

## 常温接合を用いた複合構造高性能固体レーザーの開発

Development of high-performance composite solid-state lasers using the room-temperature bonding

電気電子情報通信工学専攻 勝俣 友

16N5100022L Tomo KATSUMATA

### 1. 研究背景・目的

近年、固体レーザーは励起光源である半導体レーザーの高出力化に伴い、高出力化が進んでいる。強励起によるレーザー結晶内の熱は、熱レンズ効果や熱複屈折を発生させビーム品質や効率の低下、熱破壊の原因となり、高出力動作の妨げになっている。これらの熱問題にはレーザー活性イオン添加材料と無添加材料を一体化することで添加材料からの直接的な熱引きが可能な複合構造が有効である。複合構造の作製手法は主に拡散接合[1]が用いられているが、高温プロセスを含むためほとんど同種材料の接合に限定されている。その他の作製手法でセラミックを用いた複合構造[2,3]も報告されているが、異方性材料の適用が困難である。したがってこれらの手法では接合材料が限定されてしまう。添加材料で発生した熱を効果的に排熱するには、より熱伝導率の高い無添加材料の使用が不可欠であり、そのような材料を用いた複合構造作製の新たな手法が求められている。

そこで本研究では異種材料同士の接合の新技术として常温接合法[4]を用い、二つの複合構造レーザーを作製する。一つ目は熱伝導率が 2000 W/mK と高く、効果的な排熱が期待できるダイヤモンドを無添加材料とし、Nd:YAG との複合構造レーザーを作製する。さらに Yb:YAG マイクロチップレーザーと無添加 YAG を接合し複合構造マイクロチップレーザーを作製し、複合構造の熱に対する有効性について検証し、高出力・高効率な固体レーザーの開発を目的とする。

### 2. 常温接合法

本研究で用いられている接合手法は常温接合 (RTB:Room-Temperature Bonding),あるいは表面活性化接合(SAB:Surface Activated Bonding)と呼ばれている。Fig. 1 に常温接合のプロセスを示す。常温接合法は高真空中( $\sim 10^{-5}$  Pa)で 2 枚の滑らかな材料表面にアルゴン原子ビームを照射することで、材料表面の吸着分子や酸化膜を取り除き、材料表面を活性状態にして活性化した面同士を圧着させることで接合を可能にした手法である。高温プロセスが存在しないことから熱膨張係数の異なる異種材料の接合が可能であるといった利点がある。

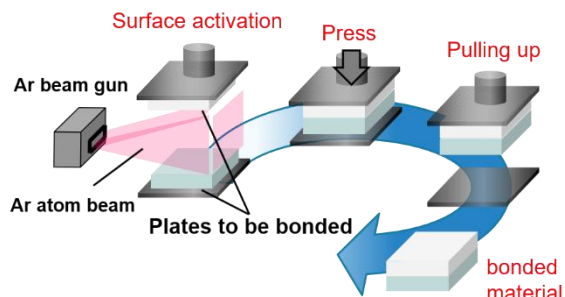


Fig. 1. 常温接合のプロセス

### 3. マイクロチップレーザー

本研究で扱うマイクロチップレーザーについて触れる。マイクロチップレーザーとは共振器長が 1mm 以下の固体レーザーを指し、特徴として単一縦モード発振が可能であることが挙げられる。レーザー発振光の波長はレーザー媒質固有の蛍光帯と共振器長によって決まる。共振器による要素(縦モード)の間隔は式(1)のように共振器長に反比例し、共振器長を小さくすることによって媒質固有の蛍光帯に存在する縦モード数を減らすことができ、単一縦モードを実現できる。

$$\Delta \nu = \frac{c}{2nL} \quad (1)$$

### 4. 先行研究

先行研究では常温接合を用いNd:YAG とダイヤモンドを接合した複合構造の作製に成功し、高出力化に成功していたが、接合面のフレネル反射により、スロープ効率が低下していた[5]。その際の入出力特性を Fig. 2 に示す。フレネル反射は異なる屈折率を有する物質間を光が通過する際、Fig. 3 の様に一部が反射してしまう現象である。フレネル反射の反射率を式(1)に示す。

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2)$$

ダイヤモンドとNd:YAGの屈折率はそれぞれ2.39, 1.82であるため、式(1)より1.8%の反射が発生している。つまりレーザー光の往復を考慮すると3.6%の損失が生じていると考えられる。

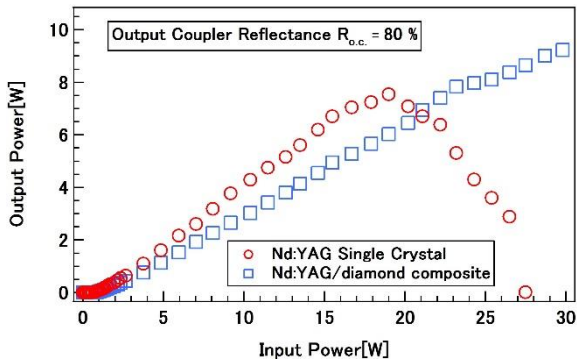


Fig. 2. Nd:YAG/diamond 複合構造の入出力特性

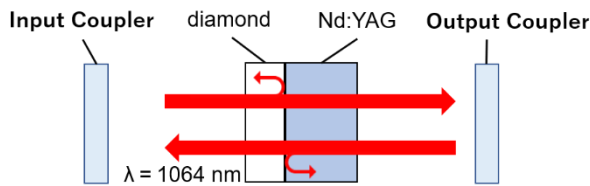


Fig. 3. フレネル反射

### 5. 接合界面に AR コートを施した複合構造の作製

フレネル反射による効率低下を解決するため、ダイヤモンドの接合界面に AR (Anti-Reflection) コーティングを施し、複合構造作製を行った。AR コーティングの対象波長は励起波長である 808nm とレーザー発振波長である 1064nm である。

複合構造作製の前に、コーティング面との常温接合の前例がなかったため、ダイヤモンドの代わりに無添加 YAG (3 mm × 3 mm × 1.5 mm) に同様のコーティングを施し、別の無添加 YAG との接合が可能か試みた。その結果 AR コーティングを施した結晶との接合に成功した。

続いて AR コーティングを施したダイヤモンド (3 mm × 3 mm × 1.5 mm) と Nd:YAG (3 mm × 3 mm × 3 mm) との接合を試みた結果、成功し新規複合構造作製を達成した。実際に作成した複合構造を Fig. 4 に示す。



Fig. 4. 界面にコーティングを施した複合構造

## 6. 複合構造の発振実験

### 6.1 入出力特性の測定

接合界面に AR コーティングを施した Nd:YAG/diamond 複合構造の発振実験を試み、レーザー発振に成功した。測定環境の概要図を Fig. 5 に示す。さらにこの環境下で発振動作を行い、入出力特性を測定した。Fig. 6 に Nd:YAG 単体、接合界面に AR コーティングが無しの複合構造、そして今回測定した AR コーティング有りの複合構造の計 3 つの入出力特性を示した。まず、先行研究で問題となっていたスロープ効率が AR コーティング無の複合構造では 35.5% であったが、コーティング有りの場合、44.9% となり向上しており単体の Nd:YAG の 46.3% とほぼ同じ値を示した。さらに、最大出力が単体の Nd:YAG と比べ約 52%、コーティング無の複合構造に比べ 24% 向上を達成した。この結果から接合界面の AR コーティングによりフレネル反射が抑えられたことに加え、熱による影響が緩和されていることが分かった。熱による影響の緩和は発生した熱がダイヤモンドへ効果的に移動していると考えられ、複合構造の優位性を示した。またこの結果から、常温接合の光学薄膜へ及ぼす影響が少ないと考えられる。

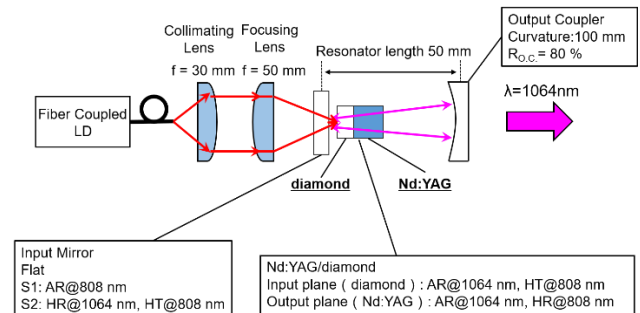


Fig. 5. 接合界面に AR コートを施した複合構造の入出力特性測定

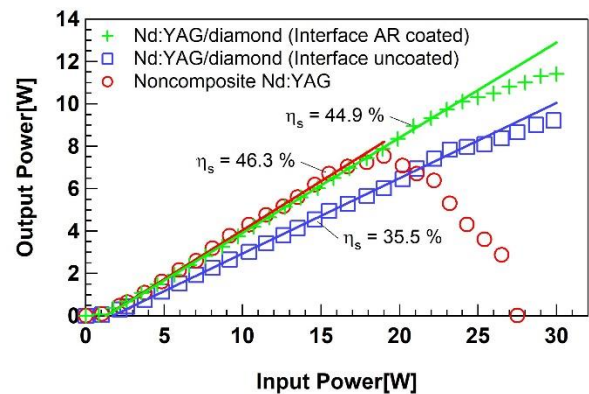


Fig. 6. Nd:YAG/diamond 複合構造の入出力特性

## 6.2 ビーム品質の測定

熱効果の低減を確認するためビーム品質  $M^2$  の測定を行った。測定法はスリット法を採用した。スリット法により、ビーム形状やビーム径を測定し、式(3)でフィッティングを行うことで  $M^2$  を求めた。

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left( \frac{M^2 \lambda (z - z_0)}{\pi W_0^2} \right)^2} \quad (3)$$

測定したビーム形状とフィッティングにより求めた  $M^2$  を Fig.7(a),(b)に示す。(a)は入力 12.7W で Nd:YAG 単体のビーム形状,  $M^2$  であり,(b)は入力 14.8W で複合構造のビーム形状,  $M^2$  である。単体に比べ複合構造は入力が大きいかにも関わらず形状がガウシアンビームであり,  $M^2$  も理論値に近い値となった。この結果から複合構造による熱効果の低減が確認できた。

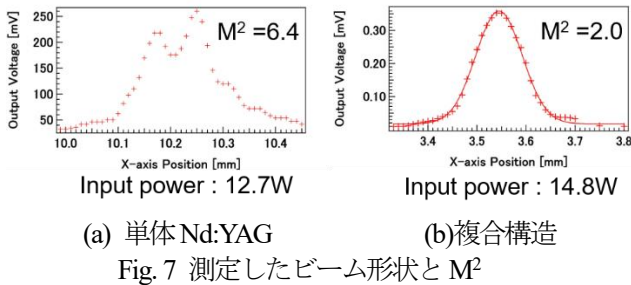


Fig. 7 測定したビーム形状と  $M^2$

## 7. 複合構造マイクロチップレーザの作製

続いて、接合界面にコーティングを施した複合構造の優位性示されたことから複合構造を Yb:YAG マイクロチップレーザに適用し、高出力化を試みた。マイクロチップレーザは小さい共振器長を得るためレーザ媒質に共振器ミラーの代わりとなる HR コーティングが入射端面に施されている。円柱型 Yb:YAG ( $\phi=5\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ ) このコーティング面両端に無添加 YAG ( $\phi=5\text{mm} \times 3\text{mm}$ ) を接合し YAG/Yb:YAG/YAG 複合構造の作製を試み、成功した。その複合構造を Fig. 8 に示す。

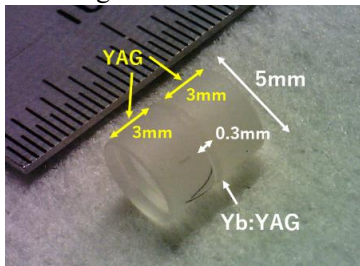


Fig. 8. YAG/Yb:YAG/YAG 複合構造

## 8. 複合構造マイクロチップレーザの発振実験

作製した複合構造マイクロチップレーザの発振実験を試み、レーザ発振に成功した。

## 8.1 スペクトル特性の測定

シングルモード発振を実現できているかを確認するためファブリーペロー干渉計によりスペクトル特性を測定した。発振光学系を Fig. 9 その結果を Fig. 10 に示す。式(1)から縦モード間隔は約 280GHz であるため理論的には一つしか現れないはずであるが Fig. 10 に示す通り FSR(10GHz)内に複数の縦モードを確認した。

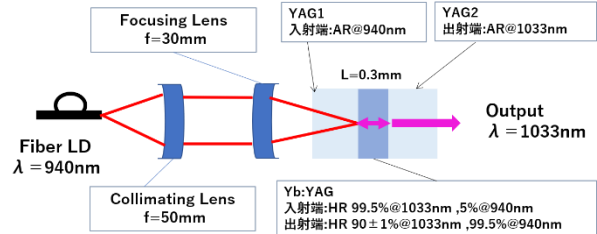


Fig. 9. 複合構造マイクロチップレーザの発振実験

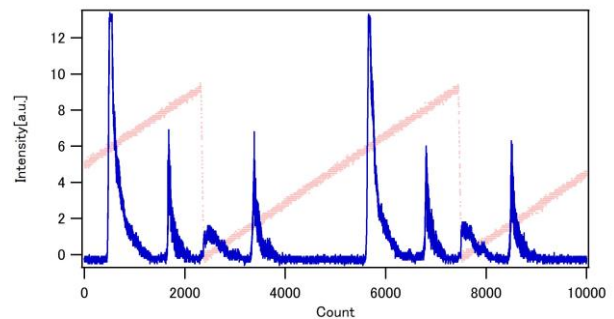


Fig. 10. 複合構造のスペクトル特性

## 8.2 入出力特性の測定

続いて作製した複合構造マイクロチップレーザの入出力特性を測定した。その結果を Fig. 11 に示す。複合構造には、入射面と出射面を接合する際に生じた干渉縞が存在する。その干渉縞の影響を考慮し、各干渉縞の部分に励起光を当てレーザ発振をさせ、入出力特性を測定した。閾値が干渉縞無し、ありで 0.73W に対し、二重の場合は 0.96W であった。また、最大出力も干渉縞無しが 38.1W、ありが 22.1W、二重が 21.2W であった。干渉縞が多いほど閾値も高く、最大出力も小さいことがわかった。さらに出力が上下する特性が確認された。

外部に追加のアウトプットカップラーを設置し、共振器の安定化を行った所、出力が 100mW オーダーまで上昇した。したがって作製した複合構造のコーティングは不安定共振器となっていると考えられる。

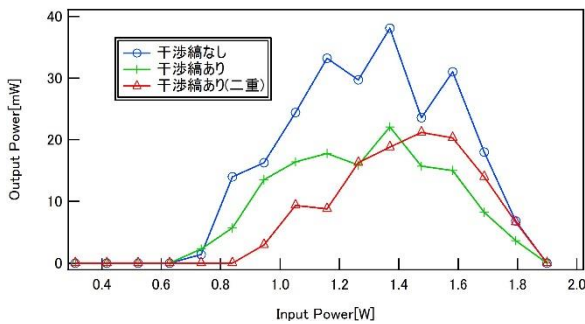


Fig. 11. 複合構造マイクロチップレーザの入出力特性

## 9. 総括

本研究では、効率低下の原因であるフレネル反射を抑えるべく接合界面にARコーティングを施した新規複合構造の作製を試みた。作製した複合構造の発振特性の評価を行ったところ、フレネル反射を抑え、さらなる高出力化を達成した。この成果から、マイクロチップレーザへの応用を考案し、Yb:YAGと無添加YAGによる複合構造マイクロチップレーザを作製し高出力化を試みた。

始めに、先行研究で問題となっていたフレネル反射の影響を低減するためダイヤモンドの接合面にARコーティングを施しNd:YAGとの接合を試み、成功した。

作製した接合界面にARコーティングのあるNd:YAG/diamond複合構造レーザの発振を試み、成功した。入出力特性は今回作製した複合構造がNd:YAG単体と同等のスロープ効率を示しており、先行研究で作製した複合構造よりさらに高い出力を示した。したがって接合界面のARコーティングによりフレネル反射が抑えられ、複合構造の熱効果の低減を確認した。結果として今回作製した複合構造の最大出力がNd:YAG単体に比べ52%、先行研究で作製した複合構造に比べ24%向上を達成した。さらにビーム品質の測定によって今回作製した複合構造が単体のNd:YAGと比べ熱効果が低減していることを確認した。

以上からARコーティングを施した複合構造の優位性を示した。

続いてマイクロチップレーザの高出力化を達成するため厚さ0.3mmのYb:YAGを無添加YAGで挟んだ複合構造マイクロチップレーザを作製し、レーザ発振に成功した。スペクトル特性はFSR内に二本のシングルモードが観測された。理論的には一つしか存在しないはずであるが、これはミラーの役割を果たすコーティングに何らかの原因があると考えられる。

入出力特性測定により干渉縞の影響は確認されたが、それ以前に出力が10mWオーダーと小さく、さらに出力値が上下する特性が得られた。さらに外部へアウトプットカップラーを設置し共振器の安定化を図

った所、出力が100mWまで上昇した。今後は以上の特性の原因が接合によるものか調べるため、単体のYb:YAGの特性と比較するべきであると考えられる。

## 謝辞

本研究に取り組むにあたり、庄司一郎教授より懇切丁寧な御指導と多大なる御助言を頂いたことを心より深く感謝致します。また、様々な場面でご協力頂きました庄司研究室の皆様には心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] F. Hanson, "Improved laser performance at 946 and 473 nm from a composite Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> rod," *Appl. Phys. Lett.* **66**, 3549-3551 (1995).
- [2] M. Tsunekane and T. Taira, "300 W continuous-wave operation of a diode edge-pumped, hybrid composite Yb:YAG microchip laser," *Opt. Lett.* **31**, 2003-2005 (2006)
- [3] M. Tsunekane and T. Taira, "High-power operation of diode edge-pumped, composite all-ceramic Yb: Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> microchip laser," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 121101-1-121101-3 (2007).
- [4] T. Suga, Y. Takagi, B. Gibbesch, and G. Elssner, "Structure of Al-Al and Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> interfaces bonded at room temperature by means of the surface activation method," *Acta Metall. Master.* **40**, S133-S137 (1992).
- [5] Ichiro Shoji, Yohei Okuyama, Hiromasa Ichikawa, Yoshimi Ariga, and Tomomi Onda, "Laser Characteristics of Nd:YAG/diamond and Nd:YVO<sub>4</sub>/diamond Composite Devices Fabricated with the Room-temperature-bonding Technique," in *Advanced Solid-State Lasers* (Optical Society of America, Washington, D. C., 2015), OSA Technical Digest Series, paper ATH2A. 14.
- [6] 平等拓範: "レーザビーム品質測定的基础", *レーザ研究*, **26** (1998) 723-729.

## 研究業績

### 有査読国内外学会発表

- ・CLEO/Europe-EQEC, 2017, CA\_4\_4
- 他 国内共著1件, 国外共著1件