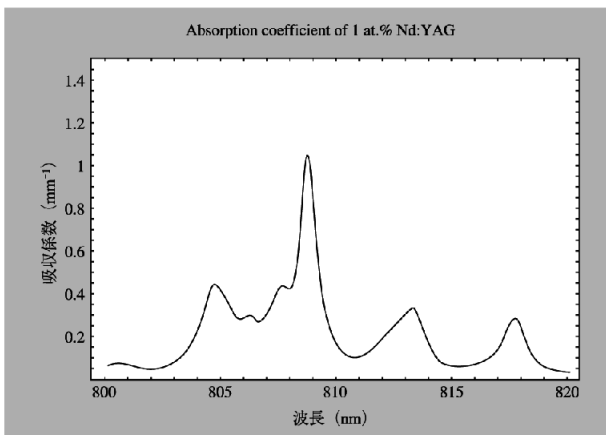


図2 (b) Nd³⁺の吸収スペクトル

る。

動作効率以上に重要視されるのが光学性能であることはいうまでもない。加工特性を決定づけるレーザービームの品質を示す指標としてM²(エムスクウェア)値がある。M²値はレーザービームの横モードの乱雑さを数値化したものである。基本モードのTEM₀₀がM²=1、TEM₀₁がM²=2のようにビーム品質の低下とともにM²値は増大する。M²~1のビームを集光したときのスポット径を1として、その何倍に広がるかでM²値がわかる。

励起用LDのM²値は数千と大きくこの光によって励起された固体レーザーからM²~1のレーザー光が得られる。すなわち、LD励起固体レーザーはビーム品質のコンバータの役割も持っている。

一般的には、レーザーの高出力化にともないM²値は増大する。高出力の追及とともにこのビーム品質を高く維持することで所望の加工性能が達成される。ビーム品質を高めるためには、レーザー結晶内の熱分布の制御とともにその熱の影響(熱レンズ効果など)を見込んだ共振器設計が必要である。ビーム品質が高ければ、集光性能が高くなりレーザープロセスにおける貢献が大きいの。波長変換技術との組み合わせを考えると、光-光変換効率を高めることができ、装置性能に大きく寄与することになる。波長変換技術については本解説シリーズで別途取り上げる。

3 共振器構成による性能改善

LD励起固体レーザーの共振器技術の難しさはレーザー結晶内に発生する熱をいかにマネジメントして所望のビーム品質を得るかという点につきる。最近のレーザーのアプリケーションでは多様性と精密性の両立をもとめられることが多く、ハイパワー・高ビーム品質、ともに必要である。

レーザー発振中、レーザー結晶内には励起パワーと出力パワーの差に相当するパワーの一部が熱に変わっている。この熱が冷却系へ流れる過程で温度分布をつくりそれにとまって、結晶の屈折率に分布ができる。これがいわゆる熱レンズといわれるものであり、YAG結晶の場合は中心温度が高く、周囲が環境温度に近い状態であ

れば凸レンズが形成される。

この熱問題そのものを低減しようとする試みもなされており、それを図3に示した。

熱問題を抑制する方法として2つ紹介している。活性体積に比較して表面積を大きくし、排熱効率を増大することによって熱問題を最小化する方式（アクティブミラー方式とファイバーレーザー方式）と、温度勾配を1次元化（排熱方向を制限）し、そこを通過するレーザー光をジグザグ型にとることで熱問題を補償するジグザグスラブ型方式である。

アクティブミラー方式はレーザー結晶を極限まで薄くし、光の入出力は結晶の表面で行い、裏面から排熱を行う。このことにより、結晶内で発生した熱を大面積で速やかに排出することができ、結晶内温度勾配をレーザー光に対して1次元化することが可能になる。これによりビーム断面内において屈折率勾配が生じず、熱問題が抑制される。

もうひとつの手法としては、活性体積に比して表面積を増大する光ファイバー形状の採用である。光ファイバーの低損失伝搬可能という特性を使い、利得長を伸ばすことで単位長さあたりの排熱量を小さくすることができる。すなわちコア中において熱レンズ効果そのものを極小化するとともにその影響を導波路という構造により補償している。そのため空冷でも100 W級の高ビーム品質レーザーを構築することができる。

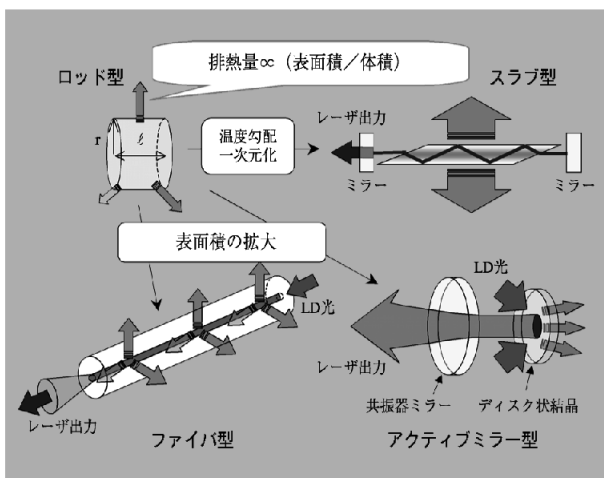


図3 熱マネジメント

また、ジグザグスラブ型では、1方向のみ排熱のパスをつくり、意図的に屈折率勾配を一次元で形成する。レーザービームはこの活性部をジグザグに通ることによりビーム断面のどの点をとっても、ビームの進行方向の屈折率変化量の積分値が同等となるようにして、熱レンズ効果を抑制する。

4 ホスト材料によるレーザー特性の違い

Nd:YAG結晶のほかに、Nd:YLF、Nd:YVO₄などを使用する場合、それぞれ特長がある（表1）。Nd:YLF、Nd:YVO₄結晶から発生するレーザー光は結晶軸方向に偏光する。これは、このレーザービームを使って波長変換するには有効な特性である。Nd:YAG結晶の場合は、結晶が等方性であるために、偏光素子を共振器内に設置することで偏光が得られる。

このように同じレーザーイオン（Nd³⁺）であってもホスト結晶によってその光学特性が変わるために、アプリケーションにあわせて、レーザー結晶、共振器、LDの選定が行われる。

たとえば、Nd:YVO₄はNd:YAGと比較して、LD光の吸収係数、誘導放出断面積がいずれも大きいので、高繰り返し動作で小パルスエネルギーの動作領域においてもパルス幅の狭い高ピークパルスが得られる。この特性を活かし、レーザーマーキング応用において高スループットが実現できる。

また、Nd:YLF（480 μs）の場合はNd:YAG（230 μs）と比して上準位寿命が長くエネルギーの蓄積効果が高い。そのため、比較的低繰り返しにおいても連続発振動作LDによる励起によって高効率動作が可能である。

表1 レーザー結晶の特性

	Nd:YAG	Nd:YLF	Nd:YVO ₄
励起波長	808 nm	798 nm	808 nm
発振波長	1064 nm	1047 nm (π)	1064 nm
屈折率温度依存性	7.3×10 ⁻⁶ /K	π: -4.3×10 ⁻⁶ /K σ: -2×10 ⁻⁶ /K	π: 8.5×10 ⁻⁶ /K σ: 3.0×10 ⁻⁶ /K
熱伝導係数	14 W/m/k	6 W/m/k	5 W/m/k
誘導放出断面積	6.5×10 ⁻¹⁹ cm ²	1.8×10 ⁻¹⁹ cm ²	25×10 ⁻¹⁹ cm ²
上準位寿命	230 μs	480 μs	90 μs

一方、YAG結晶はYLF結晶、YVO₄結晶に比較すると熱伝導係数や機械的強度で優るために特に高出力動作(kW級)で熱負荷が大きい領域では性能がいかに発揮されている。

5 レーザー装置

Nd:YAGレーザーヘッド内の典型的な構成要素について説明する(図4)。

共振器構成要素：レーザーダイオード、
レーザー結晶、
レーザー共振器、
Qスイッチ素子

Nd:YAG結晶の励起用レーザーダイオードの発振波長は808 nm近傍である。808 nmの励起光から1064 nmの光を出すことになるため、単純なエネルギー比から得られる最高の変換効率は $808 / 1064 = 76\%$ であるが、通常、Nd³⁺イオン内エネルギー損失や共振器内のロスなどをふくめておよそ30%の光-光変換効率が得られる。LDの波長は、駆動電流の大きさと動作温度に依存する。たとえば波長の温度依存性は約0.3 nm/℃であり、固体レーザーの出力安定性を良くするためにはLD温度の高精度制御が不可欠である。

共振器については、レーザー結晶の熱レンズ効果・熱複屈折効果を補償する共振器技術が取り入れられる。その目的は高効率動作・高ビーム品質の実現である。熱レンズはビームが屈折する効果(結晶特性によって集光、発散のいずれかを示す)、熱複屈折は偏光が回転する効果を表している。熱効果が生じる理由は、レーザー結晶に与えた励起エネルギーのすべてが所望のレーザーエネルギーに変わることがなく、そのレーザー結晶内で熱に変化されることにある。そのため、その熱効果をゼロに

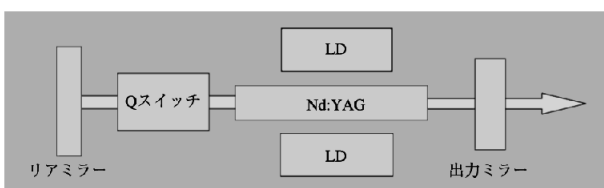


図4 レーザー共振器構成

することはできず、通常、熱レンズ、熱複屈折の影響を取り入れて共振器の設計が行われる。

Qスイッチ素子は高速で光学的損失を変化させることのできる部品である。光学損失を大から小の状態に瞬間的に切り替えることで、共振器のQ値をスイッチすることからこの名前がある。このスイッチングによって発生するパルス光がQスイッチパルスであり、連続発振動作時のパワーに比して、1000倍以上のピークパワーが得られる。パルス幅10ナノ秒オーダーのQスイッチレーザービームは短時間でレーザーエネルギーを加工対象に注入できるので、多くのサンプルにおいて加工効率が向上する。

Qスイッチ動作のスタートに関しては共振器内オプティクスを破損する可能性があるので注意を要する。高繰り返し型(たとえば10 kHz以上)で設計されたレーザーにおいて、LD励起により結晶内にエネルギーが十分蓄積された状態でQスイッチをかけると、高ピークパルスが発生し、使用しているオプティクスに光損傷を与える可能性がある。通常、そのような損傷を防ぐためにファーストパルスサプレッション機能が搭載されている。

6 LD励起による産業応用の拡大

産業応用においては装置の長寿命化、高効率化、小型化、メンテナンスフリー、環境負荷低減が要求されているため、LD励起方式の採用は必須条件といえる。特にレーザーを多段に組み合わせて駆動するレーザー励起固体レーザーについては、励起用レーザーをLD励起型に変えることはさらに重要である。ここで取り上げるチタンサファイア結晶を搭載したフェムト秒レーザーは励起レーザーとしてグリーン光が必要であり、従来は大型のアルゴンレーザーを使用していた。現在は、高効率・小型化に成功しているLD励起固体レーザーへ置き換わってきており、産業用途に必要な諸特性を満たす開発フェーズに入ってきている。

このTi:S励起用レーザーとして、弊社では、表2のスペックのLD励起固体レーザーを開発・搭載している。

LDは準連続発振(QCW)型を使用し、1 kHzにおける高効率特性を追求している。QCWLDの寿命はパルス

表2 Ti:Sレーザー励起用LD励起固体レーザー

項目	特性値
LD	808 nm
動作モード	Qスイッチ
発振波長	1064 nm (532nm)
パルスエネルギー	10 mJ (532 nm), 20 mJ (1064 nm)
繰り返し	1 kHz
パルス幅	<15 ns
ビーム品質	$M^2 < 8$
平均出力パワー	10 W (532 nm), 20 W (1064 nm)
出力安定性	$2\sigma: \pm 1\%$
連続動作時間	5000時間以上

の発生回数で定義するが、現在では10 Gショット以上の長寿命化が達成されているので、時間換算では3000時間の動作寿命が得られている。LDの駆動電流を定格よりも低く使うなどすれば、さらに寿命を延ばすことが可能である。

Nd:YAG結晶の場合、励起状態が維持できる上準位寿命が230 μ sであるため、その寿命時間を越えて励起しようとしてもむしろ効率を下げってしまう。たとえば、1 kHzではパルス間のインターバルは1 msだが、実際の励起時間は230 μ s以下である。逆に繰り返しが10 kHz以上になると、パルス間のインターバルが100 μ sを下回るなので、間断なく励起するモード、すなわちCW励起が適している。

7 発振波長のバリエーション

Nd:YAGレーザー(1.064 μ m)と炭酸ガスレーザー(10.6 μ m)が様々な分野においてポピュラーであるが、波長が固定されているために応用が制限されるという側面もある。今後のレーザー応用拡大のためには、ターゲットの光学特性にあわせたレーザー装置を作る必要がある。応用上重要な波長を持つレーザー装置開発のため、レーザーイオン、ホスト結晶、励起波長の最適な組み合わせ技術の研究が進められている。

たとえば、リモートセンシング用レーザーでかつ目に安全なレーザーとして、アイセーフレーザー(波長2 μ m帯)があげられる。ヒト角膜へ過って照射されたときにも高密度エネルギーが蓄えられない波長であるた

め、比較的大きなパワーが目照射されても安全が確保できる。

また、波長3 μ mは水の吸収ピークであるために生体組織のレーザー加工には最適な波長である。

しかし、これらの波長においては、Nd³⁺イオンのようにシンプルな4準位系のエネルギー準位構成はなく、希土類イオンの特徴をうまく利用したエネルギー変換が必要となる。図5にこれら2, 3 μ mの波長でレーザー発振可能なレーザーイオンの組み合わせを图示した。

波長2 μ mで発振可能なTm, HoコドープYLFレーザーは波長790 nmでTm³⁺イオンを励起し(³H₆→³H₄)、そのエネルギーをHo³⁺イオンに移動させるという手法をとる(図5(a))。特に励起エネルギーの利用効率を上げる要因となっているのが、励起されたTm³⁺イオン1個から、交叉緩和(Cross relaxation: CR)によって励起イオンが2個に増える点である(³H₄→³F₄, ³H₆→³F₄)。交叉緩和は隣り合う2個のTm³⁺イオン間のエネルギーの授受であるため、その生起確率はイオン間距離、すなわちドープ量に依存する。さらにその励起されたTm³⁺イ

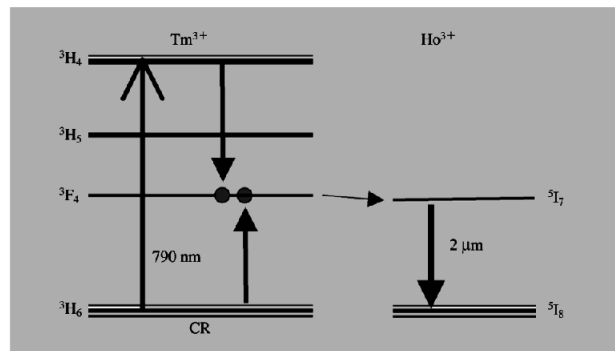


図5 (a) Tm³⁺, Ho³⁺:YLFレーザーのエネルギー準位図

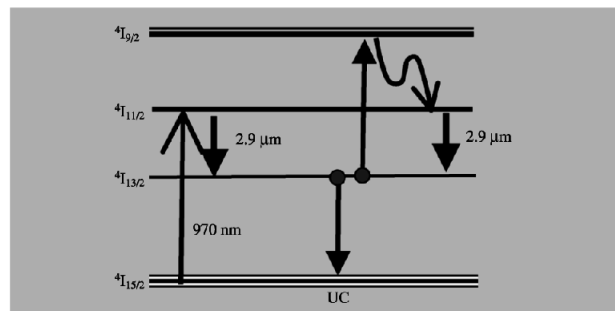


図5 (b) Er³⁺:YAGエネルギー準位図

オンのエネルギーが Ho^{3+} イオンにエネルギー移乗されて、準3準位系と称される反転分布を得にくいエネルギー準位構造で高效率レーザー発振を可能にしている。

図5(b)に示す Er^{3+} の励起から発振までのエネルギーのながれも特徴がある。Er:YAGの3 μm 帯を発振するエネルギー準位 ${}^4\text{I}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ において、下準位 ${}^4\text{I}_{13/2}$ の励起寿命が上準位 ${}^4\text{I}_{11/2}$ よりも長いために、レーザー発振に不可欠な反転分布が継続的にできない(自己終端型遷移)。そこで、 Er^{3+} イオンの添加量を30%~50%にしてErイオン間の距離を近づけると、レーザー下準位 ${}^4\text{I}_{13/2}$ のエネルギーを持つ2個のイオンがアップコンバージョンという交叉緩和とは逆の過程を経てエネルギー交換する。具体的には2個のレーザー下準位イオンから1個のレーザー上準位イオンを生成する。そのため、970 nm LD光で励起されたイオン1個から2個の3 μm の光子を発生可能となり、高効率動作が期待されている。このようにレーザーイオン内のエネルギーフローが制御できるのもLDにより意図したエネルギー準位を選択的に励起可能であるためである。

8 まとめ

LD励起固体レーザーは高効率化・小型化によって様々な分野の応用に適用されつつある。本稿ではその特徴、高性能化(高出力・高ビーム品質)にむけた研究開発の一部を紹介した。その中には材料の見直しも含まれている。ここでは言及していないが、すでに研究レベルでは一定の成功を収めている、Yb(イッテルビウム):YAGレーザーやNd:セラミックレーザーなどが実用化へむけて日々開発が進められている。光の応用はすなわち加工や観察の対象物とその光の相互作用をうまく使うことにある。重要な光学特性として、ビーム品質、光強度、波長などがあり、それぞれどのような開発の取

り組みがなされているかを説明した。その中でも波長の重要性は高く、レーザーイオン、励起LD波長の最適な組み合わせにより、新しい波長のレーザー光が生み出される。これにさらに波長変換技術を組み合わせることによりスペクトルの拡大は自由自在になると考える。

固体レーザーの高性能化にともない、レーザー装置市場がさらに拡大することを期待している。

参考文献

- 1) 光産業技術振興協会: 15-001-1『光テクノロジーロードマップ 報告書 ー光加工分野ー』,2003.3. p7.

LD pumped solid state lasers

Tetsumi Sumiyoshi

Cyber Laser Inc. Vice president

Properties of LD pumped solid state lasers are described with comparison to lamp pumped lasers. A high quality and high power beam is obtainable with thermal management of laser crystal. A laser oscillating at a new wavelength is also obtainable with LD pumping scheme and specific dynamics in energy transfer of the doped ions in the laser crystals.



スミヨシ テツミ

所属:サイバーレーザー株式会社 取締役 副社長

連絡先:〒212-0054 神奈川県川崎市幸区小倉308-10 KBIC 101

Tel. 044-588-3854 Fax. 044-580-3808

E-mail: sumiy@cyber-laser.com

経歴: 1996年日本電気株式会社, 光エレクトロニクス研究所勤務。2000年2月サイバーレーザー株式会社創業し現職。ガスレーザー, LD励起固体レーザー, ファイバーレーザーの装置開発・応用研究に従事。特に中赤外波長光源の装置化研究に興味を持ち, その産業応用ならびにバイオメディカル応用の研究を推進している。博士(工学)。