

高出力連続動作 Yb 添加バルク固体レーザー

常包 正樹*・大石 裕**・平等 拓範*

High-Power Continuous-Wave, Yb-Doped Solid-State Lasers

Masaki TSUNEKANE*, Yu OISHI** and Takunori TAIRA*

A novel solid-state laser material of composite all-ceramic Yb:YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) is applied as a source of a high-power, diode edge-pumped microchip laser for industrial applications. 520 W quasi-continuous-wave (qcw) (10% duty) and 414 W continuous-wave (cw) output powers were obtained from the 3.7-mm-diameter, Yb-doped ceramic core with a 200- μ m-thickness. The slope and optical-to-optical conversion efficiencies were 56% and 52% in qcw, and 47% and 44% in cw operation, respectively. The extracted, maximum cw output power density emitted from the ceramic core area is 3.9 kW/cm² and the volume density is 0.19 MW/cm³. The M^2 factor less than 7 up to cw 200 W was obtained. The maximum thermal stress in the ceramic core is estimated to be 384 MPa at the non-cooled surface and is twice the tensile strength of single-crystal YAG. Yb:YAG ceramic is suitable for high-power and high-beam-quality solid-state lasers.

Key words: laser, solid-state, diode-pumped, Yb:YAG, ceramic, giant-microphtonics

金属加工をはじめとする産業用高出力レーザーとして近年、新しく Yb 添加のバルク固体レーザーが注目され、急速に普及が進んでいる。本解説では、Yb 添加固体レーザー媒質として代表的な Yb:YAG (イットリウム・アルミニウム・ガーネット) を取り上げ、われわれが高輝度高出力連続動作レーザーとして研究開発を進めている、半導体レーザーを励起源としたエッジ励起 Yb:YAG マイクロチップレーザーを中心に、Yb:YAG レーザーの特徴と発振特性について報告する。

1. Yb 添加バルク固体レーザーの特徴

固体レーザーは、ガスレーザーや色素レーザーのようなレーザー媒質の循環や交換の必要がないため、小型で高信頼のレーザー光源として産業用をはじめ、広い分野で利用されている。特に発振波長 1 μ m 帯の固体レーザーは、石英ファイバーによる低損失の光伝搬が可能であるため加工位置までエネルギーの搬送が容易で、三次元形状の複雑な加工を行う際の光源としても有用である。希土類の元素と

して Nd を添加した YAG レーザー (Nd:YAG レーザー) は、励起光源としてランプだけでなく、小型で吸収効率の高い波長 808 nm の半導体レーザー (LD) も利用できるため小型高効率動作が可能で、現在産業用バルク固体レーザーでは最も普及が進んでいる。

加工に使用されるレーザーの動作方式としては、常時光が出ている連続動作 (continuous-wave; cw) と、断続的に光を出すパルス動作がある。後者の場合、固体レーザー媒質がもつエネルギーの蓄積作用も生かして、ナノからフェムトといった短い時間幅で非常に高い強度の光を出すことが可能であり、加工点の周囲に熱的な変性や変質の少ない加工を行うことができる。一方で、金属の切断や溶接、半導体の再結晶化など、大量の熱エネルギーを要する加工では、高繰り返しあるいは連続動作のレーザーが広く用いられている。

産業用の平均出力 10 W を超える高出力バルク固体レーザーでは、円柱状の固体レーザー媒質 (レーザーロッド) を光軸に沿って配置し、その側面からランプや LD からの

* 分子科学研究所分子制御レーザー開発研究センター (〒444-8585 岡崎市明大寺町西郷中 38 番地) E-mail: tsune@ims.ac.jp

** 理化学研究所緑川レーザー物理工学研究室 (〒351-0198 和光市広沢 2-1)

励起光を照射する側面励起が主流である。しかしながら、媒質内で発生した熱によりロッド中心の温度が上昇し、それを起因として屈折率が変化する、いわゆる熱レンズ効果や熱複屈折効果が発生する。これにより中を透過するレーザー光の波面が乱れ、高次横モードが支配的になり、取り出されるレーザー光の集光性能は光の波長から予測される理想的な集光限界に比べ、1桁以上劣るのが一般的である。特に金属の切断用途では、スルーットを上げるために加工点で高い集光強度が必要である。また、リモート溶接といった最近の新しい加工手法においても、加工用レーザーに高い集光性能が要求される。固体レーザー媒質内での熱による集光性能（ビーム品質）の劣化、これが固体レーザーの産業応用を制限しているひとつの大きな原因である。

これに対し90年代より、Nd:YAGと同じく $1\mu\text{m}$ 帯の発振波長で、LD励起（波長940nm）が可能なYb添加のYAGレーザー（Yb:YAGレーザー）が注目され研究が進められてきた¹⁻³⁾。Yb:YAGはNd:YAGと比べ、LD励起光と発振光の波長が近いこと、両者のエネルギー差から生じる発熱がNd:YAGの3分の1と非常に少なく高効率高出力動作が可能⁴⁾、励起光の吸収波長帯が $\sim 20\text{nm}$ と1桁広いこと、励起LDの波長許容幅や温度許容幅も広い、10at.%程度のYb高濃度添加においてもレーザー発振特性の劣化が小さいこと、マイクロチップ化しても高効率動作が維持できる、さらに蛍光波長幅が10nm程度と広く波長可変や超短パルス動作も可能といったすぐれた利点、特徴がある⁵⁻⁷⁾。反面、準四準位レーザーの特徴として、Nd:YAGに比べ誘導放出断面積が小さく発振閾値が高い、自己吸収がある、温度上昇に伴う発振特性の劣化が大きいという欠点がある。このためNd:YAGと同じ励起構成では、かえって出力や効率が低下してしまう場合が少なくない。Yb:YAGの特徴を生かすためには、排熱効率の高い新しい励起構成が必要である⁸⁻¹⁰⁾。

バルク固体レーザーにおいて排熱効率の高い励起構成とは、レーザー媒質の体積に対し、放熱する表面積の割合の広い、レーザー媒質を細長くのばしたファイバー型と平べったくしたディスク型の2つが対極の理想構成としてあげられる¹¹⁾。ファイバー型とはその名の通りファイバーレーザーであり、本特集でも取り上げられているので詳細は割愛するが、最近ではkWオーダーの出力で連続動作可能なものが製品化され産業用に用いられている。ただし、ファイバーという特殊形状への媒質の加工やファイバーコアへの励起光の導入する光学系が複雑なためコストが高いこと、またダメージの点から高ピークのパルス動作は現状で

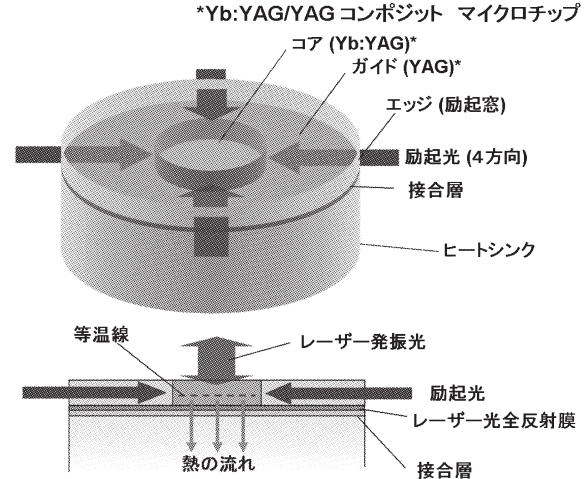


図1 エッジ励起 Yb:YAG マイクロチップレーザーの構成。

は難しい。一方、ディスク型のレーザーは、ドイツのシュツットガルト大学で94年にアクティブミラー型で実験結果¹²⁾が報告されて以降、同大学を中心に、国家プロジェクトとしてドイツ国内企業が参加して精力的に開発が進められた¹³⁾。現在では、製品として平均出力kWクラスのYb:YAG薄ディスク型レーザーが、日本国内でも金属加工の現場で使用されはじめている¹⁴⁾。

本稿で解説するエッジ励起 Yb:YAG マイクロチップレーザー^{15,16)}は、分子科学研究所の平等らが2000年ころより開発を始めたもので、形状としては同じアクティブミラー型であるが、ドイツの薄ディスクレーザーとは異なる励起方式により、高い排熱性を維持しながら、さらに小型化、高性能化が可能で、将来産業用の高出力バルク固体レーザーとして有望な方式であると考えている。

2. LD エッジ励起 Yb:YAG マイクロチップレーザーの構成

図1に、エッジ励起 Yb:YAG マイクロチップレーザーの基本構成を示す。薄板状のマイクロチップはコンポジット構造を有し、中央にレーザー発振を行う Yb:YAG コア、そのまわりには Yb を添加していない YAG が形成されている。マイクロチップ片面のコア領域は、熱伝導性の高い接合層を介してヒートシンクに密着され放熱される。LDからの励起光は、外周の YAG 側面（エッジ）からコアの Yb:YAG に向け導入される。この外周の YAG 領域は励起光ガイドとして機能し、励起光は YAG 内で全反射で伝搬し、中央の Yb:YAG コアで吸収される。レーザー発振器は、コアのヒートシンクに接合させていない面を通して外部の共振器ミラーとの間で構成される。このためヒートシンクに接合するコアの表面には、予めレーザー発振

表1 薄ディスク方式とエッジ励起方式の比較.

	長 所	短 所
薄ディスク方式	<ul style="list-style-type: none"> ・コンポジット構造が不要 ・励起光と発振光のモードマッチング効率が高く効率がよい ・周回状の寄生発振が起こりにくい ・ソフトアパーチャー効果でビーム品質が高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・多重反射励起光学系が複雑でヘッドが大型化 ・ディスクに近接して光学素子が配置できない ・チップ裏面に励起光, 発振光双方に対する全反射コートが必要 ・ヒートシンク側に励起光が漏れる
エッジ励起方式	<ul style="list-style-type: none"> ・励起光学系が簡単でヘッドが小型化できる ・高出力化が容易 ・コアでの励起光吸収量がチップの厚みに依存しない ・全反射のため励起光がヒートシンク側に漏れにくい 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー媒質にコンポジット構造が必要 ・媒質が薄くなると励起光の導入が難しい ・マイクロチップの加工面が多くコスト高

光を全反射する誘電体多層膜が形成されている。コアの片面が直接ヒートシンクに接合することにより、効率のよい冷却が可能になるだけでなく、図に示すようにコア内の温度分布（等温線）が発生するレーザービームに垂直になるため、熱レンズ、熱複屈折効果が原理的に小さい。この特徴は、ドイツの薄ディスク型レーザーと同一であり、側面励起の薄ディスク型レーザーとよばれることもある。

表1に両者の特徴の比較をまとめた。エッジ励起マイクロチップレーザーの特徴は、まず励起の光学系が簡便であるということである。薄ディスク型レーザーではディスクの厚み方向に励起光を照射するが、結晶の厚みが200 μm 前後と非常に薄いため、活性領域にレーザー発振に必要なエネルギーを吸収させるために、10~20回以上励起光を結晶内に往復させるための反射光学系が必要である。最近では光学系の構成も小型化され、パラボリックミラーが用いられているが、ディスク前面に励起光往復光学系のための大きな空間が必要で、小型化や共振器構成に限界がある¹⁴⁾。

これに対しエッジ励起型では、通常の透過集光光学系でLDからの励起光をマイクロチップのエッジに導入してやればよい。導入された励起光は結晶内を伝搬し、活性領域のコア内に吸収される。励起光はマイクロチップコアの厚み方向ではなく径方向に進むため、1回のパスでも数mmの長さにより活性領域を通過するので、70%以上の励起光エネルギーを吸収させることが可能である。さらに、励起光はガイドのYAG内を全反射で伝搬するため、エッジからコアまでの距離が長くなっても損失がない。そこで、ガイドの外径を大きくし外周（エッジ）を長くすることで、より多くのLDをエッジに並べコアに集光することができるので、出力のスケールビリティが高い。また、エッジ励起マイクロチップレーザーの大きな特徴として、励起光のコアでの吸収率がチップの厚みに依存しないという点も高出力化に非常に有利である。しかしながら、マイクロチップとして予めコアを有するコンポジット構造を形

成しておく必要がある。

エッジ励起 Yb:YAG マイクロチップレーザーの実証実験としては、分子研の Pavel¹⁶⁾、Dascalu らが2002年に qcw 動作でピークパワー 112 W¹⁷⁾、2003年には cw 動作で 90 W¹⁸⁾を得ることに成功している。このとき用いられたマイクロチップは、Yb:YAG 単結晶のコアの周囲に無添加 YAG の単結晶を拡散接合により接合したもので、コアの外径形状は多角形であった。同じグループの常包らは、2005年に Yb:YAG 単結晶の周囲に無添加のセラミック YAG を形成した構造をマイクロチップに採用した。同時に熱抵抗を低減した小型水冷ヒートシンクを開発し^{19,20)}、qcw 動作でピーク出力 410 W、cw 動作でも 285 W の出力を得た²¹⁾。さらに、Au-Sn ハンダによりマイクロチップとヒートシンクを高均一に接合する技術の開発に成功することで、2006年には cw 出力で 300 W^{22,23)}を得ることに成功し、2007年にはコアの Yb:YAG にもセラミックを採用し、チップの厚みを 200 μm まで薄くすることで qcw 動作で 520 W、cw 動作で 410 W と光出力の大幅な向上にも成功している²⁴⁾。以下では、その典型的な特性について紹介する。

3. 発振特性

図2は、神島化学工業にて開発されたオールセラミックコンポジット Yb:YAG/YAG ロッド（右）と、そこからスライスし励起光導入する直線状の4か所のエッジを加工し、コーティングを行ったマイクロチップ（左）の外観写真である。中央に $\phi 3.7\text{ mm}$ の Yb:YAG セラミックを有する。このコンポジット構造の製法はユニークで、セラミックが焼成する際に体積が60%程度まで収縮することを利用し、すでに焼成済みの Yb:YAG セラミックロッドを、まだ焼成していない YAG ブロックに開けた穴に挿入し、全体を昇温することで外側の YAG ブロックのみが収縮し、中の Yb:YAG ロッドと一体化するというものである。この製法は、外周のセラミックの収縮を非常に高度に

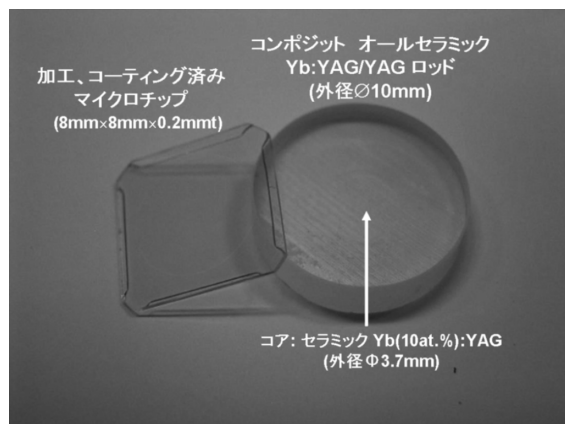


図2 コンポジットオールセラミック Yb:YAG ロッドと加工済みマイクロチップの外観写真。

制御する必要はあるものの、拡散接合では作成が困難であった完全な円形形状のコアを有するコンポジット構造を、1回のプロセスで製作することができるようになった。将来量産化、低価格化にも対応可能な製造技術である²⁵⁾。なお、焼成済みの Yb:YAG セラミックロッドの代わりに単結晶 Yb:YAG ロッドを使えば、コアが単結晶のコンポジット構造が作製できる²³⁾。

図3は、マイクロチップをヒートシンクに接合した外観写真である。Yb:YAG は発熱が少ないとはいえ、1 kW の励起光を吸収すれば約 100 W の発熱が予想され、それが ϕ 3~5 mm のコア内で発生すると 1 kW/cm² 程度の発熱密度となり、排熱能力の高いヒートシンクが必要になる。写真の水冷ヒートシンクはエッジ励起用に設計開発したもので、衝突乱流効果とマイクロフィン構造により 0.24 W/°C というきわめて低い熱抵抗を有する^{19,20)}。また、Yb:YAG マイクロチップとヒートシンクは Au-Sn による共晶ハンダを用いて接合しているが、接合面内で気泡や不均一性があると、コアの異常な温度上昇やコア内での局所的な温度の不均一性が生じ、レーザー光の波面に乱れが生じる。そこで、チップを融着する際に、ヒートシンクに対しマイクロチップ面内に均一な力で押しつける専用ダイボンド装置を開発した。これにより、cw でも安定した高出力動作が可能になると同時に、素子の製作歩留まりが飛躍的に向上した²²⁾。

図4はLDによるエッジ励起の光学系の構成図で、四方向のうちの一方向を示したものである。励起用LDには、波長940 nm、40 W LDの6段スタック型(出力240 W) FA方向コリメートレンズ付きを用いた。LDから出た光は、1枚のSA方向シリンジカルレンズによりコアの径方向に緩やかに集光され、マイクロチップエッジ直前で



図3 ヒートシンク接合された Yb:YAG マイクロチップの外観。

FA方向に焦点距離7 mmの高精度非球面シリンジカルレンズを用いて絞り込むことで、エッジ内への90%以上の高い入射結合効率を可能にしている。LDアレイからの励起光は、LDの活性層に垂直なFA方向には高い集光性を有するため、6段スタックからの出射光でも、図のようにまとめて1つの非球面レンズで、直径100 μ m以下まで絞り込むことが可能であり、200 μ mの厚みのマイクロチップでも十分高効率な励起が可能である。一方、LDのSA方向の励起光は集光性が低いが、コアの径も3~5 mmと大きいため逆に絞る必要がなく、LDとエッジ励起マイクロチップとは集光異方性の相性がよい。

図5は、試作した四方向エッジ励起モジュールの外観写真である。写真では光学系に隠れて見えないが、中央にマイクロチップ付きのヒートシンクが取り付けられ、そこから放射状に励起光学系が形成されている。ヒートシンクおよびLDともに水冷であるため、それらを固定している金属製の光学ベースプレートの下に樹脂製の導水ブロックを設け、プレートに穴を設けてすべて下から水を給排水する構造とした。これにより小型化が容易になり、モジュール内ではホースを使わないため見た目もすっきりし、将来産業用応用として信頼度も高い。モジュールのサイズは19 cm×19 cm、高さはおおよそ7 cmである。

図6は、エッジ励起 Yb:YAG マイクロチップレーザーの連続動作および準連続動作における代表的な発振特性を示す。コアは Yb 10 at.% 添加の YAG セラミックで、直径 3.7 mm、チップの厚みは 200 μ m である。連続動作でスロープ効率 47%、最大出力で 410 W の出力が得られた²⁴⁾。レーザー出力をコア面積で割った値は 3.9 kW/cm²、体積で割った値は 0.19 MW/cm³ である。単純計算で、小指の爪の面積のコアから約 4 kW のレーザー光が取り出せる勘定となる。また、デューティー 10% の qcw 動

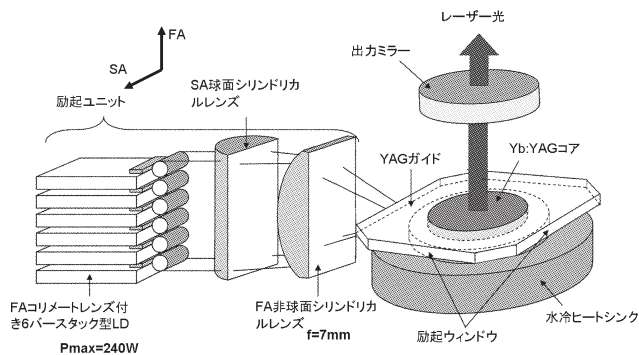


図4 LD エッジ励起の光学系の構成.

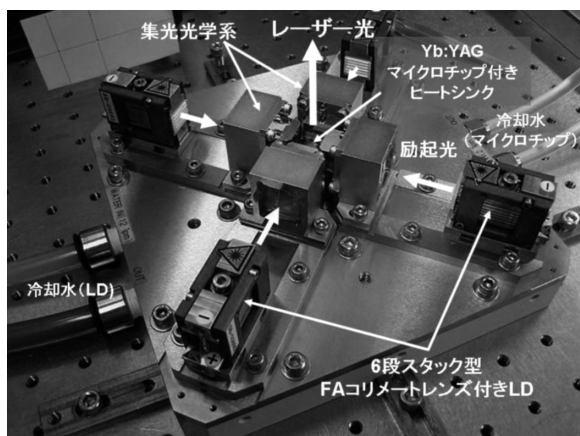


図5 エッジ励起モジュールの外観写真.

作ではコアの温度上昇の低減により発振特性が向上し、500 W を超えるピーク出力が得られている。cw での最大動作時のビーム品質は $M^2=130$ と悪いが、コア内で基本横モードが広がるように共振器構成を変えることで、 $M^2=7$ まで向上させることができた。ただし、最大出力は 200 W まで低下した。現在市販されている同出力帯の加工用 YAG レーザーでは $M^2=30$ 程度であるので、集光スポットを 3分の1 以下に小さく絞ることが可能である。ドイツの薄ディスク型レーザーでは、最近の実験結果として $M^2=1.2$ で 200 W の連続動作に成功している¹⁴⁾。発振部分の構造が同じエッジ励起方式でも、同程度の高輝度動作が可能であると考えられるが、そのためには次でふれる発熱の影響を今後、さらに改善してゆく必要がある。

4. 熱による影響と今後の改善

エッジ励起 Yb: YAG マイクロチップレーザーにおいても、高出力動作時にはやはり発熱の影響が無視できない。図7は、有限要素法 (ANSYS) により励起時のマイクロチップ内での温度分布をシミュレーションした結果である。図6の実験の cw での最大励起時 (946 W) を想定し、

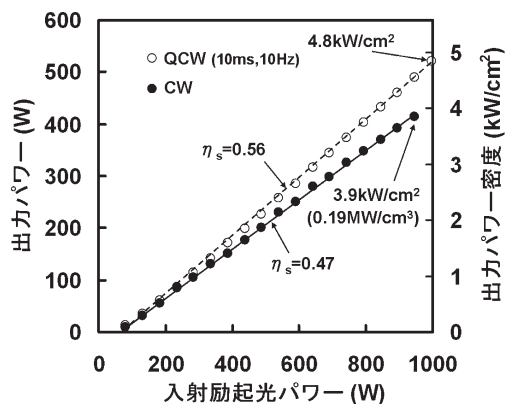


図6 エッジ励起 Yb: YAG マイクロチップレーザーの入出力特性.

コア径 3.7 mm, チップの厚みは 200 μm , コア内での発熱密度は 36 W/mm³ で均一と仮定した。冷却水温は 20°C, 水とヒートシンク間の熱伝達係数 300 kW/m²K, Yb 10 at.% の YAG コアおよび CuW (Cu 30%) ヒートシンクの熱伝導率をそれぞれ 6.6, 260 W/m²K とした。図7より、ヒートシンクと反対側のコアの表面温度は 223°C と 200°C を優に超えていると見積もられるが、これは放射温度計による実測結果 228°C とよく一致する。図のシミュレーション結果から、YAG 内においては 200 μm と薄いにもかかわらず、両表面で 100°C 以上の温度勾配 (温度差) が生じていることがわかる。これは、YAG の熱伝導率がヒートシンクの金属と比べ約 1 桁小さいからである。この表面温度の上昇は熱レンズ効果や歪みの問題とも直結しており、これを下げるためには、チップをさらに薄くすること、そしてコア径を広げる (励起面密度を下げる) ことが効果的で、チップとヒートシンクの接合方法やヒートシンク自体の熱伝導率、排熱効率を改善しても効果は少ない。なお、表面温度が 200°C まで上昇しても、準四準位レーザー媒質である Yb: YAG の発振効率がそれほど低下しないのは、励起密度が十分高いために反転分布が維持されているためである。

図8は、図7の結果よりさらに、有限要素法によりマイクロチップ内の歪み量をシミュレーションした結果である²⁴⁾。変形の様子 (誇張されている) も合わせて示す。コア中心表面で発生する最大歪み量 384 MPa は、文献における単結晶 YAG の破壊限界歪み 175 MPa²⁶⁾ をはるかに超えており、セラミック材料がもともと有する高い破壊強度の特徴を示すよいデータであると考えている。さらに、シミュレーションによれば、チップの厚みを 100 μm まで薄くすることで、表面温度は 50°C, 歪み量は 100 MPa 低減できると予測されることから、今後高出力化に当たりチ

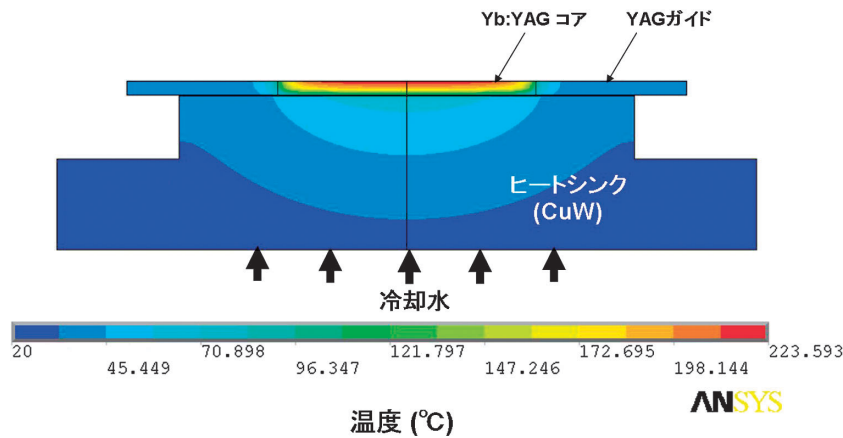


図7 有限要素法による Yb:YAG マイクロチップ内の温度分布の計算結果。

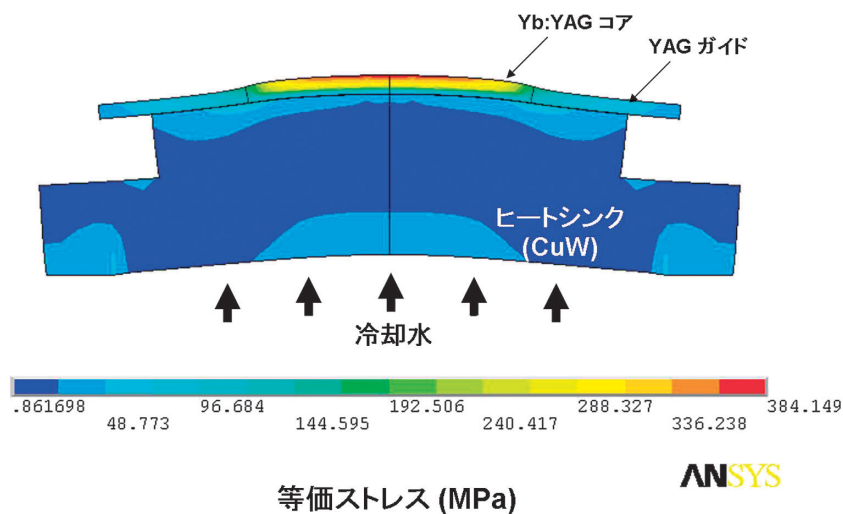


図8 有限要素法による Yb:YAG マイクロチップ内の熱歪み分布の計算結果。

チップのさらなる薄膜化も重要な設計方針である。

図9は、エッジ励起 Yb:YAG マイクロチップレーザーの発振時のチップの実効的な熱レンズ量を測定した結果である。コアは Yb 5 at.% の単結晶 Yb:YAG で、コア径 5 mm、厚みは 300 μm である。プローブ光として別の Nd:YAG レーザー（波長 1.06 μm ）光を斜めからコアに当て、その反射光の波面の変化をシャック・ハルトマンセンサー（CLAS2D）で測定して求めた。図中に再構成した波面の形状例を示す。図の結果のように、マイクロチップはマイナスの焦点距離をもつ凸レンズになっており、励起を上げるにつれ曲率が小さく、焦点距離は短くなる。このレンズ効果は温度勾配による屈折率変化ではなく、チップそのものが凸状に変形することで発生している。先の温度分布からわかるように、冷却されていないチップ表面は 200°C 近くまで温度が上昇しており、膨張して反る。ここで励起していない状態でもすでに凸になっているのは、YAG とヒートシンク材料の CuW の線熱膨張係数の違いによるもの

で、接合時に 300°C 近くまで温度を上げるため、その後冷却時に熱膨張係数の大きい（熱収縮の大きい）ヒートシンクによって曲げられるためである。今後ヒートシンクの材

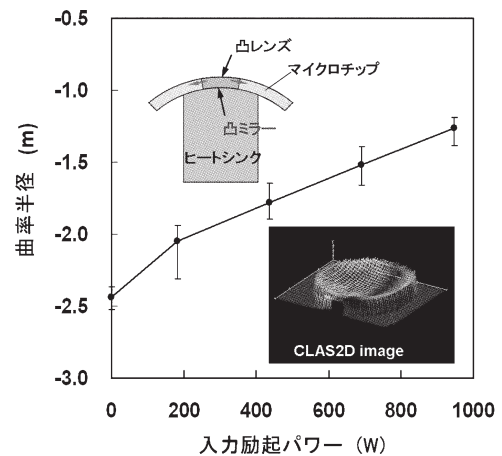


図9 エッジ励起マイクロチップの実効的な熱レンズ量の測定結果。

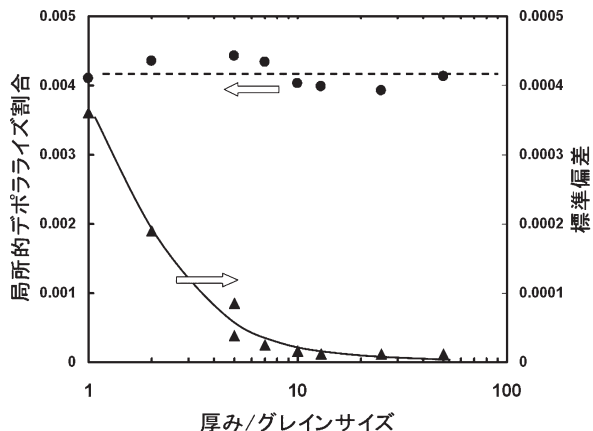


図10 セラミック YAG における局所的デポラライズ割合とその標準偏差。

料を選択して熱膨張係数の最適化を行い、チップの変形を低減する必要がある。

さて、今後高出力化やレーザー出力の偏光制御を行う際、コアに使われるセラミック材料のより詳細な熱複屈折特性の把握も重要である。一般的にセラミック YAG の熱複屈折特性は、(111) 面をもつ単結晶と同等の振る舞いをする事が示されている²⁷⁾。これは、セラミックを構成するグレインの結晶軸がランダムに配向され、各グレインの複屈折が光軸上で平均化された結果である。一方、マイクロチップのようにセラミックの厚みがグレインサイズと同程度になると、グレインの配向に依存した局所的に異なる複屈折特性の出現を議論しなければならない。図10は、試料厚とグレインサイズの比に対する各試料の複数箇所測定された局所的デポラライズ割合の平均と、その標準偏差である。いずれの試料でも局所的デポラライズ割合の平均が約0.004であるのに対して、標準偏差は試料厚とグレインサイズの比が10以下で急激に大きくなり、不均一な局所的熱複屈折が観測された。このことから、セラミック材料をコアとするマイクロチップでは、試料厚とグレインサイズの比が10以下になるまで薄くした場合に、光束品質の低下や複屈折の補償に注意が必要になる²⁸⁾。

5. 加工応用

図11は、図5のエッジ励起 Yb:YAG マイクロチップモジュールを筐体内に組み込んだプロトタイプレーザー(ヘッド)である。加工用レーザーとしての性能評価のため、2005年に福井県工業技術センター内において、松浦機械製作所製の金属光造形複合加工機と結合し加工実験を行った。左側奥は、市販のランプ励起の Nd:YAG レーザー装置(出力500W)である。エッジ励起マイクロチップ

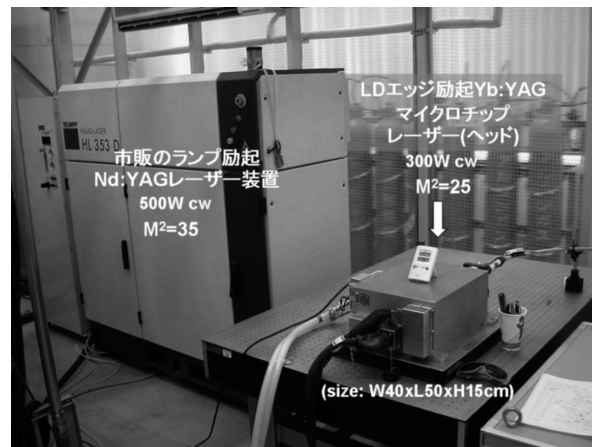


図11 試作したプロトタイプ LD エッジ励起 Yb:YAG マイクロチップレーザー。

レーザーは出力としては300Wと低いが、ヘッドのサイズは5分の1と格段に小型で、エネルギー効率も1桁高い。加工点まで伝搬に使用したマルチモードファイバーにより光束品質が劣化するため、エッジ励起マイクロチップレーザーの光束品質の高さによる加工状態の違いを確認することはできなかったが、市販レーザーと遜色のない造形加工を安定して行うことができた。

高出力連続動作 Yb 添加のバルク固体レーザーの動向として、われわれが近年取り組んでいる LD エッジ励起 Yb:YAG マイクロチップの特徴と進展、課題について報告した。セラミック母材を中心に今後さらに最適設計を進め、産業用として期待される高効率、高出力で高輝度の Yb:YAG レーザーの実用化を目指してゆく。また、Yb 添加のバルク固体レーザーは高出力連続動作だけでなく、広い蛍光幅を利用したモードロックによるフェムト秒領域での短パルス光の発生も可能である。LD 励起が可能であるため、現行の Ti:サファイアレーザーに比べ構成が簡単であることから、理化学用はもちろん産業応用にも期待されている。共振器設計の自由度が高いエッジ励起マイクロチップレーザーは、非線形光学を利用したアト秒に至る短パルス発生用光源としても有利であり²⁹⁾、ジャイアントマイクロフォトニクス³⁰⁾と称するレーザーの極限を目指した展開研究が期待される。

本研究の一部は科学技術振興機構の委託による福井県地域結集型共同研究事業(2000~2005)、および文部科学省の先端光科学研究、エクストリームフォトニクス(2005~)の成果である。関係各位に感謝する。

文 献

- 1) P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal and T. Y. Fan: "Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1089-1091.
- 2) 平等拓範: "半導体レーザー励起 Yb: YAG レーザ", 光技術コンタクト, **35** (1997) 682-690.
- 3) 平等拓範: "Yb-系固体レーザー", 光学, **28** (1999) 435-442.
- 4) T. Y. Fan: "Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG," *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 1457-1459.
- 5) T. Taira, B. Tulloch and R. L. Byer: "Single axial mode oscillated Yb:YAG lasers," *Extended Abstracts, 55th Autumn Meeting for Jpn. Society of Appl. Phys.*, 21a-E-7 (1994) p. 893.
- 6) T. Taira, W. M. Tulloch, R. L. Byer and T. Kobayashi: "Single axial mode operation of resonantly pumped Yb: YAG microchip lasers," *IEICE Transactions C-I*, **J79-C-I** (1996) 138-144 (in Japanese).
- 7) T. Taira, W. M. Tulloch and R. L. Byer: "Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb:YAG lasers," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 1867-1874.
- 8) T. Y. Fan: "Optimizing the efficiency and stored energy in quasi-three-level lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 2692-2697.
- 9) P. J. Morris, W. Luthy and H. P. Weber: "Operation of resonantly pumped Tm:Ho:YAG in active mirror mode," *Opt. Commun.*, **104** (1993) 97-101.
- 10) T. Taira, J. Saikawa, T. Kobayashi and R. L. Byer: "Diode-pumped tunable Yb:YAG miniature lasers at room temperature: Modeling and experiment," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3** (1997) 100-104.
- 11) 平等拓範, 常包正樹, ダスカルトライアン: "エッジ励起マイクロチップコンポジット Yb: YAG レーザー", レーザー研究, **33** (2005) 228-235.
- 12) A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Witting, U. Brauch and H. Opower: "Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers," *Appl. Phys. B*, **58** (1994) 365-372.
- 13) C. Stewen, K. Contag, M. Larionov, A. Giesen and H. Hugel: "A 1 kW cw thin disc laser," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 650-657.
- 14) A. Giesen and J. Speiser: "Fifteen years of work on thin-disk lasers; Results and scaling laws," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (2007) 589-609.
- 15) J. Saikawa, S. Kurimura, N. Pavel, I. Shoji and T. Taira: "Performance of widely tunable Yb:YAG microchip lasers," *OSA TOPS Adv. Solid-State Lasers*, **34** (2000) 106-111.
- 16) N. Pavel, J. Saikawa and T. Taira: "Radial-pumped microchip high-power composite Yb:YAG laser: Design and power characteristics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) 146-152.
- 17) T. Dascalu, T. Taira and N. Pavel: "100 W quasi-continuous-wave diode radially pumped microchip composite Yb:YAG laser," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1791-1793.
- 18) T. Dascalu, N. Pavel and T. Taira: "90 W continuous-wave diode edge-pumped microchip composite Yb:Y₃Al₅O₁₂ laser," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 4086-4088.
- 19) 常包正樹, 平等拓範: "エッジ励起高出力マイクロチップレーザー用水冷ヒートシンクの開発", レーザー研究, **34** (2006) 181-187.
- 20) M. Tsunekane and T. Taira: "Design and performance of compact heatsink for high-power diode edge-pumped, microchip lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3** (2007) 619-625.
- 21) M. Tsunekane and T. Taira: "High-power operation of diode edge-pumped, glue-bonded, composite Yb:Y₃Al₅O₁₂ microchip laser with ceramic, undoped YAG pump light-guide," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) L1164-L1167.
- 22) M. Tsunekane and T. Taira: "300 W continuous-wave operation of a diode edge-pumped, hybrid composite Yb:YAG microchip laser," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 2003-2005.
- 23) T. Taira and M. Tsunekane: "High-power edge pumped Yb:YAG single crystal/YAG ceramic hybrid microchip laser," *Proc. SPIE*, **6216** (2006) 621607-1-8.
- 24) M. Tsunekane and T. Taira: "High-power operation of diode edge-pumped, composite all-ceramic Yb:Y₃Al₅O₁₂ microchip laser," *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 121101.
- 25) H. Yagi, K. Takaichi, K. Ueda, Y. Yamasaki, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "The physical properties of composite YAG ceramics," *Laser Phys.*, **15** (2005) 1338-1344.
- 26) J. Marion: "Strengthened solid-state laser materials," *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985) 694-696.
- 27) I. Shoji, Y. Sato, S. Kurimura, V. Lupei, T. Taira, A. Ikesue and K. Yoshida: "Thermal-birefringence-induced depolarization in Nd:YAG ceramics," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 234-236.
- 28) Y. Oishi, T. Dascalu, K. Midorikawa and T. Taira: "Thermal-birefringence-induced local depolarization in thin YAG ceramics," *OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Photonics* (Nara, Japan, January 27-30, 2008) MC15.
- 29) X. Gu, G. Marcus, Y. Deng, N. Ishii, T. Fuji, M. Schultze, T. Taira, R. Hartmann, S. Roither, M. Kitzler, A. Baltuska, R. Kienberger and F. Krausz: "A few-cycle sub-millijoule infrared OPCPA system and its application in high-harmonic generation," *OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Photonics* (Nara, Japan, January 27-30, 2008) TuA4.
- 30) 平等拓範: "ジャイアントマイクロフォトニクス", レーザー研究, **36** (2008) 109.

(2008年8月27日受理)