

## 常温接合を用いた Yb 系複合構造レーザの開発

Development of Yb-doped composite lasers using the room-temperature bonding

電気電子情報通信工学専攻 城崎 智彦

18N5100014B Tomohiko SHIROSAKI

### 1. 研究背景・目的

近年、固体レーザは励起光源である半導体レーザの高出力化に伴い、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]を用いて複合構造を作製する。Yb:YAG マイクロチップレーザと無添加 YAG を接合し複合構造マイクロチップレーザを作製し、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(~10<sup>-5</sup> 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。

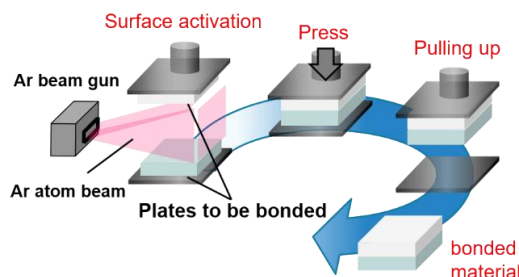


Fig.1. 常温接合のプロセス

### 3. マイクロチップレーザ

本研究で扱うマイクロチップレーザについて触れる。マイクロチップレーザとは共振器長が 1 mm 以下の固体レーザを指し、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。レーザ発振光の波長はレーザ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、共振器長を短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. 本研究室での過去の研究

過去の研究では接合界面に AR コーティングを施した Nd:YAG/diamond 複合構造の接合、発振に成功した [5]。過去の研究の複合構造の入出力特性を Fig.2 に示す。Fig.2 には 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 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、スロープ効率が AR コーティング無しの複合構造では 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。

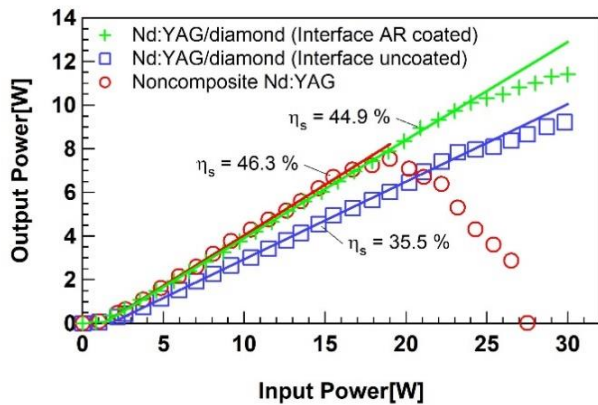


Fig.2 Nd:YAG/diamond 複合構造の入出力特性

### 5. 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を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コーティングが入出射端面に施されている。このコーティングが施された円柱型 Yb:YAG ( $\phi=5\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ )の両端に無添加 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.3 に示す。

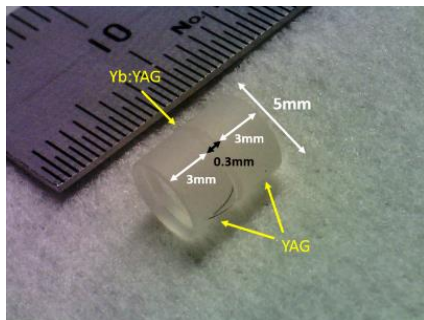


Fig.3 作製した複合構造

### 6. 新温度制御機構の作製と発振実験

温度制御機構である銅ホルダーを改良し、その銅ホルダーを用いて発振実験を行った。作製した複合構造マイクロチップレーザのレーザ発振に成功した。その入出力特性、縦モード測定、スペクトル測定の結果を Fig.4, Fig.5, Fig.6 にそれぞれ示す。

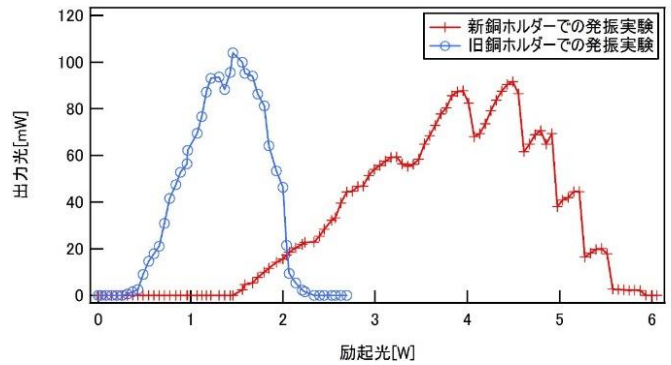


Fig.4 入出力特性

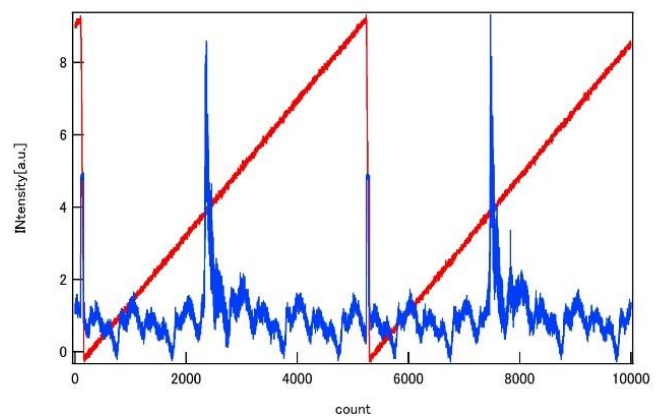


Fig.5 縦モード測定

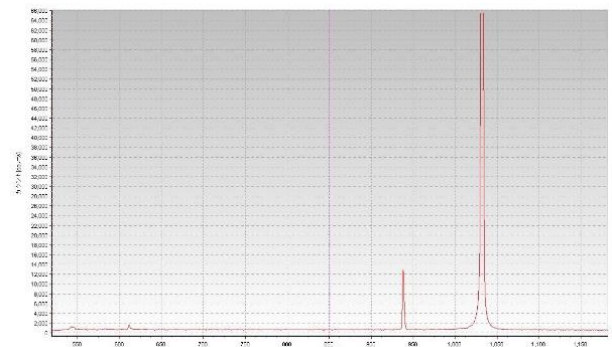


Fig.6 発振スペクトル

入出力特性については出力が小さくなるという結果となったが、これは結晶を銅ホルダーから外す等の光学系の組み換えの際に生じた複合構造の接合状況の影響で、違うサンプルで測定を行ったことで発生したサンプルの個体差程度の誤差であると考えら

れる。縦モードの測定に関しては 10 GHz の FSR の干渉計を用いたため、1つのモードが観測されるはずだが2つの縦モードが確認できた。これは接合により HR コーティングが変形し正常な共振器として機能していない、また低出力であることから正確な測定ができていないため2つの縦モードで発振してしまったのではないかと考える。また、発振スペクトルについては 1031.71 nm でピークを確認し、目的波長である 1033 nm の発振は確認されなかった。また、Yb:YAG 結晶の研磨の精度が悪く、結晶自体の平坦性が悪かったことが発振スペクトルや縦モードに影響したと考えられるが結晶の表面は HR コーティングが施されているためにその状態を測定することができなかった。

## 6. 新しい結晶を用いた複合構造マイクロチップレーザの開発

これまでで結晶の平坦性が悪いことが接合の成功しづらさや発信実験での理論値との誤差を生む要因であると考えられたため、新たに表面状態がより良い無添加 YAG ( $\phi=5\text{mm}\times 3\text{mm}$ ) と Yb:YAG ( $\phi=5\text{mm}\times 0.1\text{mm}$ ) を準備し複合構造の作製に取り組んだ。今回は Yb:YAG を前回よりも薄くし、HR コーティングを無添加 YAG に行った。作製した複合構造を Fig.6 に示す。

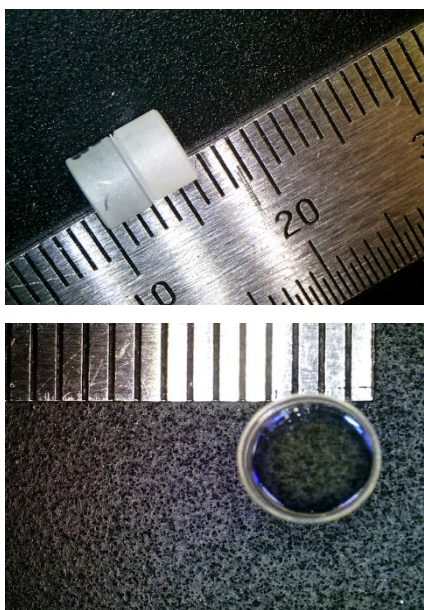


Fig.6 作製した複合構造

さらにこの複合構造マイクロチップレーザの発振実験を行い、発振させることに成功した。入出力特性特性を Fig.7 に示す。

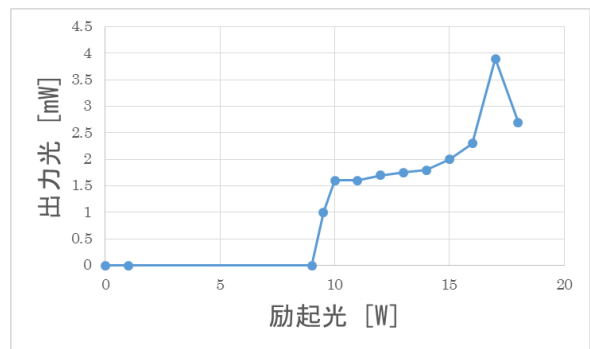


Fig.7 入出力特性

出力は以前のものよりもさらに小さくなった。さらに数日後には発振がみられなくなった。発振がみられなくなった原因については光学系のずれや周辺機器の故障が考えられる。出力が小さいことについては再現性もなく、他のデータも十分に測定できておらず、すぐに発振しなくなったために参考のできるデータではないと考える。

## 7. 総括

本研究では、HR コーティングを施した Yb:YAG と無添加 YAG による複合構造を作製し、高出力なマイクロチップレーザの開発を試みた。作製した発振特性の評価を行ったところ、結晶が不安定共振器となっていた。不安定共振器となる原因として、結晶の表面の平坦性が悪い、または熱引きが効率的に行えていないと考えた。そこで熱の影響があるか検証をするために、温度制御機構の改良を試みた。温度制御機構を改良後も不安定共振器であると予想されたため、新たに平坦性の高い結晶を用いての複合構造の作製を行った。

初めに、過去の研究で複合構造の優位性と常温接合のコーティングへ及ぼす影響が少ないことが示されたことで、マイクロチップレーザの高出力化を目指し、厚さ 0.3 mm 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 4 本の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。これはモード間隔の理論値が大きく測定可能な範囲が

小さい、さらには出力が弱いことで正確に測定できなかった可能性がある。

アウトプットカプラーを設置したところ、出力は完全に安定しなかった。さらに入力に2W付近で発振が止まることから、未だ不安定共振器であると考えられる。そこで、効率的に熱引きを行うために温度制御機構を改良した。

新温度制御機構の加工を企業に依頼することで、従来の切断面の凹凸や複合構造をセットする穴が大きいという問題点を解決することができ、複合構造と銅を密着させることに成功した。さらに励起中の結晶の温度を測定した結果、約20℃から約10℃まで冷却できていたことが分かった。

スペクトル特性はFSR内に2本のモードが観測された。旧温度制御機構と比べて減ったが、未だ単一縦モードは実現できていない。今回も前回と同様の原因が考えられる。

入出力特性の測定により、旧温度制御機構の最大出力が約100mWに比べて新温度制御機構は約90mWとわずかに下回る結果が得られた。これは複合構造の接合状況の影響で、違うサンプルで測定を行ったことで生じた、サンプルの個体差程度の誤差であると考えた。さらに新温度制御機構では、励起光を5.5W近くまで入力することができるようになり、旧温度制御機構よりも強励起が可能となった。

また、出射側の片面のみに接合を行った複合構造で発振実験を行った。結果として発振波長が長くなり、複合共振器での最高出力が約40%低下した。これらの結果から熱による影響により、ビーム品質が低下していることが分かった。

これらを踏まえ新たに平坦性の高い結晶を準備し、複合構造の作製を行い、これに成功した。発振実験を行い、発振をさせることに成功したものの出力のパワーが低かった。また、数日で発振がみられなくなり出力パワー以外の測定も行えなかった。結晶を取り外したが接合はきちんとされており、干渉縞も以前の固体と比べ少ないことも改めて確認した。よってこれらは光学系のずれや周辺機器の故障によるものだと考えられる。

## 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] H. Ichikawa, K. Yamaguchi, T. Katsumata, and I. Shoji, "High-power and highly efficient composite laser with an anti-reflection coated layer between a laser crystal and a diamond heat spreader fabricated by room-temperature bonding" *Optics EXPRESS*, **25**, pp.22797 (2017).