

単一縦モード直線偏光で動作する小型高出力 モノリシック複合構造 MOPA レーザの開発

中央大学 理工学部 電気電子情報通信工学科
教授 庄司 一郎
(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019220-B3)

キーワード：マイクロチップレーザ，複合構造，常温接合

1. 研究の背景と目的

Nd:YAG レーザやファイバレーザなど波長 $1 \mu\text{m}$ 帯近赤外レーザでは加工が困難な材料や、より微細な加工を要求される用途に対しては、グリーンレーザや紫外レーザといった短波長のレーザがますます必要とされ、その高出力化が求められている。最近、青色領域では半導体レーザの高出力化が進んでいるが、グリーンや紫外レーザはもっぱら $1 \mu\text{m}$ 帯レーザを波長変換することで実現されている。そのため、波長変換に適した $1 \mu\text{m}$ 帯レーザとして、狭線幅と直線偏光性を有するレーザが必要となる。特に、波長変換の効率を今後さらに向上しつつ高出力化を図るためには、究極の狭線幅である単一縦モードであること、かつ、小型で高出力動作可能な、真に実用的なレーザを開発することが極めて重要となる。しかしながら、上記条件を満たす既存のレーザは、構成が複雑で小型化が困難なものがほとんどである。

小型でかつ高出力を実現するレーザとして、複合構造レーザがある¹⁾。これは、Nd:YAG のようなレーザ活性イオン添加材料と、YAG のような無添加材料（排熱材料）を貼り合わせた構造を有し、レーザ材料で発生した熱を排熱材料に逃がすことによって熱効果を抑制し、高出力動作を可能とするものである。しかしながら、従来の複合構造レーザはほとんどが高温プロセスである拡散接合によって作製されていたため、熱膨張率が異なる材料同士を接合することは困難だった。また、最近になって焼結プロセスを用いて作製された複合構造セラミックレーザが報告されたが²⁾、適用できるのは YAG のような等方性材料に限られている。

我々はレーザの高性能化を図るための新手法として常温接合を世界に先駆けて導入し、さまざまなデバイスの作製に適用してきた。常温接合は、常温かつ高真空中で試料表面にアルゴン原子ビームを照射し、表面の酸化膜等を除去することによって表面原子を活性化し化学反応性を高め、それらの表面同士を接触させると原子レベルで材料が強固に接合する技術である。常温でのプロセスであることから材料品質の劣化が生じず、これまで、波長変換材料のプレートを複数枚接合した高効率波長変換デバイスを開発したほか、熱膨張係数が 8 倍異なる Nd:YAG とダイヤモンドとの異種材料接合による複合構造レーザを実現した。特に、Nd:YAG とダイヤモンドとの接合界面でのレーザ光

反射損失を無くすため、コーティング層付きの複合構造レーザの作製にも世界で初めて成功した。ダイヤモンドは YAG より 200 倍大きな熱伝導率を有することから、高効率かつ高出力のレーザ動作が得られた³⁾。

本研究では上記の研究背景をもとに、波長変換に最適な、単一縦モードかつ直線偏光で動作する、新しい小型高出力レーザを開発することを目的とした。具体的には、単一縦モード発振可能なマイクロチップレーザと増幅用レーザ結晶、そして排熱用結晶を、常温接合技術を用いて一体化した、モノリシック複合構造 MOPA（マスター発振器－パワー増幅器）の実現に取り組んだ。

2. 研究方法

2.1 モノリシック複合構造

本研究で作製したモノリシック複合構造レーザを図 1 に示す。(a)は MOPA 構造で、マイクロチップレーザと増幅用レーザがいずれも Yb:YAG、入射側の排熱用結晶が無添加 YAG である。無添加 YAG の接合界面側表面には、Yb:YAG と接合した際にレーザ発振波長 $1.03 \mu\text{m}$ で高反射となるコーティングを、また、増幅用 Yb:YAG の接合界面側表面には、Yb:YAG と接合した際に $1.03 \mu\text{m}$ で反射率 95%となるコーティングを施してある。これにより、マイクロチップ

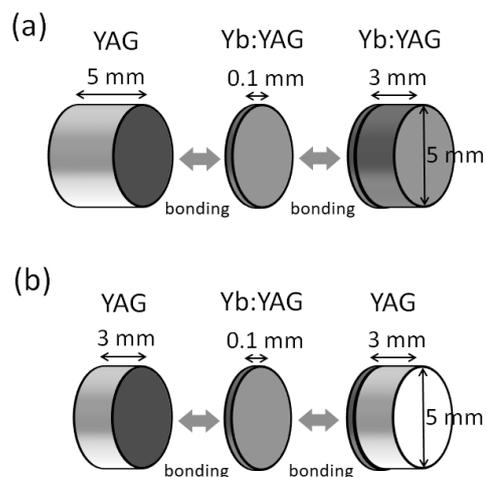


図 1 モノリシック複合構造レーザ。(a) 無添加 YAG/Yb:YAG/Yb:YAG 複合構造 MOPA。(b) 無添加 YAG/Yb:YAG/無添加 YAG 複合構造マイクロチップレーザ。

プ Yb:YAG の両端で長さ 0.1 mm の共振器が構成され、単一縦モードでレーザー発振し、そのレーザー光が厚さ 3 mm の Yb:YAG で増幅されることになる。

本研究では (a) の構造に先立ち、まず (b) のような増幅部のない複合構造マイクロチップレーザーの作製を行った。増幅用 Yb:YAG のかわりに無添加 YAG を出射端にも接合した構造である。増幅部での発熱がないため、入射端側の無添加 YAG の厚さは (a) より短く 3 mm とした。波長 1.03 μm でのコーティング仕様は (a) と同一とし、複合構造マイクロチップレーザー単体としての評価を行った。また、複合構造を持たない単独の Yb:YAG との比較も行った。

2・2 常温接合を用いた複合構造の作製

本研究における最大の特徴は、常温接合技術を用いて複合構造を実現する点である。特に、我々の過去の研究において、表面にコーティング層を有する結晶でも接合可能であることが明らかとなり³⁾、汎用性が格段に高まった。ただし、過去の研究ではレーザー波長に対する無反射コーティングだったのに対し、今回作製した複合構造は接合界面が高反射もしくは部分反射となるコーティングであり、初めての試みであった。

図 2 に常温接合プロセスを示す。真空度 10^{-4} Pa 程度のチャンバ内に接合する結晶を上下対向して配置する。上側の結晶を取り付けるロッドは上下 (z) 方向だけでなく x, y 方向の移動もチャンバ外から制御し、下側の結晶との位置調整ができるようになっている。上下の結晶間隔を数 mm 程度とし、横からアルゴン原子ビームを照射する。アルゴン原子ビームは出射口から一定の拡がり角で出てくるため、浅い角度で上下の結晶面全体に照射され、表面近傍の原子層のみエッチングされる。したがって、コーティング層に照射する場合でも、コーティング仕様に与える影響を最小限に抑えつつ、表面原子を活性化できる。本研究で使用した常温接合装置の外観を図 3 (a) に、装置内部で結晶表面にアルゴン原子ビームを照射している写真を図 3 (b) に示す。

上下両方の結晶表面が活性化された後、上側の結晶を下ろしていき、チャンバ内部をビデオカメラで撮影し拡大した画像をモニターで確認しながら、位置調整を行って下側の結晶に接触させ、加圧する。本研究では新たに 1 kN まで

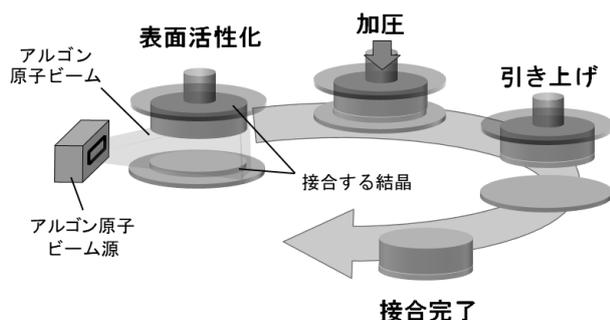


図 2 常温接合プロセス模式図。

測定可能なロードセルを導入し、圧力をリアルタイムでモニタしながら接合を試みた。

原子レベルでの接合が実現すると、上側の結晶を固定しているロッドを上方に移動することにより、上下の結晶が一体化して引き上げられる。以上のプロセスを繰り返すことで、複合構造を作製した。

2・3 レーザ発振実験

作製した複合構造に対してレーザー発振実験を行った。測定系を図 4 に示す。励起光源として、中心波長 0.94 μm 、最大出力 25 W のファイバ結合型半導体レーザー (LIMO, LIMO-HLU25F200-940) を用いた。ファイバから出射した励起光を焦点距離 50 mm のアクロマティックレンズでコリメートし、同じく焦点距離 50 mm のアクロマティックレンズで集光し、複合構造に入射した。厚さ 0.1 mm の Yb:YAG マイクロチップ結晶における集光スポット径は約 300 μm であった。

マイクロチップ結晶の入射端側の接合界面におけるコーティングは、レーザー発振波長 1.03 μm で高反射 (反射率 99.5%) であると同時に、励起光波長 0.94 μm に対して高透過 (透過率 95%) となっている。一方、出射端側の接合界面におけるコーティングは、波長 1.03 μm で部分反射 (反射率 95%) であると同時に、波長 0.94 μm に対しては、図 1 (a) の MOPA 構造の場合には高透過 (透過率 95%)、図 1 (b) のマイクロチップ単体複合構造の場合は高反射 (反射率 99.5%) となっている。また、マイクロチップ結晶および増幅用結晶の Yb 濃度はそれぞれ 20 at.%, 7% であった。これより、励起光入射パワーに対する励起光吸収パワーの割合は、MOPA 構造のマイクロチップ Yb:YAG および増幅用 Yb:YAG でそれぞれ約 20% と約 60%、マイクロチップ単体複合構造のマイクロチップ Yb:YAG で約 31% と見積もられる。

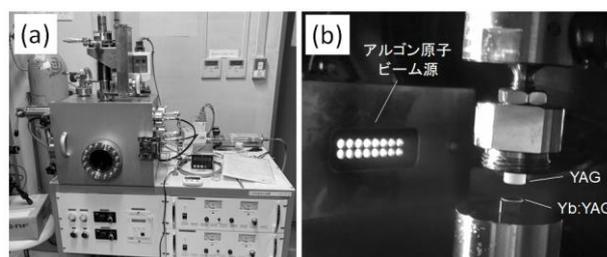


図 3 (a) 常温接合装置。(b) 装置内部でのアルゴン原子ビーム照射の様子。

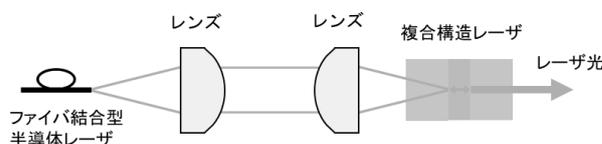


図 4 レーザ発振実験模式図。

3. 研究成果

3.1 マイクロチップ単体複合構造の作製

まず、図1(b)の複合構造マイクロチップレーザの作製を行った。常温接合ではアルゴン原子ビームを照射する際、ビーム源内でアルゴン原子をプラズマ化してアルゴンイオンを加速後、出射時に中性化する。その際の加速電圧、イオン電流に加え、アルゴン原子ビーム照射時間、上下に設置した結晶間距離、加圧時の力、加圧時間等を最適化する必要がある。

今回、高反射コーティング層を介した接合のためか、数十回試行したうち数回しか接合に成功しなかった。成功したときの接合条件を表1に示す。これと同条件でも接合しないこともあり、また、接合強度が弱くレーザ発振実験の際に剥がれてしまうものもあった。その原因の解明と、より確実に強固な接合を実現するための条件を明らかにすることが今後の課題である。

接合に成功したマイクロチップ単体複合構造の写真を図5に示す。

表1 複合構造マイクロチップ接合条件

アルゴンビーム加速電圧	1.2 kV
アルゴンビーム電流	15 mA
アルゴンビーム照射時間	30 分
上下結晶間距離	3.5 mm
加圧力	600 N
加圧時間	20 分

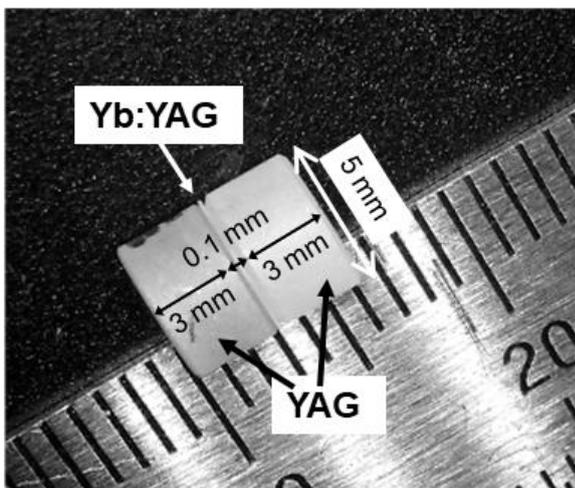


図5 作製した複合構造マイクロチップ（無添加 YAG/Yb:YAG/無添加 YAG）。

3.2 マイクロチップ単体複合構造のレーザ発振特性

作製に成功したマイクロチップ単体複合構造を用い、図4に示した測定系でレーザ発振実験を行った。まず、複合構造を有しない単独の Yb:YAG マイクロチップ（厚さ 0.1

mm）に励起光を入射したところ、吸収パワー1.3 Wで熱破壊が生じた。一方、複合構造では最大 5.4 Wまで破壊せず、2つの複合構造でレーザ発振に成功した⁴⁾。レーザ入出力特性を図6に示す。

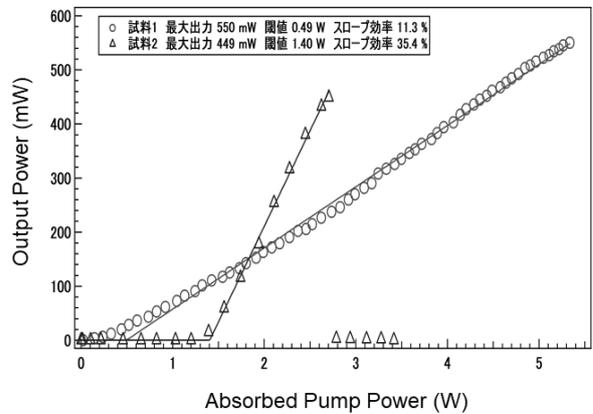


図6 複合構造マイクロチップレーザの入出力特性。

試料1は発振閾値が 0.49 W と小さく最大出力 550 mW が得られた。一方、試料2では発振閾値が 1.40 W と大きく、励起光吸収パワー2.7 W で発振が止まってしまった。ただし、スロープ効率は試料1の 11.3 % に対し 35.4 % と大きかった。このように2つの試料で特性が大きく異なるのは、接合品質の違いによるものと考えられる。試料2は接合が完全でなく界面での散乱により閾値が大きくなったのに加え、排熱効率が悪く、励起光パワーが大きくなると熱歪みが顕著となり発振が止まったものと考えられる。このように、試料ごとのばらつきが大きく、それがレーザ発振特性にも大きく影響しているのも課題である。

3.3 複合構造マイクロチップレーザのスペクトル特性

図7に複合構造マイクロチップレーザ（図6試料1）の励起光吸収パワー3.1 Wでの発振スペクトルを示す。ピーク波長は 1032.0 nm であった。Yb:YAG マイクロチップの厚さすなわちレーザ共振器長 L は 0.1 mm、屈折率 n は 1.8

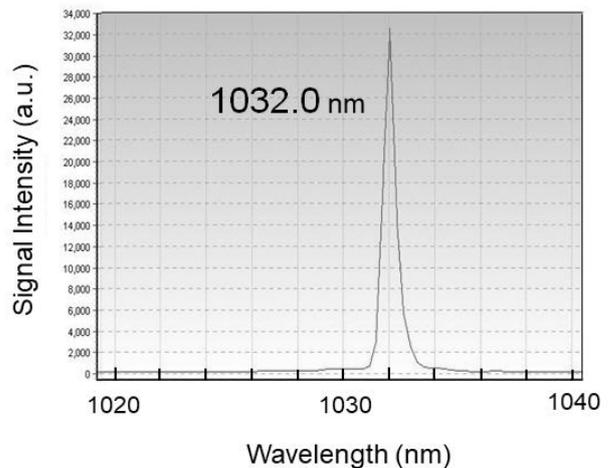


図7 複合構造マイクロチップレーザの発振スペクトル

であることから、対応する縦モード間隔 $\Delta \nu$ は

$$\Delta \nu = \frac{c}{2nL} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 1.8 \times 0.10 \text{ mm}} = 0.83 \text{ THz} \quad (1)$$

となり、波長間隔としては約 3 nm に相当する。図 7 のようにスペクトルは 1 本しか存在せず、単一縦モード発振していると考えられる。

3・4 複合構造マイクロチップレーザのビーム品質

複合構造マイクロチップレーザ (図 6 試料 1) のビーム品質測定結果を図 8 に示す。レンズで集光したときのビーム径の場所依存性の測定結果より、水平方向および鉛直方向の M^2 値を求めたところ、それぞれ 1.9, 2.7 となった。

3・5 平凸マイクロチップを用いた複合構造レーザの開発

従来のマイクロチップレーザは平行平板マイクロチップ結晶が用いられ、平面-平面共振器であるため、発熱による熱歪みが生じると不安定領域に移行し発振が止まってしまうほか、図 8 で示したようにビーム品質も M^2 を 1 に近づけるのは難しかった。そこで本研究では、Nd:YVO₄ 結晶の片面を曲率 200 mm の球面に研磨し、中心厚を 0.3 mm とした平凸マイクロチップと、無添加 YAG との複合構造作製を試みた。

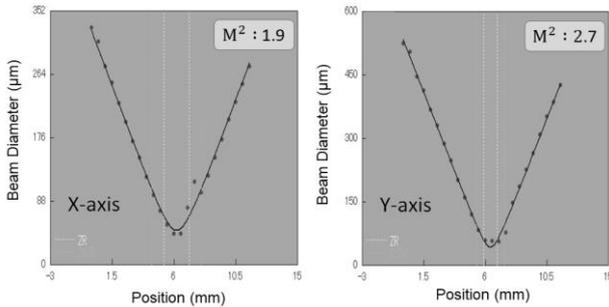


図 8 複合構造マイクロチップレーザの水平 (X-axis) および鉛直 (Y-axis) 方向ビーム品質測定結果。

最初に無添加 YAG の接合面側を曲率 200 mm の凹面に加工したものと Nd:YVO₄ の凸面との常温接合を試みたが、曲率が完全に一致せず隙間が空いて接合できなかった。次に、Nd:YVO₄ の平面と無添加 YAG の平面との接合も試みたが、接合面全体に均一な加圧をかけるのが難しく、現時点で接合に至っていない。接合に成功すればマイクロチップレーザの性能向上につながるため、今後も継続して取り組む予定である。

3・6 複合構造 MOPA の作製

マイクロチップ単体複合構造の研究結果をふまえ、図 1 (a) の複合構造 MOPA の作製を行った。その結果、表 1 とほぼ同様の条件で作製することに成功した (図 9)。しかしながら、接合強度が弱くレーザ発振実験の際に剥がれて

しまい、まだ MOPA としての動作確認をするに至っていない。こちらもマイクロチップ単体複合構造と同様、より強固な接合を実現するための条件を明らかにして再度作製を行い、MOPA 動作を実証することが今後の課題である。

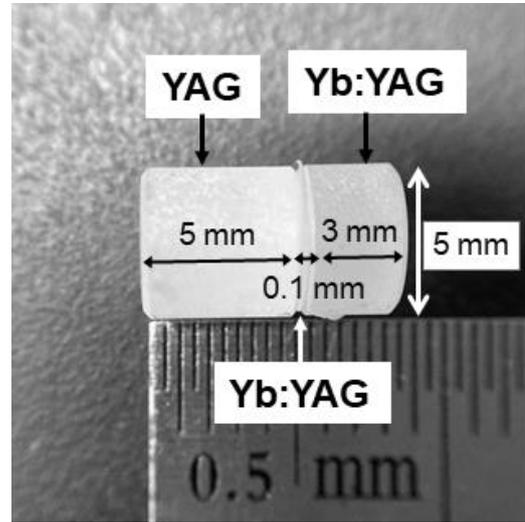


図 9 作製した複合構造 MOPA (無添加 YAG / Yb:YAG / Yb:YAG)。

4. 結び

本研究では、マイクロチップレーザを排熱材料と一体化した複合構造を、常温接合技術を駆使して初めて実現した。そして、端面励起の厚さ 100 μm のマイクロチップとしてはこれまでで最大級となる、出力 550 mW の単一縦モード動作を実証した。今後はプロセスをさらに改良し、接合強度の高い平凸マイクロチップ複合構造および MOPA 構造を作製することにより、単一縦モード・高ビーム品質・高出力レーザの実現を目指す。

謝 辞

本研究において、複合構造の作製および評価で協力いただいた、小林逸人、小倉康平、植松祐季の各氏に感謝する。また、本研究課題に対して助成いただいた、公益社団法人天田財団に対し心よりお礼申し上げる。

参考文献

- 1) F. Hanson: Appl. Phys. Lett. 66, 3549 (1995).
- 2) M. Tsunekane and T. Taira: Opt. Lett. 31, 2003 (2006).
- 3) H. Ichikawa, K. Yamaguchi, T. Katsumata, I. Shoji: Opt. Express 25, 22797 (2017).
- 4) K. Ogura, H. Kobayashi, Y. Uematsu, I. Shoji: Tech. Dig. Optica Advanced Photonics Congress 2022, JT6A.6.