

固体レーザーの最近の動向

鷲尾 邦彦

固体レーザーは、Nd:YAG レーザーや Ti:サファイヤレーザー、Er:ファイバーレーザーなどのように、光学結晶や光学ガラスを母体材料とし、これに希土類イオンや遷移金属イオンなどの活性イオン含有させたものをレーザー媒質として用い、光励起によって動作させるレーザーである。固体レーザーは、CW 発振、ノーマルパルス発振、Q スイッチ発振、モード同期発振など発振動作が多様であり、また設計により高出力、高コヒーレント、広帯域波長可変、超短パルス発生など、他のレーザーにはないすぐれた特性や機能を発揮させることができる¹⁻³⁾。このため固体レーザーは、加工、医療、計測、光通信、理化学研究など広範な分野に用いられており、昨今、目覚ましい発展を遂げつつある。

近年、ランプ励起固体レーザーは、国内でも平均出力 6 kW クラスの高出力なものまで製品化され、光ファイバーによるパワー伝送などのフレキシビリティを生かした自動車工業⁴⁾や機械・重工業への応用⁵⁾も急速に立ち上がり始めた。また、高出力な半導体レーザーアレイを利用した LD 励起固体レーザーの研究開発も活発化⁶⁻⁸⁾、Nd:YAG レーザーに加えて、さらに Yb:YAG レーザー⁹⁾やダブルクラッドファイバーレーザー¹⁰⁾など、高出力レーザー発振器の種類も急速に増えつつある。ここでは、固体レーザーの市場動向を簡単に紹介した後、主に LD 励起固体レーザーについてその技術動向を解説する。

LD 励起固体レーザーとは、励起光源として半導体レーザーを用いた固体レーザーであり、diode pumped solid state laser の頭文字をとって、DPSSL または DPSS レーザーとも呼ばれ、また全固体レーザーとも呼ばれている⁶⁻⁸⁾。LD 励起固体レーザーは、従来のランプ励起固体

レーザーと比較して次のような特長を有する⁹⁾。① 高効率であり、小型化・軽量化が容易、② レーザー媒質の発熱と熱歪みが軽減されるためレーザー光が高品位、③ レーザー発振出力が安定で低雑音、④ 光源が長寿命で保守が容易であり高信頼度、⑤ 従来のランプ励起では吸収波長に発光波長がよく一致しなかったり、またレーザーの終準位が基底準位の近傍に位置して準 3 準位動作となるため発振閾値が高く、これまでレーザー発振が困難であった Yb:YAG や Yb:S-FAP のような新レーザー材料にて高効率なレーザー発振が可能¹¹⁾。

LD 励起固体レーザーは、励起用 LD の高出力化、アレイ化、LD の発振波長領域の拡大などに伴い近年急速に発達しており、その種類も多く、マイクロチップ固体レーザー^{12,13)}と呼ばれる小出力・微細なものから、レーザー核融合研究用の巨大なレーザーシステム¹⁴⁾まで実に多様である。LD 励起固体レーザーをレーザー媒質の種類で大別すると、希土類イオン系固体レーザーと遷移金属イオン系固体レーザーとに分けられる。遷移金属イオン系 LD 励起固体レーザーには、広帯域に波長可変な Cr:LiSAF (LiSrAlF₆) レーザー¹⁵⁾や Cr:ZnSe レーザー¹⁶⁾などがある。希土類イオン系固体レーザーは種類が多く、その発振波長域も、Ce:LiSAF レーザー (275~320 nm) などの紫外域¹⁷⁾から Pr:LaCl₃ レーザー (7.2 μm)¹⁸⁾の中赤外域まで広がっている。これら紫外レーザーや中赤外レーザー等は、LD による直接の励起は困難であっても、他波長の LD 励起固体レーザーやそれらの波長遷移光などを光源として励起すればレーザー発振可能となるため、広義にはそれらも LD 励起固体レーザーと見なしてよいと考えられるが、ここでは誌面が限られているので、レーザー媒質が LD により直接に励起される固体レーザーに限定して、かつ Nd 系など希土類イオン系固体レーザーを中心に解説す

NEC 制御システム事業本部 (〒229-1198 相模原市下九沢 1120)
E-mail: washio@lam.sgm.nec.co.jp

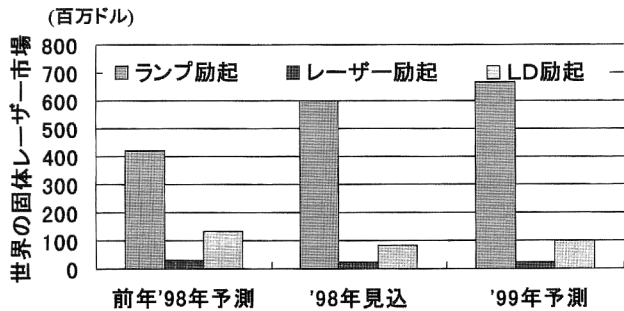


図1 固体レーザーの機種別世界市場予測¹⁹⁻²¹⁾。

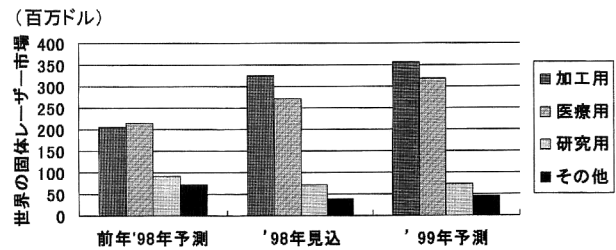


図2 固体レーザーの用途別世界市場予測^{19,20)}。

る。なお、Yb系固体レーザーや高輝度中赤外ファイバーレーザーについては本特集号で別に解説があるので、ここでは説明を省略する。

1. 固体レーザーの市場動向

Laser Focus World誌の調査による固体レーザーの機種別の世界市場予測を図1に¹⁹⁻²¹⁾、また用途別の世界市場予測を図2に示す^{19,20)}。LD励起固体レーザーはまだ小出力なものが多く、電子産業の不況が影響して製品市場では伸び悩んでいる。これに対してランプ励起固体レーザーは、加工用の高出力レーザーや医療用レーザーなどが中心であり、世界市場では大きく伸張している。

図3は、世界における固体レーザーと炭酸ガスレーザーとの市場の比較を示す¹⁹⁻²¹⁾。半導体レーザーを除く全市販レーザーに占める市場(金額)構成比は、1998年の市場を一昨年に予測したときには炭酸ガスレーザーが33.2%、固体レーザーが34.0%とほぼ両者互角であり、固体レーザーが炭酸ガスレーザーを若干追いついた程度とみられていたが、翌年における1998年の見込みでは市場が変容し、固体レーザーが大幅な伸張を示している。1999年の予測では、炭酸ガスレーザーの構成比率は30.3%に下がり、逆に固体レーザーは42.0%と大きく構成比率を高めている。世界市場での固体レーザーの大きな伸張は主に次の2つの理由で説明されよう^{20,21)}。その1つは、脱毛用など美容用のレーザーを含む海外での医療用レーザーの顕著な伸びである。医療用レーザーは固体レーザーのほうが炭酸ガスレーザーよりも金額面での構成比率がかなり大きいので、世界市場では小・中出力の加工用レーザーにおける電子産業向けの不振は医療用レーザーの伸びで大きくカバーされた。また、2つめの理由は、海外では大出力炭酸ガスレーザーの溶接への応用が日本に比べて早くから普及していたが、数キロワット級CW励起高出力Nd:YAGレーザーを利用した光ファイバーによるパワー伝送のメリットが自動車産業などで認知され、炭酸ガスレーザー

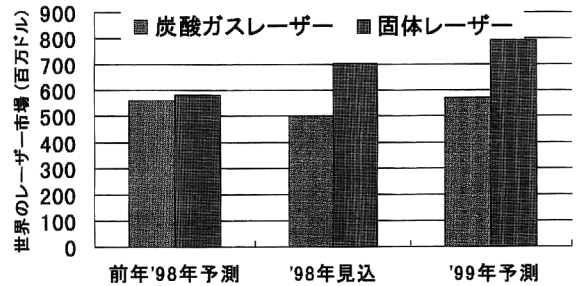


図3 固体レーザーと炭酸ガスレーザーとの世界市場の比較¹⁹⁻²¹⁾。

ー溶接からNd:YAGレーザー溶接への方式の切り替えが急速に進み始めたということである。

キロワット級の高出力固体レーザーは、まだ励起用LDが高価であるため市場では当面はランプ励起が中心となる。しかし、早くも1998年秋にはドイツでCW 2.6 kWまでのLD励起Nd:YAGレーザーが製品発表されており、また高出力LDアレイのコスト低減も顕著に進展しつつあるので、CW励起高出力LD励起固体レーザーに関しては開発と実用化が今後急速に進み、生産ラインへの導入も2001年ごろまでにはかなり活発化しよう。なお、比較的低速の繰り返し動作で使用する精密スポットレーザー溶接用Nd:YAGレーザーや医療用アレキサンドライトレーザーなど一部のパルス励起高ピーク出力固体レーザーについては、LD励起によるフラッシュランプ励起との代替がコスト的にかなり困難であり、近い将来に固体レーザーがすべてLD励起により全固体化されるとはいいきれない。

2. LD励起1.06 μm帯Nd:固体レーザー

2.1 高平均出力側面励起Nd:YAGレーザー

LD励起固体レーザーの励起方式には端面励起方式、側面励起方式、およびクラッド導波励起方式などがある。平均出力数十W以上の高出力Nd:YAGレーザーはもっぱら側面励起方式を用いている。大型のNd:YAG結晶はかなり高価であるため、レーザー媒質の形状は市販のNd:YAGレーザーではもっぱらロッド状のものが用いら

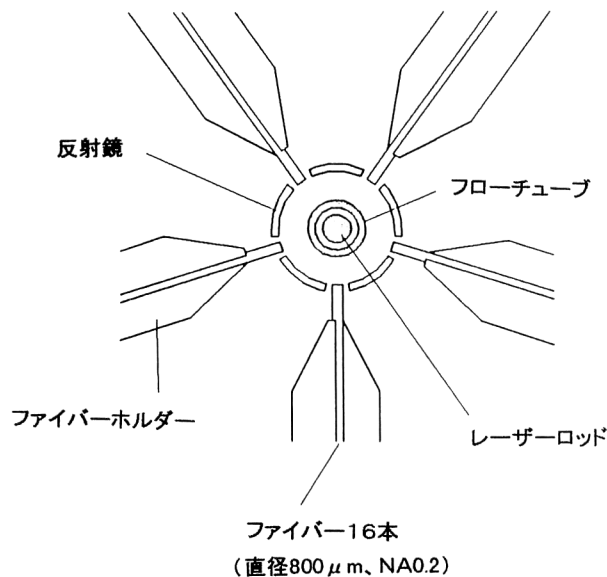


図4 光ファイバーアレイを用いた側面励起 Nd:YAG ロッドレーザーの構成例^{23,24)}.

れている。なお、10 kW 超の大出力用としては Nd:YAG スラブは有望である²²⁾。ディスク状のレーザー媒質を用いたものについて Nd:ガラスや Yb:YAG による 100 kW 級の超大出力レーザーの可能性も論じられているが²²⁾、Nd:YAG 結晶は大口径化や Nd イオンの高濃度の添加が困難であり、高平均出力 Nd:YAG レーザーでディスク形状が実用化される可能性は乏しいと思われる。

3.1.1 高平均出力側面励起ロッドレーザー

高平均出力側面励起 Nd:YAG レーザーの光励起部の代表的な構成例を図4～図7に示す。励起用 LD には、LD バー (1 次元 LD アレイ)、LD アレイのスタック、光ファイバー結合した LD または LD アレイなど種々が選択できるので、レーザー装置の構成法にも種々がある。

図4^{23,24)}は、光ファイバーに結合した LD を多数用い、レーザーロッドの周りに多数の光ファイバーの出射端を配置した例である。直径 6 mm、長さ 110 mm、Nd 濃度 0.5 at. % の Nd:YAG ロッドを用いて、10 W 出力の光ファイバー 190 本をロッドの周りに 5 等配して、光ファイバーからの光励起入力を 1900 W としたとき、マルチモード発振出力 CW 750 W、光から光への変換効率 40%、電気から光への変換効率 10% が得られている²⁴⁾。モード品質は、CW 出力 450 W にて $M^2=23$ 程度が得られている。また、直径 4 mm、長さ 56 mm、Nd 濃度 0.9 at. % の Nd:YAG ロッドを用いた場合には、励起入力 720 W のときマルチモード出力 320 W が得られているが、励起入力 380 W までは基本モードの TEM₀₀ モード発振が得られており、TEM₀₀ 発振出力としては CW 80 W、光→光の変換効率

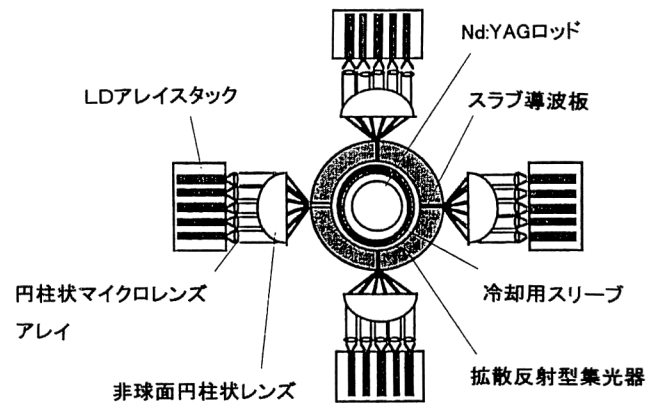


図5 LDアレイスタックと導光板を用いた側面励起ロッドレーザーの構成例²⁵⁾.

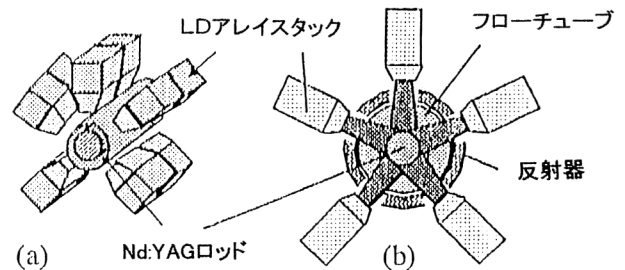


図6 高出力 LDアレイスタック側面励起 Nd:YAG ロッドレーザーの構成例²⁶⁾.

21% が得られている²³⁾。

図5²⁵⁾は、アレイスタックからの LD 光を円柱マイクロレンズアレイおよび非球面円柱レンズを用いて集光し、これを薄板状の導光板を用いてレーザーロッドに導き、またレーザーロッド冷却用のフローチューブの外周に拡散反射鏡を設けた構成である。導光板により LD 光の 87% が拡散反射鏡に伝達されており、また高反射率の拡散反射鏡により励起光は高効率にレーザーロッドを励起している。LD アレイバー 5 層構造のスタックを合計 12 個用い、これをロッドの外周上に 4 等配して 1 つの励起モジュールを構成している。全 LD の平均出力は 550 W、ピーク出力は 2.75 kW (デューティー比は 20%) である。直径 3 mm のレーザーロッドを内蔵した励起モジュールを 2 つ直列に配置し、かつロッド間に石英の偏光子を挿入して偏光の異なる成分についての熱歪みによるレンズ効果の相違を補償することによって、LD 励起出力 1100 W のとき、マルチモード発振平均出力 352 W、TEM₀₀ モード発振平均出力 208 W (ただし $M^2 < 1.1$) が得られている。この TEM₀₀ モード発振時の LD 光からの光変換効率は 18.9%、また電気→光の変換効率は 7.6% である。

図6²⁶⁾は、アレイスタックの LD をロッドの周りに 5 方向の 2 列、総計 10 個配置した構成例である。ロッドの周りには、フローチューブ、反射鏡、LD がこの順に配置さ

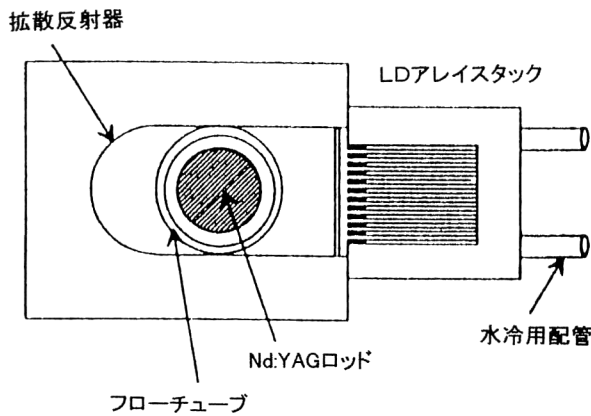


図7 LDアレイスタックと拡散反射鏡を用いた側面励起ロッドレーザーの構成例²⁷⁾.

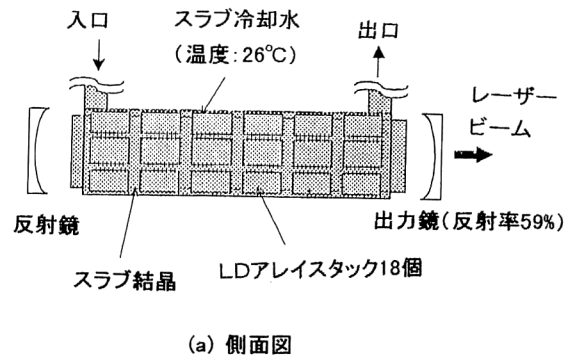
れている。直径8mm、長さ118mm、濃度0.6%のNd:YAGロッドを用いた励起モジュールを2個直列に配置した2段ヘッド共振器構成にて、励起光入力CW5.7kWのとき最大出力1.8kW、光→光変換効率31%、電気→光変換効率13%が得られている。このときの励起密度はレーザーロッドの単位長さあたり約380W/cmが得られている。

図7は、マイクロチャンネル冷却型の5層のアレイスタックをロッド側面の一方に配列し、ロッドの周囲には拡散反射鏡を設けた比較的シンプルな構成である²⁷⁾。直径5mm、長さ80mm、Nd濃度0.5at.%のNd:YAGロッドを励起してCW400W以上、電気→光変換効率11%が得られており、CW300W時には M^2 値は30以下が得られている。またロッドおよび励起モジュールを2段直列に配置して、光励起入力3.1kWを加えたときには、CW700Wが得られている。なおこの場合の共振器長は32cm、出力鏡の透過率は80%であった。

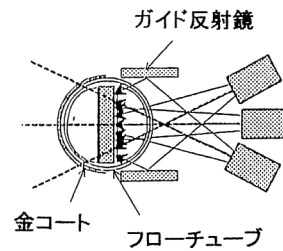
高平均出力Nd:YAGロッドレーザーでは、レーザー媒質中に生じる熱歪みのために熱レンズ効果や熱誘起複屈折効果が生じることは早くから知られていた¹⁾。しかし、中心が高温になる高平均出力動作時にビーム品質が劣化する主要因はNd:YAGロッドに生じる熱レンズの球面収差によるものと、解析ならびに実験で明確に判明したのは比較的最近のことである^{28,29)}。このため、Nd:YAGの熱伝導度や屈折率の温度変化の周囲温度依存性などが最近詳しく吟味され、低温に冷却したロッドレーザーによる熱歪みおよび収差の低減とその大出力動作の可能性への関心が強まってきている^{30,31)}。

2.1.2 高平均出力側面励起スラブレザー

ジグザグパスNd:YAGスラブレザーは、結晶表面で繰り返し全反射することによって伝搬ビームに対する熱



(a) 側面図



(b) 断面図

図8 LDアレイスタック側面励起高出力Nd:YAGジグザグスラブレザーの構成例³³⁾.

歪みが空間的に平均化されるため、大出力動作時にも回折限界に近い高ビーム品質が期待できる。米国では、PLM (precision laser machining) 計画により平均出力6kWまでの大出力レーザーの開発が進められているが、最近、Nd:YAGジグザグスラブレザーを3枚用いた構成で最大平均出力5kWが得られている。また不安定型共振器を用いた構成では、回折限界の3.5倍という高ビーム品質で平均出力3.6kWが得られている³²⁾。

ジグザグスラブレザーNd:YAGレーザーの構成例を図8に示す³³⁾。スラブ結晶のサイズは、 $6 \times 25 \times 206 \text{ mm}^3$ である。このスラブの片側に18個のLDスタック(ピーク出力0.96kW、デューティー25%、平均出力240W)を配置し、また冷却用フローチューブの外表面にはAu反射膜をコーティングしている。LDへの入力は、駆動電流85A、パルス幅400 μs 、周波数625Hzのパルスで行われ、LDからの励起光出力が4.07kWのとき、Nd:YAGレーザーの平均出力1.7kW、ピーク出力7.3kWが得られている。このときの光→光変換効率は42%、また電気→光変換効率は16%であった。工業技術院の「フォトン計測・加工技術開発」プロジェクトでは、高出力LD励起固体レーザーに関しては、ロッド方式およびスラブ方式のいずれも2001年度最終目標10kWを目指して開発が進められている。

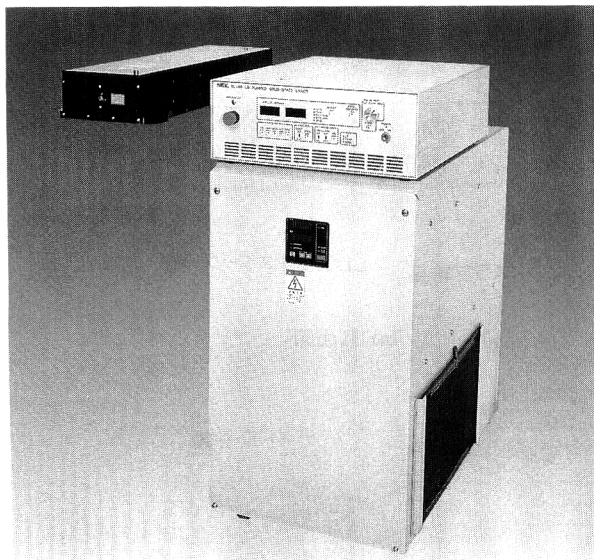


図9 微細加工用LD励起QスイッチNd:YAGレーザーSL 186 Aシリーズ (NEC製)³⁴⁾.

表1 微細加工用市販LD励起QスイッチNd:YAGレーザーの発振性能例³⁴⁾.

	SL 186 A	SL 186 AS	SL 186 AT
レーザー媒質	Nd: YAG	Nd: YAG (SHG)	Nd: YAG (THG)
発振波長 (nm)	1064	532	355
CW 出力 (W)	>20	—	—
Q-SW 平均出力*(W)	>16	>8	>3
Q-SW エネルギー** (mJ)	>3.3	>1.8	>0.5
パルス幅** (ns)		<30	
発振繰り返し (kHz)		0.1~40	
発振モード		TEM ₀₀	
偏光		直線偏光	

*Q-SW 発振繰り返し 10 kHz の場合, ** Q-SW 発振繰り返し 1 kHz の場合.

2.2 高ピーク出力 Q スイッチ発振 Nd: 固体レーザー

Nd: 固体レーザーは、Q スイッチ発振と組み合わせると比較的容易に高ピーク出力が得られるので、レーザー加工や地球環境遠隔監視・計測などへの応用が発達している。小～中出力の Q スイッチ Nd: YAG レーザーは、LD 励起固体レーザーが出現してまもなく製品開発も進められ、現在ではすでにピーク出力数キロワット～数メガワットクラスの多様な製品が産業などで用いられている。また、高ピーク出力の Q スイッチ発振 Nd: 固体レーザーは非線形光学素子を用いた波長変換も容易であり、このため第二高調波発生 (SHG) や第三高調波発生 (THG) 用の波長変換器などを共振器内部あるいは外部に備えた Q スイッチ発振 LD 励起固体レーザーが種々開発されている。

Q スイッチ法には能動 Q スイッチ法と受動 Q スイッチ

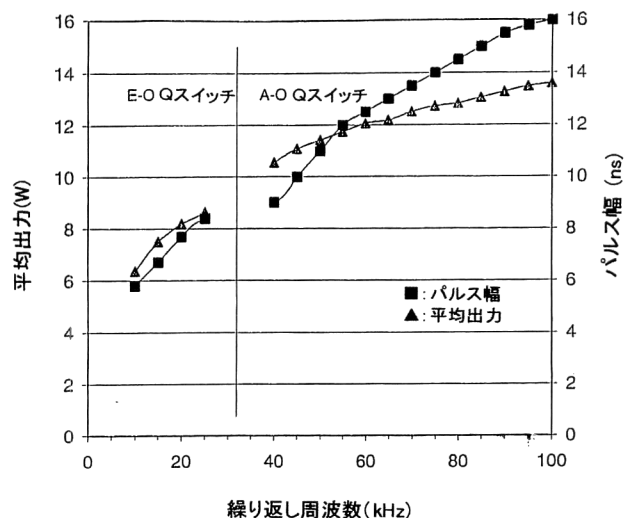


図10 高速繰り返しQスイッチ発振Nd:YVO₄スラブレーザーの発振特性³⁵⁾.

法がある。能動 Q スイッチ素子には超音波を用いた AO (acousto-optic)-Q スイッチ素子と、電気光学効果を用いた EO (electro-optic)-Q スイッチ素子とがある。受動 Q スイッチ法によれば、Q スイッチ発振のタイミングは外部制御困難になる問題があるが、能動 Q スイッチ法よりかなり短い数 ns 以下の短パルスが容易に発生できる特長がある。

2.2.1 1.06 μm 帯 AO-Q スイッチ Nd: 固体レーザー

AO-Q スイッチ法は繰り返し数～数十 kHz の高速繰り返しパルス発振に適している。図9には、加工用LD励起Qスイッチレーザーの市販品の代表例として、レーザートリミングやスクライビング、微細切断・穴あけなど各種のレーザー微細加工に用いられるLD励起Nd:YAGレーザーSL 186 Aシリーズ (NEC製) の外観を、また表1にはそのレーザー発振性能を示す³⁴⁾。

Nd:YVO₄ は Nd:YAG に比べて遷移断面積が約3倍大きく、また蛍光寿命は 90 μs 程度と約60%短いので、Q スイッチ発振繰り返し的高速化に適している。図10には、Nd:YVO₄ スラブレーザーの繰り返しQスイッチ発振特性を示す。繰り返し50 kHzでの平均出力は11 W以上が得られており、また100 kHzでもピーク出力8.5 kWが得られている³⁵⁾。なお、Nd:YVO₄ は Nd:YAG に比べて熱伝導度が小さいので、局所的な熱歪みにより熱破壊が生じやすく強励起の際は注意が必要である。端面励起Nd:YVO₄ レーザーについて、熱破壊を回避して高平均出力を得るためのNdイオン濃度の最適化が検討されている³⁶⁾。

2.2.2 1.06 μm 帯 EO-Q スイッチ Nd: 固体レーザー

EO-Q スイッチ法は、AO-Q スイッチ法に比べてレーザ

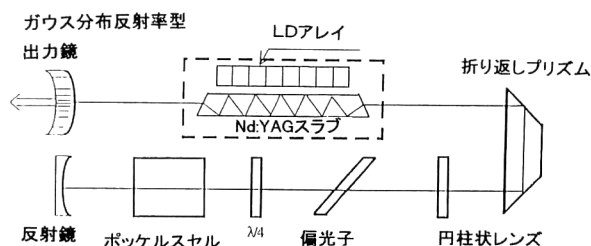


図11 パルス励起 Q スイッチ発振高輝度 Nd:YAG スラブレーザーの構成³⁷⁾。

一発振抑止のための共振器損失を大きくできるので、高利得のパルス励起固体レーザーの Q スイッチに適している。

図11³⁷⁾は、側面励起 Nd:YAG スラブレーザーの共振器内に KDP ポッケルスセルを設けた高輝度パルス励起 Q スイッチレーザーの構成例である。パルスエネルギー 100 mJ, パルス幅 20 ns, ピーク出力 5 MW の高出力な Q スイッチ発振が繰り返し 100 Hz にて得られている。レーザー共振器の出力鏡には反射率にガウス分布状の空間的变化をもたせたものを用いてビーム品質の向上を図っており、 M^2 値が水平方向 ~ 1.5 , 垂直方向 ~ 1.05 のほぼ回折限界に近い高ビーム品質を得ている。

図12³⁸⁾は、レーザー媒質に Nd:YVO₄ からなるプリズムを用い、共振器間隔を 25 mm とした小型ポッケルス Q スイッチレーザーの構成を示す。これによりパルス幅 700 ps, パルスエネルギー 0.76 mJ, ピーク出力 1.1 MW の高ピーク出力サブナノ秒 Q スイッチパルスが得られている。

2.2.3 1.06 μm 帯可飽和 Q スイッチ Nd: 固体レーザー

ポッケルスセルは高電圧のスイッチング素子が必要であり、寿命や信頼性の観点で宇宙用などにはやや不安がある。このため Cr:YAG 可飽和吸収体を用いた受動 Q スイッチ高出力 Nd:YAG レーザーが開発された³⁹⁾。厚さ 1.2 mm の比較的薄いジグザグスラブを用い、これを出力 100 W (パルス幅 200 μs) の準 CW 発振 LD アレイにて側面励起することにより、単一横モードかつ単一縦モード発振にて、リニア共振器構成では出力 1.5 mJ, パルス幅 3.9 ns, またリング共振器構成では出力 2.1 mJ, パルス幅 12 ns の Q スイッチ出力が得られている。

2.2.4 高平均出力内部 SHG 型 LD 励起 Nd:YAG レーザー

LD 励起によればランプ励起に比べてレーザー媒質内の熱歪みが低減され、すぐれたビーム品質でレーザー発振できるので、大出力レーザーの波長変換も高効率に行える。

図13⁴⁰⁾は、側面励起 Nd:YAG ロッドレーザーのレーザー共振器内に AO-Q スイッチ素子と KTP 結晶ないし

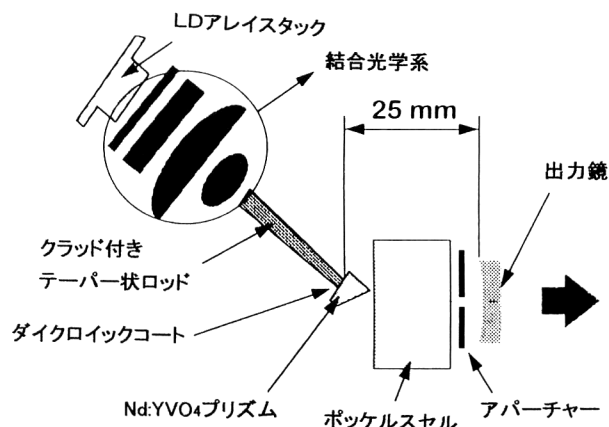


図12 サブナノ秒短パルス発振高ピーク出力 Q スイッチ Nd:YVO₄ レーザーの構成³⁸⁾。

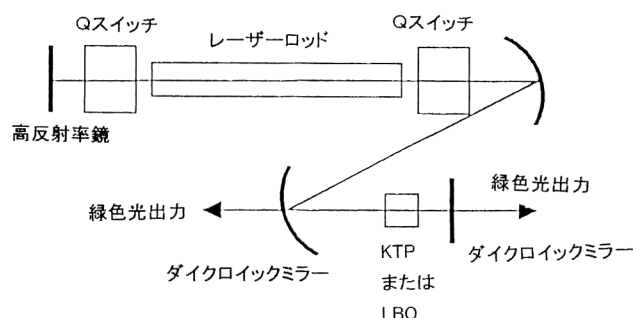


図13 Z字型共振器構成 LD 励起内部 SHG 高出力 Q スイッチ Nd:YAG レーザー⁴⁰⁾。

LBO 結晶を備えた高出力な側面 LD 励起 532 nm 緑色固体レーザーである。Nd:YAG レーザーロッドは直径 6 mm, 長さ 145 mm, Nd 濃度 0.6% のものが用いられ、別途レーザー共振器を平面鏡-平面鏡構成の短共振器とした場合には、CW 出力 515 W の 1.06 μm のレーザー発振が得られている。5×5×5 mm³ の HT-KTP (hydrothermally grown KTP) 結晶を用いたときには、LD 電流 30 A, 繰り返し周波数 17 kHz にて 315 W の緑色光が得られている。パルス幅は約 110 ns である。また LD 電流 29 A のとき電気から緑色光への変換効率が 8.3% と最大となり、折り返し Z 型共振器で透過率 20% の反射鏡を用いて得られた IR 出力からの 532 nm 光への変換効率は 82% が得られている。

図14⁴¹⁾は、端面励起 Nd:YAG ロッドレーザーの共振器内に AO-Q スイッチ素子と KTP 結晶を備えた高出力の端面 LD 励起 532 nm 緑色固体レーザーである。Q スイッチ発振繰り返し周波数 15 kHz にて、平均出力 140 W の 532 nm 光が得られている。ここでは Nd:YAG ロッドは、結晶端面近傍の熱的破壊防止や均一励起などの目的で、Nd 濃度 0.1% のかなり低濃度のものが用いられており、サイズは直径 5 mm, 長さ 100 mm である。また、結

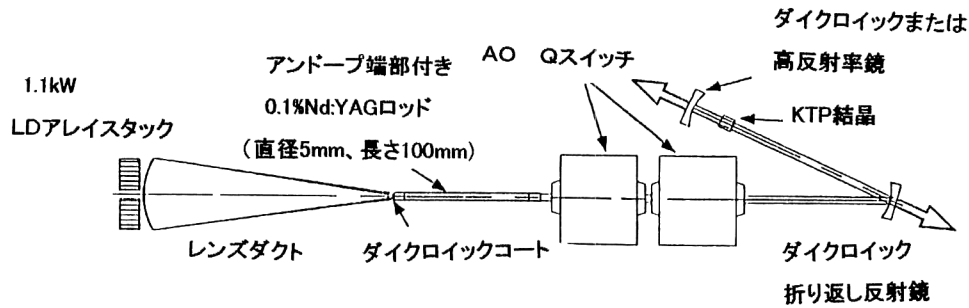


図14 端面励起内部 SHG 高出力 Q スイッチ Nd: YAG レーザー⁴¹⁾.

晶の両端には長さ 5 mm のアンドープ (Nd を添加していない) 結晶を拡散接合 (diffusion bonding) している。

マルチ縦モード発振高出力 Nd: YAG レーザーの内部 SHG では、従来、縦モード間の位相がランダムに変化していたため、発振縦モード数が少ない場合にはそれらの位相ゆらぎにより生じた強いノイズが波長変換出力に含まれていた。これはグリーン問題と呼ばれており、高出力 CW グリーンレーザーの実用上の大きな課題であった。最近、折り返し Z 字型レーザー共振器を用い、レーザー共振器の反射鏡やレーザーロッドをある適当な配置に設定すると、位相モード同期状態が生じ、ノイズのきわめて少ない安定したグリーン光が CW 6 W 以上まで実現でき、いわゆる高出力 CW レーザーのグリーン問題を回避できることが明らかにされた⁴²⁾。

3. 1.06 帯以外の他波長発振 LD 励起高出力 Nd: 固体レーザー

Nd: YAG のレーザー発振の始準位である ${}^4F_{3/2}$ 準位は結晶場により R_1 および R_2 の 2 つの準位に分裂している。また、通常のレーザー発振の終準位である ${}^4I_{11/2}$ 準位は $Y_1 \sim Y_6$ の 6 つの準位に分裂している。レーザー発振はこれら ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ 準位間の遷移で種々可能であるが、このうち波長 1064 nm の $R_2 - Y_3$ 遷移の遷移断面積が最も大きい。通常はこの波長域で強くレーザー発振する^{1,2)}。 ${}^4I_{11/2}$ 準位の上にある ${}^4I_{13/2}$ 準位は、 $X_1 \sim X_7$ の 7 つの準位に分裂しており、 $R_2 - X_1$ 遷移の 1319 nm や $R_2 - X_3$ 遷移の 1338 nm も比較的容易に発振させ得る⁴³⁾。Nd: YAG の最も長波長のレーザー発振は $R_1 - X_7$ 遷移の波長 1444 nm で得られ、その遷移断面積は 1338 nm のものよりさらに小さいが、808 nm の励起用 LD 光を Nd: YAG 結晶に 40 W 照射して、平均出力 4.9 W が得られている⁴⁴⁾。

また、通常のレーザー発振の終準位である ${}^4I_{11/2}$ の下に位置する基底準位の ${}^4I_{9/2}$ 準位は、 $Z_1 \sim Z_5$ の 5 つの準位に分裂している。これらの準位の分布数はボルツマン分布に

従い室温ではかなり大きくなるため、レーザー発振は準 3 準位動作となる。 Z_5 準位は基底準位の Z_1 準位から 848 cm^{-1} とかなり大きく離れているため、波長 946 nm の $R_1 - Z_5$ 遷移は室温発振が可能であり、BBO 結晶などを用いて波長通倍することにより波長 473 nm のブルーレーザー光が得られる⁴⁵⁾。また、レーザーロッドとしてレーザー結晶の両端面にアンドープ YAG 結晶を拡散接合した複合ロッドを用い、15°C の水で冷却した 946 nm 帯 Nd: YAG レーザーにおいては、LD 光励起入力 27.8 W にて 5.74 W とかなりの高出力が得られ、これを波長通倍したブルー光出力としては 550 mW が得られている⁴⁶⁾。

4. マイクロチップ Nd: 固体レーザー

レーザー媒質を薄くし、Q スイッチ素子や波長変換素子などをレーザー結晶と一体化して構成すれば、マイクロチップレーザーと呼ばれる超小型なレーザーが構成できる^{12,13)}。レーザーを小型化するには、レーザー材料として励起波長での吸収係数が大きく、かつレーザー発振の遷移断面積が大きなものが好ましく、この観点から Nd: YVO₄ など多用されている。

マイクロチップレーザーによれば、パルスエネルギーは小さくなるが、パルス幅のきわめて短い Q スイッチパルスを得ることが可能であり、LiTaO₃ 結晶による EO-Q スイッチと一体化した Nd: YVO₄ レーザーでは、パルス幅 115 ps、パルスエネルギー 12 μJ の短パルスが繰り返し周波数 1 kHz で得られており⁴⁷⁾、また Cr: YAG 結晶による受動 Q スイッチと一体化した Nd: YAG レーザーでは、CW 出力 1 W の半導体レーザーで励起して、パルス幅 218 ps、ピーク出力 15 kW 以上が得られている¹³⁾。また、半導体反共鳴ファブリー・ペロー可飽和吸収体 (A-FPSA: antiresonant Fabry-Perot saturable absorber) を用いたマイクロチップ Nd: YVO₄ レーザーでは、Q スイッチレーザーとしては現在最短と思われるパルス幅 56 ps の短パルスが繰り返し 27 kHz の高速繰り返しで得られて

いる⁴⁸⁾。

5. 1.5~3 μm 帯 LD 励起固体レーザー

5.1 1.5 μm 帯 Er: 固体レーザー

波長 1.5 μm 帯は光ファイバー通信として重要な波長域であり、Er 添加光ファイバーレーザー増幅器などが開発されている。またこの波長域のパルス励起 Er: 固体レーザーは、眼に比較的安全な eye-safe laser の一種として、レーザーレーダーなど環境計測用光源に用いられている。レーザー風速計測などに用いるコヒーレントライダ用として、LD 励起 Er, Yb: glass レーザーが開発された⁴⁹⁾。マイクロチップレーザーにより波長 1.53 μm にて CW 16.4 mW の単一周波数発振を実現し、これを基準光源として LD アレイスタックにて側面励起される Er, Yb: glass レーザーに注入し、パルス出力 2.5 mJ, パルス幅 200 ns のコヒーレント光パルスが繰り返し周波数 20 Hz にて得られている。本光源を用いてコヒーレントライダを構成し、距離 800 m までの風速が SN 比 10 以上にて測定されている。

5.2 2~3 μm 帯 LD 励起固体レーザー

2~3 μm 帯レーザーは、医療用や環境計測用光源として有用である。たとえば Tm: YAG レーザーなどは波長 2.02 μm などて発振するが、785 nm 帯で励起すると自己クロス緩和が生じ、吸収された励起光の光子 1 つについて 2 個の Tm イオンがレーザー始準位に励起されるというきわめて効率的な励起メカニズムが利用できるため、Tm: 固体レーザーは高効率なレーザーとして注目されている⁵⁰⁾。波長 785 nm で CW 3 W の LD を用いて Tm: YAG を励起し、波長 2.01 μm にて CW 760 mW, 光→光の変換効率 36%, スロープ効率 44% が得られており、また AO-Q スイッチ素子を用いて Q スイッチ発振させ、パルスエネルギー 1.2 mJ, パルス幅 380 ns の高ピーク出力の短パルスが得られている⁵¹⁾。高平均出力の Tm: YAG レーザーとしては CW 115 W のものまで実現している⁵²⁾。この場合、細長い Tm: YAG レーザーロッドを用い、これを吸収のピーク波長からずらした波長 805 nm の高出力 LD アレイスタックを用いて端面励起することにより高出力化を図っている。

Ho イオンを活性イオンとする Ho: Tm: YLF レーザーなどは、発振波長が例えば 2.052 μm など Tm: YAG レーザーなどよりやや長波長で発振でき、大気中の水蒸気による強い吸収を避けることが比較的容易であり、また Tm から Ho への効果的な励起エネルギーの移動が期待できるなどの特長があるため、コヒーレントライダ用光源

などとして精力的に研究されている⁵³⁾。Q スイッチ発振出力としては、例えばパルス幅 160 ns, パルスエネルギー 125 mJ の短パルスが繰り返し周波数 6 Hz にて得られている。Ho: YAG は波長 1.91 μm 領域に吸収のピークを有しているが、この波長域には出力 1 W 程度が得られる比較的高出力な GaInAsSb レーザーや InGaAsP レーザーなどの LD が入手可能になったので、短波長で Tm を励起して Tm から Ho に励起移動させる複雑なプロセスを経ないでも、LD 光で Ho を直接励起することが可能になった。1.9 μm 帯 LD にて Ho: YAG を直接励起して、波長 2.1 μm にて CW 0.7 W が得られている⁵⁴⁾。

波長 2.9 μm 帯には水の強い吸収があり、3 μm 帯の Er: 固体レーザーは、医療用や生物学研究用などとして重要である。固体レーザー材料としては、Er: YAG, Er: YSGG, Er: GGG, Er: BYF などの種々の結晶について、波長 0.97 μm 帯の LD を用いて励起が試みられている⁵⁵⁾。最近、厚さ 1 mm のアンドープ YAG 結晶に、厚さ 2 mm, Er 濃度が 50% の Er: YAG 結晶を拡散接合した複合レーザー結晶を用い、波長域 963.7 nm および 964.2 nm の 2 つの InGaAs レーザーを用いて励起し、励起光 4.4 W の入射に対して波長 2.94 μm にて出力 1.15 W, スロープ効率 34% の高効率・高出力なレーザー発振を実現しており、注目される⁵⁶⁾。

固体レーザーの最近の動向について、各種波長域で高出力な LD 励起固体レーザーに注目しつつ、それらの技術動向を解説した。LD 励起固体レーザーは設計の自由度が高く、加工、医療、計測等、広範な産業分野に急速に普及しつつある。まだレーザー溶接用などのキロワット大出力固体レーザーなどは、励起用 LD アレイが高価であるため当面の実用はランプ励起が中心となるが、高出力な LD アレイのコスト低減が進展しているため、2001 年ごろまでには高出力 LD 励起固体レーザーの生産ラインへの導入もかなり活発化しよう。今後、各種固体レーザーの励起用について特化して専用設計された各種波長域の高出力 LD アレイの開発や高輝度励起用光学系などの研究開発もますます活発化するものと期待される。

文 献

- 1) W. Koehnert: *Solid-State Laser Engineering*, 4th Ed. (Springer, Berlin, 1996).
- 2) 小林喬郎編: 固体レーザー, 日本分光学会測定法シリーズ 37 (学会出版センター, 1997).
- 3) 植田憲一: “極限レーザーとその応用”, 応用物理, 67 (1999) 513-523.

- 4) 高木宗谷：“自動車生産でのレーザ加工の役割”，レーザー学会学術講演会第19回年次大会予稿集（1999）pp. S1-S2.
- 5) 石出 孝，名山理介，下楠善昭，長島 是：“レーザ加工の重工分野での適用”，日本機械学会 [No. 99-2] 第1回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集（1999）pp. 113-114.
- 6) 鷲尾邦彦：“LD 励起固体レーザーの最近の進展”，レーザー研究，**24**（1996）316-323.
- 7) 山中正宣，中井貞雄：“レーザー装置の基礎：II，全固体化レーザー”，レーザー研究，**26**（1998）762-768.
- 8) M. W. Dowley, ed.: *Diode Pumped Solid State (DPSS) Lasers: Applications and Issues*, OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 17 (Optical Society of America, 1998).
- 9) D. S. Sumida, H. Bruesselbach, R. W. Byren, M. Mangir and R. Reeder: “High-power Yb:YAG rod oscillators and amplifiers,” *Solid-State Lasers VII*, ed. R. Scheps, SPIE, **3265** (1998) 100-105.
- 10) D. J. DiGiovanni: “High power fiber lasers and amplifiers,” *OSA Advanced Solid State Lasers Topical Meeting, Technical Digest, MA2* (1999) pp. 282-284.
- 11) S. A. Payne, R. J. Beach, C. Bibeau, C. A. Ebberts, M. A. Emanuel, E. C. Honea, C. D. Marshall, R. H. Page, K. I. Schafferes, J. A. Skidmore, S. B. Sutton and W. F. Krupke: “Diode arrays, crystals, and thermal management for solid-state lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3** (1997) 71-81.
- 12) 平等拓範：“マイクロチップ固体レーザー”，レーザー研究，**26**（1998）847-854.
- 13) J. J. Zayhowski: “Microchip lasers create light in small spaces,” *Laser Focus World*, **32**, No. 4 (April 1996) 73-78.
- 14) M. Marshall, C. Bibeau, A. Bayramian, R. Beach, C. Ebberts, M. Emanuel, B. Freitas, S. Fulkerson, E. Honea, B. Krupke, J. Lawson, C. Orth, S. Payne, C. Petty, H. Powell, K. Scheffers, J. Skidmore, L. Smith, S. Sutton and S. Telford: “Next-generation laser for inertial confinement fusion,” *Advanced Solid State Lasers*, eds. W. R. Bosenberg and M. M. Fejer, OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 19 (Optical Society of America, 1998) pp. 318-325.
- 15) M. Tsunekane, M. Ihara, N. Taguchi and H. Inaba: “Analysis and design of widely tunable diode-pumped Cr:LiSAF lasers with external grating feedback,” *IEEE Quantum Electron.*, **34** (1998) 1288-1296.
- 16) R. H. Page, J. A. Skidmore, K. I. Schaffers, R. J. Beach, S. A. Payne and W. F. Krupke: “Demonstration of diode-pumped and grating-tuned ZnSe:Cr²⁺ lasers,” *Advanced Solid State Lasers*, eds. C. R. Pollock and E. R. Bosenberg, OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 10 (Optical Society of America, 1997) pp. 208-210.
- 17) 猿倉信彦：“紫外レーザ用結晶”，光技術コンタクト，**35**（1997）663-669.
- 18) S. R. Bowman, L. B. Shaw, B. J. Feldman and J. Ganem: “A 7- μ m praseodymium-based solid-state laser,” *IEEE Quantum Electron.*, **32** (1996) 646-649.
- 19) S. G. Anderson: “Review and forecast of laser markets: 1998-Part I,” *Laser Focus World*, **34**, No. 1 (Jan. 1998) 78-97.
- 20) S. G. Anderson: “Review and forecast of laser markets: 1999-Part I,” *Laser Focus World*, **35**, No. 1 (Jan. 1999) 80-100.
- 21) レーザ加工調査専門委員会：“固体レーザー”，オプトニューズ，通巻112号，No. 4（1999）27-28.
- 22) S. Basu, J. Depsky, R. Shah and T. Endo: “Numerical design of 100-kW class solid-media lasers,” *SPIE*, **2989** (1997) 2-14.
- 23) D. Golla, M. Bode, S. Knoke, W. Schöne, F. von Alvensleben and A. Tünnermann: “High power operation of Nd:YAG rod lasers pumped by fiber-coupled diode lasers,” *Advanced Solid State Lasers*, eds. S. A. Payne and C. Pollock, OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 1 (Optical Society of America, 1996) pp. 198-201.
- 24) W. Schöne, S. Knoke, S. Schirmer and A. Tünnermann: “Diode-pumped CW Nd:YAG lasers with output powers up to 750 W,” *Advanced Solid State Lasers*, eds. C. R. Pollock and E. R. Bosenberg, OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 10 (Optical Society of America, 1997) pp. 292-295.
- 25) Y. Hirano, Y. Koyama, S. Yamamoto and K. Kasahara: “208 watts average power TEM₀₀ mode operation of diode-pumped Nd:YAG rod laser,” *CLEO '98, Conference on Lasers and Electro-Optics, Postdeadline Papers* (1998) CPD1.
- 26) A. Takada, Y. Akiyama, T. Takase, H. Yuasa and A. Ono: “Diode laser-pumped cw Nd:YAG lasers with more than 1-kW output power,” *OSA Advanced Solid State Lasers Topical Meeting, Technical Digest, MB18* (1999) pp. 69-71.
- 27) T. Brand and I. Schmidt: “Design and performance of a compact 600 W cw Nd:YAG rod laser system pumped by microchannel-cooled stacked diode laser arrays,” *CLEO/Europe 1996, Technical Digest, CMA4* (1996).
- 28) N. Hodgson and H. Weber: “Influence of spherical aberration of the active medium on the performance of Nd:YAG laser,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 2497-2507.
- 29) H. Weber: “Resonators for high power solid state lasers—The fight for beam-quality,” *SPIE*, **3267** (1998) 2-13.
- 30) T. Y. Fan and J. L. Daneu: “Thermal coefficients of the optical path length and refractive index in YAG,” *Appl. Opt.*, **37** (1998) 1635-1637.
- 31) D. C. Brown: “Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** (1998) 2383-2392.
- 32) J. Machan, R. Moyer, D. Hoffmaster, J. Zamel, D. Burchman, R. Tinti, G. Holleman, L. Marabella and H. Injeyan: “Multi-kilowatt, high brightness diode-pumped laser for precision laser machining,” *OSA Advanced Solid State Lasers Topical Meeting, Technical Digest, AWA2* (1998) pp. 263-265.
- 33) M. Sato, S. Naito, H. Machida, N. Iehisa and N. Karube: “1.7 kW high efficiency LD pumped Nd:YAG laser,” *OSA Advanced Solid State Lasers Topical Meeting, Technical Digest, MA2* (1999) pp. 3-5.
- 34) NEC Corporation: “LD 励起 Nd:YAG レーザ SL186A シリーズ”，ZFAYC-5468A (1998).
- 35) K. J. Snell and D. Lee: “High average power, high repetition rate side-pumped Nd:YVO₄ slab laser,” *OSA Advanced Solid State Lasers Topical Meeting, Technical Digest, TuB16* (1999) pp. 258-260.
- 36) Y.-F. Chen: “Design criteria for concentration optimization in scaling diode-end-pumped lasers to high powers: influence of thermal fracture,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **35** (1999) 234-239.
- 37) E. Armandillo, C. Norrie, A. Cosentino, P. Laporta, P. Wazen and P. Maine: “Diode-pumped high-efficiency high-

- brightness Q-switched Nd:YAG slab laser," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1168-1170.
- 38) Y. Kyusho, M. Arai, K. Mukaiyama, T. Yamane and K. Hotta: "High-energy subnanosecond compact laser system with diode-pumped, Q-switched Nd:YVO₄ laser," *Advanced Solid State Lasers*, eds. S. A. Payne and C. Pollock, OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 1 (Optical Society of America, 1996) pp. 382-385.
- 39) R. S. Afzal, A. W. Yu, J. J. Zayhowski and T. Y. Fan: "Single-mode high-peak-power passively Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1314-1316.
- 40) J. J. Chang, E. P. Dragon and I. L. Bass: "315 W pulsed-green generation with a diode-pumped Nd:YAG laser," *CLEO '98, Conference on Lasers and Electro-Optics, Post-deadline Papers* (1998) CPD2.
- 41) E. C. Honea, C. A. Ebberts, R. J. Beach, J. A. Speth, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel and S. A. Payne: "Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser producing more than 100 W of power at 0.532 μm ," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1203-1205.
- 42) M. Tsunekane, N. Taguchi and H. Inaba: "Elimination of chaos in a multilongitudinal-mode, diode-pumped, 6-W continuous-wave, intracavity-doubled Nd:YAG laser," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1000-1002.
- 43) P. Gavrilovic, M. S. O'Neil, J. H. Zarrabi, S. Singh, J. E. Williams, W. H. Grodkiewicz and A. Bruce: "High-power, single-frequency diode-pumped Nd:YAG microcavity lasers at 1.3 μm ," *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 1620-1622.
- 44) H. M. Kretschmann, F. Heine, V. G. Ostoumov and G. Huber: "High-power diode-pumped continuous-wave Nd³⁺ lasers at wavelengths near 1.44 μm ," *Opt. Lett.*, **22** (1999) 466-468.
- 45) 秋田智史, 井原正博, 東條公資, 吉岡善文, 大谷文彦: "完全固体ブルーレーザーの開発", *島津評論*, **51** (1995) 185-194.
- 46) T. Kellner, F. Heine and G. Huber: "Efficient laser performance of Nd:YAG at 946 nm and intracavity frequency doubling with LiJO₃, β -BaB₂O₄ and LiB₃O₅," *Appl. Phys. B*, **65** (1997) 789-792.
- 47) J. J. Zayhowski and C. Dill III: "Coupled-cavity electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ microchip lasers," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 716-718.
- 48) B. Braun, F. X. Kärtner, G. Zhang, M. Moser and U. Keller: "56-ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 381-383.
- 49) 浅香公雄, 平野嘉仁, 森本幸博, 笠原久美雄: "マイクロチップレーザーを基準光源に用いた Er, Yb: Glass コヒーレントライダ", *レーザー研究*, **26** (1998) 876-880.
- 50) R. C. Stoneman and L. Esterowitz: "Efficient, broadly tunable, laser-pumped Tm:YAG and Tm:YSGG cw lasers," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 486-488.
- 51) C. Li, J. Song, D. Shen, N. S. Kim, K. Ueda, Y. Huo, S. He and Y. Cao: "Diode-pumped high-efficiency Tm:YAG lasers," *Opt. Express*, **4** (1999) 12-18.
- 52) E. C. Honea, R. J. Beach, S. B. Sutton, J. A. Speth, S. C. Mitchell, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel and S. A. Payne: "115-W Tm:YAG diode-pumped solid-state laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1997) 1592-1600.
- 53) J. Yu, U. N. Singh, N. P. Barnes and M. Petros: "125-mJ diode-pumped injection-seeded Ho:Tm:YLF laser," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 780-782.
- 54) C. D. Nabors, J. Ochoa, Y. Y. Fan, A. Sanchez, H. K. Choi and G. W. Turner: "Ho:YAG laser pumped by 1.9- μm diode lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **31** (1995) 1603-1605.
- 55) B. J. Dinerman, J. Harrison and P. F. Moulton: "Continuous wave and pulsed laser operation at 3 μm in Er³⁺-doped crystals," *OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers, Vol. 20*, eds. T. Y. Fan and B. H. T. Chai (Optical Society of America, 1994) pp. 168-170.
- 56) D.-W. Chen, C. J. Fincher, T. S. Rose, F. L. Vernon and R. A. Fields: "Diode-pumped 1-W continuous-wave Er:YAG 3- μm laser," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 385-387.

(1999年4月8日受理)