

## スラブ型高出力10 kW全固体化レーザー

西川 祐司

ファナック(株) レーザ研究所 (〒401-0597 山梨県南都留郡忍野村)

### Slab-Shaped 10-kW All-Solid-State Laser

Yuji NISHIKAWA

Laser Laboratory, FANUC Ltd., Oshino-mura, Minamitsuru-gun, Yamanashi 401-0597

(Received February 3, 2003)

This paper describes the development of diode-pumped high-power slab Nd:YAG lasers. Employing the laser diode pumping method, we realized a highly efficient, high-power zigzag-slab laser with a small laser head volume. We found that it is still very important to realize the uniform pumped state and to greatly reduce the thermal lens even when using the slab media. After optimizing the pumping head, we obtained an average output power of 6.1 kW using a single YAG crystal with a laser head volume of 0.01 m<sup>3</sup>. Employing the polarization coupling method for two beams from two slab YAG lasers, we realized an average output power of 10.2 kW, an efficiency of 20.1 % and a laser head volume of 0.046 m<sup>3</sup>.

**Key Words:** All solid-state laser, Slab, Diode-pumped, High power

#### 1. はじめに

レーザー光を様々な加工に応用するため、高出力化・高効率化開発が盛んになっている<sup>1)</sup>。数kWクラス以上の高出力レーザーの用途としては高信頼・高精度な溶接が考えられる。「フォトン計測・加工技術」プロジェクトにおいて目標とした10kWクラスの高出力を、高効率を伴って実現するには発熱量の低減や冷却効率の向上といった開発が必要となり、レーザーの完全固体化がその開発の近道となる。完全固体化レーザーでは、励起光を従来のランプから半導体レーザー(LD)に置き換えることで大幅に発熱の低減が可能となる。LDを励起光として用いた場合、LD自体の電気から光への変換効率が50%程度と高いことと、発振スペクトルが狭く、それをレーザー媒体の吸収帯と一致させることができることで二重に高効率化が可能となる。しかし、固体レーザーでは負荷により媒体に温度分布が生じ、媒体内で発生するレンズ効果が問題となる。ロッド型レーザー媒体では構造上、この熱レンズ効果を無くすことができないが、スラブ型レーザー媒体を用いた場合には大きく熱レンズ効果を低減することができる<sup>2,3)</sup>。スラブ型レーザーは熱レンズ効果が低減できることで共振器が不安定になりにくく、単一の励起ヘッドを用いた高出力化、即ちコンパクトな高出力レーザーが実現できる可能性を持っている。スラブ型レーザーでは、1992年には既に米国ローレンス・リバモア研究所から厚み4 mm、幅16 mm、長さ90 mmのスラブ型結

晶を用いてパルス動作でkWクラスの平均出力が達成されたという報告がある<sup>4)</sup>。しかし、この際の変換効率は12%程度であり、今回のプロジェクトではコンパクトな10kWレーザーを達成するための更なる高効率化が重要な開発課題となった。また、従来からスラブ型レーザーはパルス駆動させた報告が多く、CW駆動で高出力化できるかどうかを確認することも重要な課題であった。これらの課題について明らかにするために、著者の研究グループではスラブ型レーザー媒体を使用し、主に単一結晶でのLD励起Nd:YAGレーザーの高出力化を追求し、最大6.1kWの平均出力が得られる励起ヘッドの開発に成功した。本稿ではこれに併せて、スラブ型レーザーの特長とCW型とパルス型を重畳した10kWレーザーの開発課程および結果について解説する。

#### 2. 高出力スラブ型レーザー研究開発の概要

前述のように、スラブ型レーザー媒体<sup>2,3)</sup>を使用することによって固体レーザーを高出力化する際に問題となる熱レンズ効果の低減が可能となる。この手法は以前から知られているものであり、はじめにスラブ型レーザー媒体の特長について簡単に述べた後、10kW化に至るまでの開発手法について述べる。開発は側面励起方式スラブ型レーザーに絞って行い、小さな出力から段階を追って高出力化開発を行った。また、最終目標である10kWレーザーについてはCW動作とパルス動作の重畳動作である

が、それ以外の出力特性については全てパルス動作の結果を示している。

## 2.1 スラブ型レーザー媒体による熱レンズ効果の低減

レーザー媒体を固体とした場合、励起による発熱と冷却との兼ね合いから媒体内に温度勾配が発生する。固体は温度変化により屈折率が変化するため、この温度勾配によりレンズ効果が発生する。これを固体レーザー媒体の熱レンズ効果と呼び、この効果のため固体レーザーは高出力化が難しい。レーザー媒体にスラブ型(薄板状)結晶を使用した場合、媒体内の温度勾配を制御することができる。即ち、熱レンズ効果を低減することができ、スラブ型レーザーでは単一結晶による高出力化が可能となる。Fig. 1は端面をブリュースター角に切り出したスラブ型媒体内部をレーザービームが伝搬する様子を示したものである。Fig. 1 (a)のように、ビームがジグザグに伝搬することでスラブ型媒体では熱レンズ効果を低減することが可能となる。このようなスラブ型レーザーを特にジグザグスラブ型と呼ぶことが多い。以下、スラブ型媒体は断らない限りジグザグスラブ型媒体のことを指す。

スラブ型媒体を使用する際には媒体の幅方向端面に断熱材を接触させる。この断熱材によりスラブ型媒体内部の発熱は幅方向の移動を遮断されるため、媒体の厚み方向にだけ熱の流れが発生する。結果として温度勾配は厚み方向だけに存在する状態となる。この温度勾配により厚み方向にだけ屈折率勾配が生じた状態となる。Fig. 1 (b)は、スラブ型媒体の厚み方向に温度(屈折率)勾配が発生した様子を模式的に表わしたものである。レーザービームが結晶内部をジグザグに進行するため、Fig. 1 (b)に示す4本全ての光路において媒体内部の屈折率勾配から同じ影

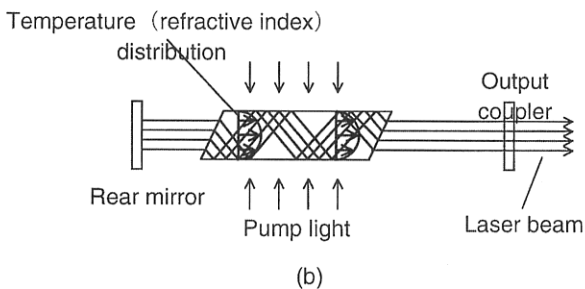
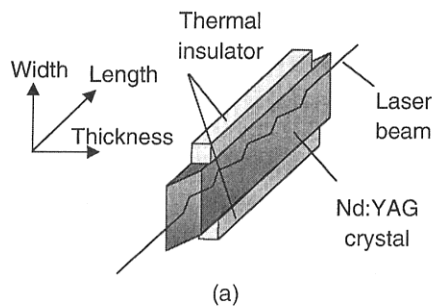


Fig. 1 Slab-shaped laser medium. (a) directions of slab medium (b) cross section of the resonator.

響を受けることになる。従って、厚み方向にも熱レンズ効果を低減することが可能となる。以上のように、スラブ型媒体では幅方向、厚み方向共に熱レンズ効果の低減が可能となり、単一結晶を用いた高出力化が可能となる。実際の系では完全に理想的な状態を作り出すことが難しく、スラブ型レーザーでも熱レンズ効果は存在する。

## 2.2 片面励起方式による1 kWスラブ型レーザー

完全固体化スラブ型レーザーの開発は、はじめにFig. 2 (a)に示すような片面励起方式により1 kW出力を得る実験を行った<sup>5)</sup>。高効率化のため、Fig. 2 (a)のように3つの1 cm LDスタックをスラブ型レーザー媒体に向けて配置し、フローチューブのLDスタックと反対側の面に金反射膜をコーティングすることで一度目の入射で吸収されない光を媒体に戻す構造とした。このような単純な励起配置で、厚み6 mm、幅25 mm、長さ206 mmの大型スラブ型結晶を用いて、Fig. 2 (b)に示すように予想を大幅に上回る最大平均出力1.7 kW、光-光変換効率42%を実現することができた。

## 2.3 両面励起方式による3 kWスラブ型レーザー

1.7 kWまでの出力はスラブ型媒体の片方の側面から励起するだけで得られたが、3 kW出力を得るためには励起光が2倍必要となるため、両側面から励起する必要が生じた。Fig. 2 (a)の構成を用いて単純に両側から励起するとLDスタックと反対の面にある高反射面の効果が得られないことになる。そこでFig. 3 (a)のようにスラブの上下についてFig. 2 (a)の励起構成を回転対称に配置し励起する構造により3 kWレーザーを開発した<sup>6)</sup>。出力特性を同じく

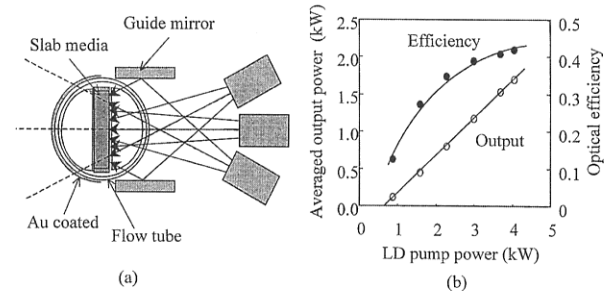


Fig. 2 One-side-pumping head. (a) cross section (b) output characteristics.

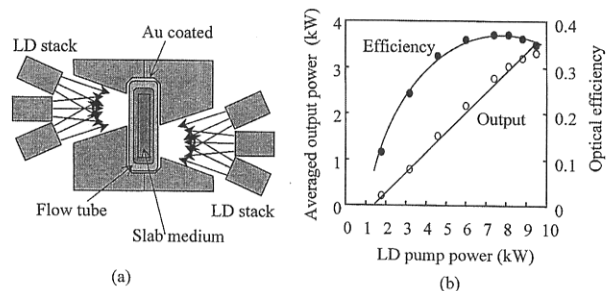


Fig. 3 Two-side-pumping head. (a) cross section (b) output characteristics.

Fig. 3 (b)に示している．最大平均出力3.3 kWが得られ，光-光変換効率は37%であった．両面励起により最大出力は2倍になったが，光-光変換効率は低下した．これはレーザー媒体に照射された励起光が一度目の照射で吸収される確率が低く，吸収されなかった励起光が励起系から漏れ易い構造であるからだと考えている．

2.4 励起光閉じ込め方式による高効率化

両面励起方式を用いた3 kWレーザーの試作で光-光変換効率が低下したことから，やはり一度目の照射により吸収されなかった励起光を再利用しなければ高効率化できない可能性があることが分かった．そこでLD励起光を高効率に閉じ込める方式を検討した．1 cm幅のLDスタックのロー軸方向にシリンダリカルレンズを使用すると5.6 mmまで集光できる．全反射膜で囲んだ領域に間隙を作り，LDスタックの光を注入すれば高効率に励起光が利用可能となる．更に，2列目のLDスタックからの励起光を同じ間隙から入射すると2つのLDスタックを5.6 mmに集光できることになる．このような考えからFig. 4 (a)のような励起ヘッドを設計した．Fig. 4 (b)に示すように，最大出力3.0 kWが光-光変換効率49%で得られた．この際の電気-光変換効率は17%であった．最大出力が若干低減されたが，これは使用できるLDスタックが3分の2になったためである．効率はFig. 3 (b)に示すような光学系のない両面励起ヘッドに対してFig. 4 (b)に示す励起光閉じ込め方式では光-光変換効率が約3割向上していることが分かる．

2.5 スラブ型レーザー媒体の均一励起と熱レンズ効果の低減

単一結晶を用いて更に出力を2倍にするためには，レーザー媒体の均一励起と熱レンズ効果の低減が必要であることが分かった．それらが実現できる構成を検討するため，比較的取り扱い易い3 kWレーザーを土台にして改良を進めた<sup>7)</sup>．

この頃，2倍の光強度を持つLDスタックが市販されるようになり，Fig. 4の断面図における2つのLDスタックを1つにすることが可能となった．このことで更に3 kWレーザーが取り扱い易くなった．また，LDスタックの集光について検討を進めたところ，ロッド型レンズで2.3 mmまで集光可能でありシリンダリカルレンズより集光できる

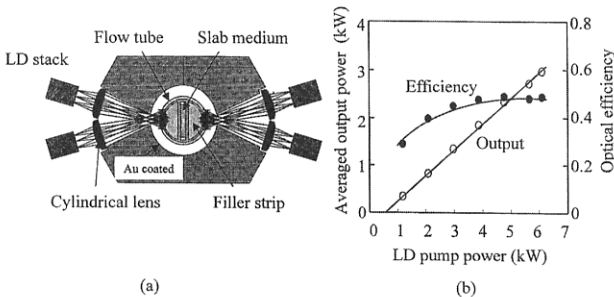


Fig. 4 Highly closed pumping head (cylindrical lens type). (a) cross section (b) output characteristics.

ことが分かった．Fig. 5はロッド型集光レンズを用いた励起ヘッド断面図である．スラブ型媒体とその冷却部を覆うように高反射面が存在し，その2箇所にスリット状の開口が形成されている．LD励起光はロッド型集光レンズによって集光され，スリット状の開口を通過する構成となっている．

Fig. 5 (a)の励起ヘッドにおいてスラブ型媒体の周囲をFig. 5 (b)のように改良し，レーザー媒体をより均一に励起できる構成としている．フローチューブ内部の冷却水の流速を速める効果を持つフィラーストリップの形状を変更し，凹面を設けて励起光を分散させる設計した．フローチューブの表面にも拡散処理を施し，励起が均一になるようにしている．

スラブ型媒体では両端に接触させる断熱材質により媒体幅方向の熱レンズ効果に変化する．Fig. 5の励起構成において最適な断熱材質を選択することで媒体幅方向の熱レンズ効果を低減することができる．数種類の断熱材を試した結果，アルミナと酸化シリコンを組み合わせたセラミクス(三井鉱山マテリアル社製ムライト\*)が最適材質であることが分かった．

均一励起や熱レンズ効果低減といった開発を行い最適化されたFig. 5に示す励起ヘッドを，2つのLDスタックを用いて媒体を2方向から励起するため我々は2方向励起ヘッドと呼んでいる．このような励起ヘッドの出力特性を評価した．ここで，出力鏡反射率は80%で，出力鏡，リア鏡には球面鏡を用い，共振器長は400 mmとした．媒体にはNd濃度0.9%のスラブ型Nd:YAG結晶を用い，その形状は厚み6 mm，幅21 mm，長さ206 mmとし，励起ヘッドの全反射面にはAuコートを使用した．Fig. 6に示すよう

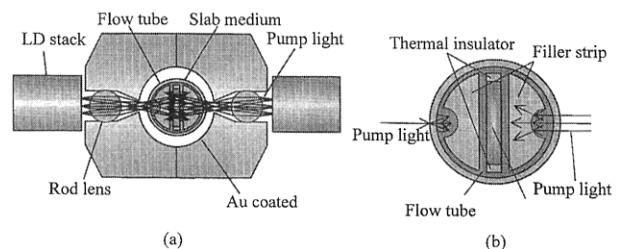


Fig. 5 Cross section of the highly closed pumping head (2-direction pumping head).

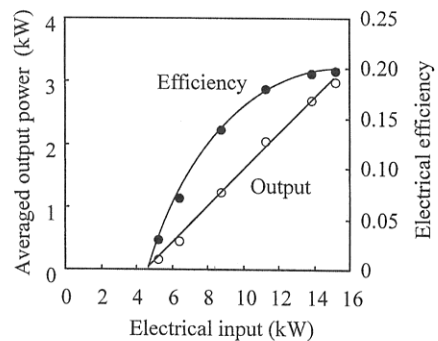


Fig. 6 Output characteristics of the 2-direction pumping head.

\*三井鉱山マテリアル株式会社カタログ，URL: <http://www.mitsui-mmc.co.jp>

に最大平均出力3 kWが電気-光変換効率20 %で得られた。このとき、LDスタックの効率は45 %、光-光変換効率44 %であった。幅を21 mmにしたのは媒体側面を完全に均一に励起するためである。シリンジカルレンズで集光したFig. 4の光-光変換効率49 %よりも小さくなっているのは全体を均一に励起するように最適化したことで励起光が分散し利得が低下したためであると考えている。

## 2.6 4方向励起ヘッドの開発

2方向励起ヘッドでレーザー媒体の均一励起手法と熱レンズ効果の低減手法が分かったので、単一結晶による更なる高出力化を進めることにした。2方向励起ヘッドでは最大出力はLDスタックの出力(励起光入力)に依存していたため、更に高出力化するためにはLDスタックの数を増やす必要があった。そこでYAGレーザー出力を2倍にすることを目標とし、LDスタックの数を4個と倍増したFig. 7に示す励起ヘッドを開発した。LDスタックに対してロッドレンズを使用し、励起ヘッド内に励起光を閉じ込める構成は2方向励起ヘッドの手法を踏襲している。このような設計では、励起光を入射する間隙の数が4個に増加するが、表面積比で10 %程度であるので効率の低下はあまり大きくないと考えている。また、レーザー媒体への励起密度が向上することにより利得が増加し、効率が向上することが期待される。この4方向励起ヘッドにおいても均一励起が必要であるため、2方向励起ヘッドと同様にフィラーストリップの形状もFig. 7 (b)に示すように最適化した。

4方向励起ヘッドの出力特性をFig. 8に示す。共振器の構成は出力鏡、リア鏡共に球面鏡を用い、共振器長は300 mmとし、出力鏡の反射率は40 %に設定した。動作条件は

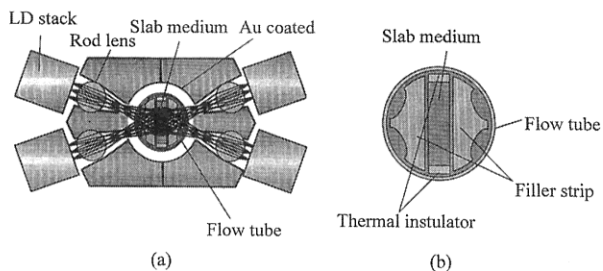


Fig. 7 Cross section of the 4-direction pumping head.

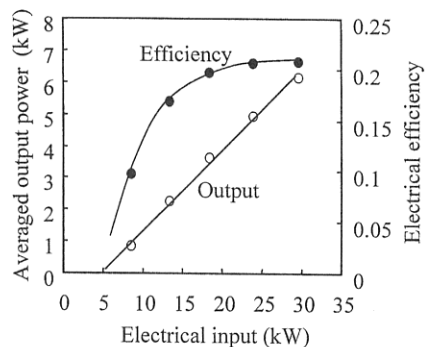


Fig. 8 Output characteristics of the 4-direction pumping head.

パルス幅500  $\mu\text{sec}$ 、繰り返し周波数800 Hz(デューティ40 %)とした。目標通り、最大平均出力6.1 kWを電気-光変換効率20.7 %で達成した。スラブ型媒体の形状は厚み6 mm、幅25 mm、長さ206 mmとした場合に6.1 kWが得られ、同じ励起ヘッドに21 mm幅の媒体を使用し、完全に均一な励起をした場合には媒体の破壊限界により最大出力5.2 kWまでしか得られなかった。25 mm幅の媒体で若干不均一な励起をした場合の最大出力は破壊限界ではなく共振器の安定性で決まっていた。また、この6.1 kWという大きな出力を達成した共振器は300 mmという共振器長により、Fig. 9に示すようにレーザーヘッド体積0.01  $\text{m}^3$ を実現している。

## 2.7 出力10 kW試作機の開発

4方向励起ヘッドの開発により単一励起ヘッドで6.1 kWまで得られるようになった。「フォトン計測・加工技術」プロジェクトの最終目標は平均出力10 kW以上、電気-光変換効率20 %以上、レーザーヘッド体積0.05  $\text{m}^3$ 以下であり、この出力目標を達成するために2ヘッド化する必要性が生じた。後述するが、ジグザグスラブ型レーザーは効率的なスケラブル結合ができない。そこで、ジグザグスラブ型レーザーの利点である出射ビームが直線偏光であることを利用し、Fig. 10のような構成で2個の4方向励起ヘッドを偏光ビームスプリッターで偏光結合し10 kW発振器を試作することにした。パルス型4方向励起ヘッドの出力に対して2分の1波長板で偏光を90°回転させ、CW型4方向励起ヘッドの出力と偏光ビームスプリッターで結合する。これによりプロジェクトの目標に含まれていたCW動作とパルス動作の重畳動作も同時に達成できる。

パルス型ヘッドを平均出力6.1 kW(パルス幅500  $\mu\text{sec}$ 、繰り返し周波数800 Hz、デューティ40 %、指令電流120 A)、CW型ヘッドを出力4.4 kW(指令電流47.5 A)で同時駆動したとき、Fig. 11に示すように平均出力10.2 kWを電気-光変換効率20.1 %で達成することができた。偏光ビームスプリッターによるビーム結合での結合損失は3 %程度であった。また、レーザーヘッド体積も実測値で0.046  $\text{m}^3$ であった。以上のように「フォトン計測・加工技術」プロジェクト開始時に掲げた最終目標を全て達成した。

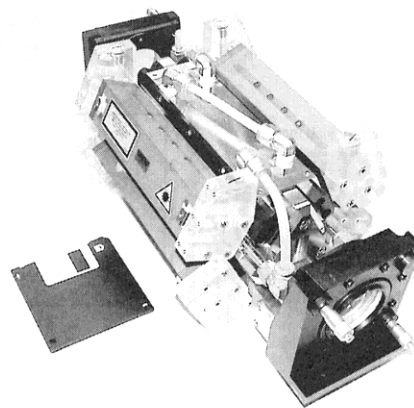


Fig. 9 A picture of the slab laser head with an output power of 6.1 kW (a head volume of 0.01  $\text{m}^3$ ).

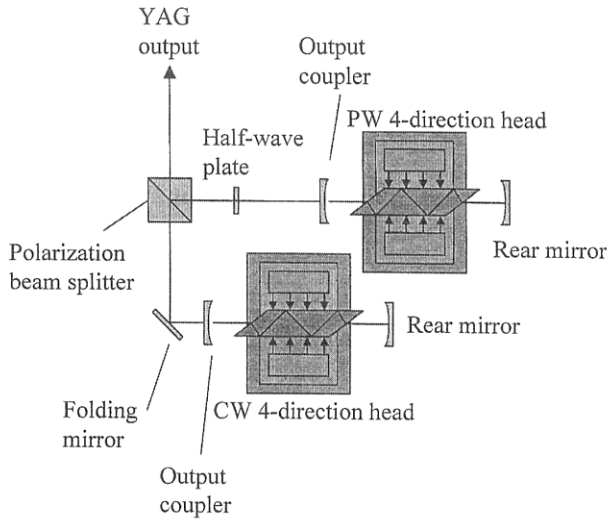


Fig. 10 Schematic diagram of the 10-kW laser.

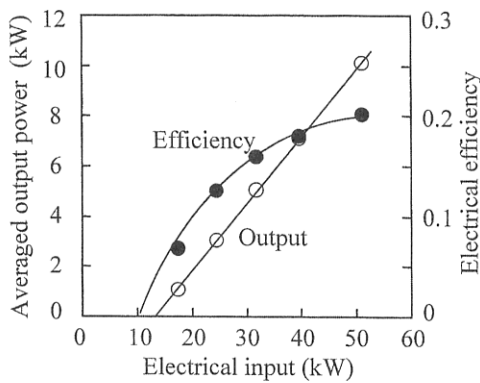


Fig. 11 Output characteristics of the developed 10-kW laser.

### 2.8 検討

このように単一結晶での励起ヘッドにより最大出力を追求してきた結果、パルス型で6.1 kW、CW型で4.4 kWという初期目標であったコンパクトな高出力レーザーを開発することができた。我々はパルス型とCW型で最大出力が大きく異なる原因を次のように解析している。ジグザグスラブ型媒体を使用した場合、レーザー媒体内全反射面付近の温度が高くなっている<sup>8)</sup>。パルス動作で使用する場合には全反射面を直接水冷することにより各パルス間で冷却され理想的な廃熱構造となるが、CW動作の場合には全反射面に対して冷却だけが行われる時間がなく、全反射面付近に発熱が蓄積され、厚み方向に大きな負の熱レンズが発生する。このように、負の熱レンズ効果が大きく共振器が不安定になり易いCW型では、パルス型と比較して3分の2の出力で共振器が不安定になったと解析している。また、幅21 mmの実験結果に示されるようにスラブ型結晶側面を完全に均一励起すると、結晶の側面付近だけが膨張し割れ易くなる。そのため幅25 mmとし、励起しない部分を2 mmずつ取ると、この2 mmが「のり代」のような役割を果たすことで側面積を増加させた割合以上に破壊限界を向上させることができることが分かった。

また、ロッド型レーザーでは励起ヘッドの直列結合に

よるレンズ導波路を構成することで高出力化が可能だが、スラブ型レーザーではこの負の熱レンズ効果により励起ヘッドから出た光が広がってしまうため、レンズ導波路を構成することができない。このような特性からスラブ型レーザーを用いたCW動作での更なる高出力化は困難であると考えている。パルス動作ではスラブ型レーザー媒体は、前述のように理想的な廃熱構造となるため、ハイピークパルスが可能となる。しかし、実験結果から判断すると理想的に冷却されているということ、溶接用途に必要な100 mm・mrad(全角全幅)のビーム品質を維持できる範囲であると定義すると、平均出力が3 kW以下のレベルまでであり、これ以上平均出力を向上させることは困難であると考えている。

理論的にはスラブ型レーザーは熱レンズ効果が低減できるが、非常に高い負荷の下では熱レンズ効果が発生し、特に高出力化には不適当な負の熱レンズ効果が発生することで高出力化が妨げられる。今回の開発ではコンパクトな5 kWクラスのレーザーを開発することができたが、スラブ型レーザーの理想的な系を実現するには更なる技術開発が必要である。

### 3. まとめ

単一結晶での高出力化が可能なスラブ型レーザー媒体を使用してLD励起による全固体化レーザーを開発した。体積0.01 m<sup>3</sup>の単一励起ヘッドで最大平均出力6.1 kW、電気-光変換効率20.7%の特性が得られた。また、開発した励起ヘッドを2つ使用し、偏光結合する構成で10 kWレーザーを試作した。レーザーヘッド体積0.046 m<sup>3</sup>において、平均出力10.2 kWを電気-光変換効率20.1%で達成し、「フォトン計測・加工技術」プロジェクトの開発目標を達成した。

コンパクトな5 kWクラスのレーザーの開発には成功したが、プロジェクト前に課題だと考えられたCW動作での高出力化では、負の熱レンズ効果が発生するスラブ型レーザーはCW動作に適さないことが判明した。パルス動作では理想的な廃熱構造となり使用するメリットが大きいことも判明した。我々が集中して開発した全反射面を励起する手法でなく、スラブ型レーザー媒体を端面から励起する手法もあり、まだ検討の余地はあるが、溶接用途である出力4 kW以上のCW動作固体レーザーを商品化するにはスラブ型レーザーでは技術的な課題が多い。

### 謝辞

本研究は(財)製造科学技術センターの付置機関であるフォトンセンターの支援のもと、「フォトン計測・加工技術」プロジェクトの一環として行われたものであり、関係者各位に深く感謝いたします。

### 参考文献

1) W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering* (Springer-Verlag, 4th

- Ed., Berlin, 1996).
- 2) W. S. Martin and J. P. Chernoch: US Patent 3633126 (1972).
  - 3) J. P. Chernoch, W. S. Martin, and C. Almasi: *Performance Characteristics of a Face Pumped Face-Cooled Laser, the mini-FPL*. Tech. Rept., Air Force Avionics Lab. (Wright Patterson AFB, Ohio, 1971) AFAL-TR-71-3.
  - 4) B. J. Comaskey, R. Beach, G. Albrecht, W. J. Benett, B. L. Freitas, C. Petty, D. VanLue, D. Munding, and R. W. Solarz: *IEEE J. QE-28* (1992) 992.
  - 5) 佐藤 雅夫, 内藤 真哉, 町田 久忠, 家久 信明, 軽部 規夫: レーザー学会第19回年次大会予稿集 (1999年1月) 42.
  - 6) M. Sato, S. Naito, N. Iehisa, and N. Karube: *Proc. SPIE 3889* (1999) 182.
  - 7) 佐藤 雅夫, 内藤 真哉, 軽部 規夫: レーザー学会第21回年次大会予稿集 (2001年1月) 61.
  - 8) Y. Nishikawa: The Final Report of the "Advanced Photon Processing and Measurement Technologies" (2002) II-1.