

# 常温接合を用いた高機能レーザーデバイスの開発

Development of sophisticated laser devices by use of the room-temperature-bonding technique

電気電子情報通信工学専攻 高柳 幸之介  
09N5100027H Konosuke TAKAYANAGI

## 1. はじめに

レーザーが誕生して50年を経た現在も、様々な観点からレーザーの高機能化を目指した研究が精力的に行われている。コヒーレント光としての特徴である、高出力・高ビーム品質・高スペクトル品質を同時に満たす光源としての性能向上が図られているとともに、高効率化や小型化といった実用的な見地からの性能向上も重要視されている。さらに、任意の波長でそれら高性能なレーザーを実現することも高機能化のキーポイントである。

高機能化の一つの観点として、産業応用などの実用的な利用を最終目的とした高出力固体レーザーの開発が求められている。高出力固体レーザーの開発において、レーザー媒質中の発熱は、熱レンズや熱複屈折によるビーム品質の劣化をはじめ、高出力化を阻む最大の要因となっている。さらに、Yb:YAGのような準三準位レーザー材料では、発振効率の著しい低下を招く直接的な原因となる。このような熱効果を低減するために、レーザー活性イオン添加材料と無添加材料を一体化し、添加材料で発生した熱を無添加領域に効果的に排熱できる複合構造（コンポジット）レーザーが報告されてきた。しかしながら、現状の複合構造レーザーの作製手法に対しては、そのプロセスに依存して使用できる材料が限られている。添加材料で発生した熱を効果的に排熱するには高い熱伝導性を有する無添加材料を用いて一体化することが望ましく、これまでの作製手法で使用できなかった高い熱伝導性を持つ材料を無添加材料として使用するために新たな複合構造レーザー作製手法の確立が求められている。

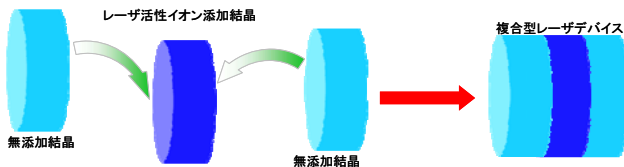


図1 レーザー活性イオン添加材料と無添加材料の複合型レーザーデバイス

本研究において我々は複合型レーザーの新たな作製手法を提案した。この手法が確立されれば次世代の高出力固体レーザーデバイスに使用する排熱材料として、高出力化に最適な材料の選択肢を大きく広げることができると期待される。

## 2. 複合型レーザーデバイス作製手法の提案

複合構造はこれまでに主に拡散接合という手法を用いて作製されており[1]、添加単結晶と無添加セラミックによる異種材料の複合構造も報告されている[2]。しかしながら、異なる熱膨張係数を持つ材料を拡散接合することは難しく、また無添加セラミックで用いることができるのは等方性の媒質に限定される。そこで我々は、常温接合法(the room temperature bonding: RTB)を用いて複合構造レーザーを作製することを提案する。常温接合法を用いれば、熱膨張係数の異なる材料同士の接合も可能となるだけでなく、高温プロセスの存在する拡散接合法におけるデバイス劣化の問題を解決できる。また、複合構造に用いる無添加結晶は熱伝導率の大きなものであることが望ましく、常温接合法を用いることで異種材料でも接合可能であることから、熱伝導率が極めて高い材料を用いて複合構造を作製することも可能となる。

## 3. 常温接合を用いた複合型レーザーデバイスの作製

常温接合[3]という技術は、東京大学の須賀教授らが材料分野において先駆的に研究を行っており、常温接合の他に表面活性化接合(surface activated bonding: SAB)などと呼ばれている。常温接合プロセスは次のようにおこなう。真空中で、2枚のプレート試料表面の酸化膜層や吸着分子をアルゴンビームでエッチングする。真空中でエッチングを行うと、表面から本来の原子層があらわれ不安定で活性な表面状態となる。その活性化面同士を密着させると原子間で接合が生じ、原子レベルの強固な接合が達成される。これまで、主に材料の分野において、誘電体材料や金属、半導体などの様々な材料における高品質な接合が実現している[4,5,6]。

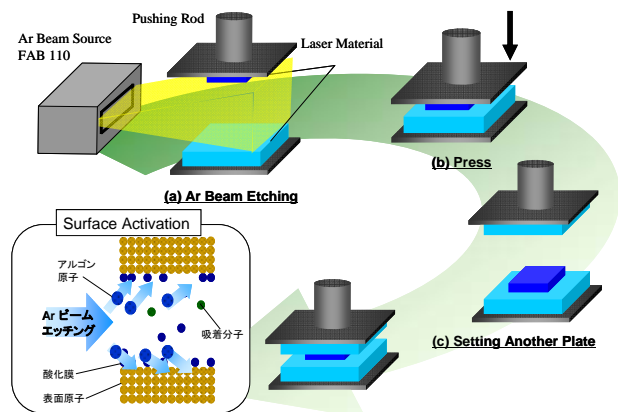


図2 常温接合(room temperature bonding: RTB)を用いた複合型レーザデバイス作製プロセス

我々は常温接合を用いて、レーザ活性イオン添加結晶にその母体材料である無添加結晶を常温接合した複合型レーザデバイスの作製を行った。図2に常温接合を用いた複合型レーザデバイスの作製プロセスを示す。接合する2枚のサンプルを上下向かい合わせに配置し、試料表面に対してアルゴンビームエッチングを行う(a)。エッチング後、2枚のプレートの表面は活性化状態を保持している。酸化膜の再吸着が起こる前に素早く表面を密着させ加圧を行う(b)。加圧後上部ロッドを引き上げる。複数枚接合する場合には、下部に新たな資料をセットし(c)、同様に接合を行う。

#### 4. Yb:YAG / YAG 複合型レーザデバイスの作製

Yb:YAGは励起波長が940nmに対し、レーザ発振波長が1030nmであるため原子量子効率が91.4%と高い。また励起による発熱率が10%前後に抑えられる。このため、代表的な固体レーザ材料であるNd:YAGと比較しても高効率、高出力化が期待できるレーザ媒質である。

しかし、Yb:YAGのような準3準位系のレーザ媒質は、レーザ下準位と基底準位のエネルギー差が小さくレーザ下準位が基底準位のマニフォールドに含まれており、レーザ媒質内で発熱が生じると、熱励起によってレーザ下準位に原子の分布が生じやすくなるため、反転分布が起こりにくくなってしまふ。このような特徴をもつYb:YAGは、排熱効率の向上が期待できる複合型レーザデバイス構造を採用することが効果的である。今回我々はYb:YAG結晶とYAG結晶を用いてYb:YAGの片側に無添加のYAGを常温接合した二層のもの(片側エンドキャップ)と、Yb:YAGの両側に無添加YAGを常温接合した三層のもの(両側エンドキャップ)の二種類の複合型構造を作製した。接合条

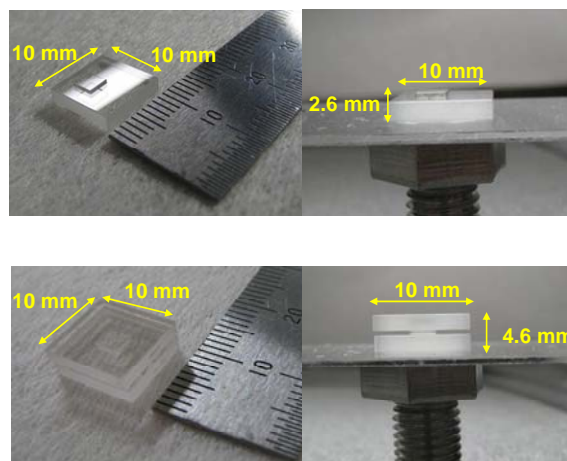


図3 Yb:YAG / YAG, YAG/Yb:YAG / YAG 複合型レーザデバイス

件は加速電圧1.5kV,電流15mA,照射時間~900s,試料間距離~2cmとした。図3は今回作製した複合型レーザデバイスである。

#### 5. RTBサンプルの機械的評価

RTBプロセスの評価を行うため、常温接合を行ったいくつかのサンプルを用いて引張張力試験を行った。これらのサンプルにおいてアルゴンビームの照射時間や照射角度などの接合条件を変えたいくつかのサンプルを準備し、接合界面がはがれるまでの強度を測定した。結果を表1に示す。最大でYAG結晶の51.3Kg/cm<sup>2</sup> という結果が得られ、GaPとYAGのサンプルにおいて比較的高い接合強度が得られた。同じ接合条件でも材料ごとの、接合強度は異なる結果となったことから、サンプル試料の表面プロ

表1 RTBの接合強度

測定サンプル	試料の大きさ (mm <sup>2</sup> )	接合強度 (N)	単位面積当たりの接合強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )
GaP	5×4	11.5~41.6	5.9~20.4
GaN	5×5	11.6~12.6	4.5~4.9
YAG	3×3	15.6~46.8	17.0~51.3
Si	7×7	7.0~32.0	1.4~6.4

ファイルの測定を三次元表面解析顕微鏡(ZYGO)で行った。GaP,YAGは広い範囲にわたり平坦であるが,GaN,Siは中央付近でも1~2 $\mu\text{m}$ 程度の歪みが出ており,平坦な試料とは言い難い。つまり,試料表面がより平坦な結晶プレートの方が未接合部の発生が減り比較的高い接合強度になりやすいといえる。以上の結果より,平坦性が良好で,表面状態のよい試料を用いれば,より接合強度が大きな複合型レーザデバイスを作製することが可能となる。

## 6. 複合型レーザデバイスの光学的評価

接合界面の光学的評価を行うため,日本分光株式会社製フーリエ変換赤外分光装置 (FT-IR)による透過スペクトルの測定を行った。測定に用いたサンプルはRTBにより作製したYb:YAGの片側に無添加のYAGを接合した二層のもの(Yb:YAG/YAG)と,Yb:YAGの両側に無添加YAGを常温接合した三層のもの(YAG/Yb:YAG/YAG),さらに比較用としての接合を行っていない単体のYb:YAG結晶である。測定結果を図4に示す。2層(Yb:YAG/YAG),3層(YAG/Yb:YAG/YAG)と層数が増してもYb:YAG結晶単体と比較して透過率の劣化は見られず,同等の透過率が得られているため,接合界面に散乱の原因となるようなものは無く,高品質なデバイスが作製できたと考えている。

## 7. 複合型レーザデバイスのレーザ発振実験

機械的,光学的な観点から,常温接合を用いて作製した複合型レーザデバイスは十分にレーザ発振実験に使用できると判断し,作製したサンプルにレーザ共振器を構成するためのコーティングを施しレーザ発振実験を行った。図5に今回使用した光学系を示す。励起光源には波長940nmのファイバ結合半導体レーザを用い,出力ミラーには1020~1080nmで反射率95%,曲率100mmのものを用いた。レーザデバイスは自作した銅製のサンプルホルダーの内部に格納しサンプルホルダーからさらに外

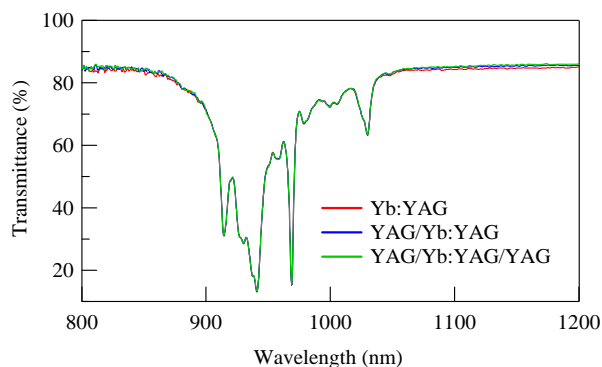


図4 Yb:YAG 複合型レーザデバイスの透過スペクトル

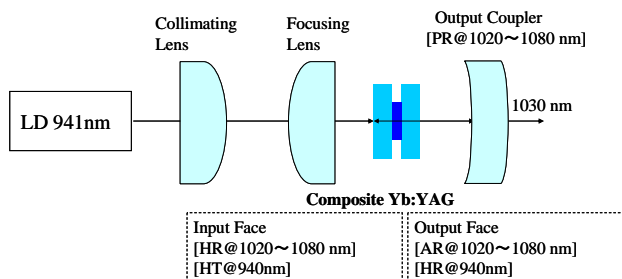


図5 複合構造レーザデバイスの発振実験に用いた光学系

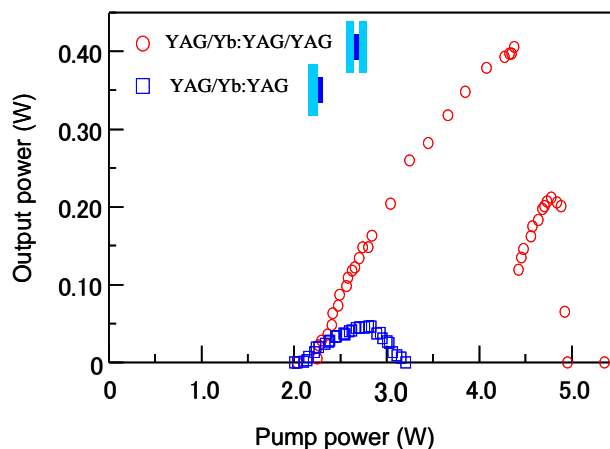


図6 Yb:YAG/YAG 複合構造レーザデバイスの入出力特性 (片側エンドキャップと両側エンドキャップの比較)

部に排熱される仕組みになっている。またサンプルホルダーはペルチェ素子によって18 $^{\circ}\text{C}$ の温度を保持している。

単体のYb:YAGは発振せず発熱により割れてしまったのに対し,複合構造ではレーザ発振に成功した。図6に片側エンドキャップ素子と両側エンドキャップ素子の入出力特性を示す。片側エンドキャップ素子ではスロープ効率5.1%,励起光吸収パワー2.8Wで最大出力46mWに達したのち出力が低下してしまったが,両側エンドキャップではスロープ効率が13.8%で約3倍,励起光吸収パワー4.4Wで最大出力406mWと約9倍となり,無添加YAGへ効果的に排熱が行われているのが実証される結果となった。

ただし,さらに励起パワーを大きくすると出力が低下してしまった。励起パワーを上げていくと出力が低下してしまったのは熱効果が大きくなりモードが変化してしまったためだと考えられる。熱効果が大きくなった原因として今回の発振実験の際に使用していたサンプルホルダーには図7に示すように,出射側の銅板と銅板の間にわずかに隙間があったため無添加YAGから銅板への排熱が

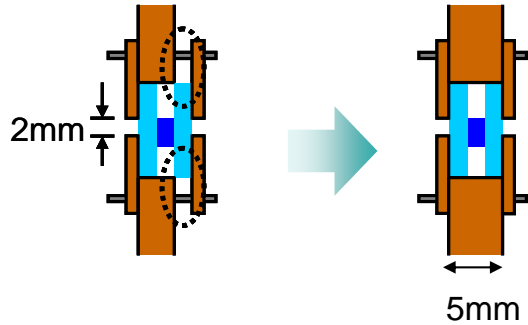


図7 複合型レーザーデバイスのサンプルホルダー改良

上手くいっていなかった。そこで、これまでよりも分厚い銅板を用いてサンプルホルダーを作製し、デバイスとサンプルホルダーとの間に隙間ができないようにした。そうすることで、18°Cに保持していた結晶ホルダーの温度を10°Cに保持することが可能となった。図8に改良後のホルダーで発振実験を行った結果を示す。最大出力570mWを得ることができ、サンプルホルダーの排熱効率も非常に重要であることが実証された。更なる高出力を実現するためには、素子構造や無添加YAGからさらに排熱を行う結晶ホルダーの構造を改善する必要があると考えられる。

## 8. 結論

本研究では常温接合を用いた複合型レーザーデバイスの作製法を確立することを目的として、常温接合プロセスを開発し、実際に複合型レーザーデバイスを作製し、レーザー発振実験を行った。機械的・光学的に発振実験に応用できるデバイスの作製に成功し、作製したデバイスの排熱効率の向上を実証できた。

今後の展望としては、常温接合プロセスの更なる高機能化と次世代の高出力レーザーの開発につながる複合型レーザーデバイスを提案し、作製する予定である。

## 謝辞

本研究に取り組むにあたり、庄司一郎教授より多大なる御指導と御助言を戴いたことを心より深く感謝致します。また共に研究を進めてまいりました研究室の皆様には多くのご協力を頂き、心より感謝を申し上げます。

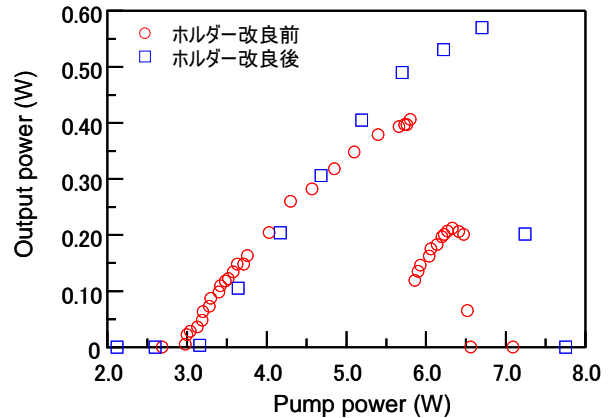


図8 サンプルホルダー改良後の入出力特性

## 参考文献

- [1] F. Hanson, "Improved laser performance at 946 and 473nm 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] T. Suga, Y. Takahashi, H. Takagi, B. Gibbesch, and G. Elssner: Acta Metall. Mater. **40**, S133 (1992).
- [4] T.R. Chung, L. Yang, N. Hosoda, and T.Suga: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. **121**, 203 (1997).
- [5] H. Takagi, K. Kikuchi R. Maeda T.R. Chung, and T. Suga: Appl. Phys. Lett. **68**, 2222 (1996).
- [6] H. Takagi, R. Maeda, N. Hosoda, and T. Suga: Appl. Phys. Lett. **74**, 2387 (1999).