

高出力超短パルス加工光源を目指した 大口径サファイア/YAG 接合体の開発

北見工業大学 地球環境工学科
准教授 古瀬 裕章
(2018年度 一般研究開発助成 AF-2018216-B3)

キーワード：レーザー，パルス通電接合，サファイア

1. 研究の目的と背景

近年，新規加工技術として超短パルスレーザー加工が注目を浴びている．パルス幅がピコ秒程度のため非熱的加工が可能であり，高速精密マイクロマシニング，軽量複合材料の切断や孔空け，透明材料の内部加工等，多くの応用研究が進められている．一方，現在市販されているパルスレーザー光源はフォトンコストが高いことから，レーザープロセッシング分野の発展には安価かつ高平均出力超短パルス光源の開発が重要である．

キロワット級の高出力超短パルスレーザー光源を実現するには，レーザー材料で発生する熱問題（波面歪，熱レンズ効果，熱複屈折等）と表面ダメージ問題の両方の解決が重要である．前者は主にレーザー材料内部で発生する温度勾配に起因し，高平均出力レーザー開発の共通課題となっていることから，レーザー光が熱の影響を受けないよう適した材料形状の選定と十分な冷却手法の確立が重要である．

有効な冷却手法として，高熱伝導透明材料を用いた伝導冷却が提案されている^{1, 2)}．高い廃熱が可能なことに加え，レーザーの伝搬方向に廃熱できることから径方向の温度勾配を低減でき，熱問題が抑制できる．さらに近年では，サファイアやダイヤモンドとレーザー材料との接合体が開発されており，その効果が示されている³⁻⁵⁾．このような異種材料の接合は，通常の熱拡散接合では材料間の熱膨張差が悪影響を与えるため困難であることから，表面活性化接合法が用いられている．

我々は最近，異種光学材料の新しい接合法としてパルス通電接合を提案し，Nd:YAG セラミックス/サファイアを用いた接合の原理実証を行った⁶⁾．大口径試料の接合にも取り組んでおり，本接合法は今後の高出力レーザー用の光学部品として期待できる．その一方で，パルス通電接合により得られた接合体の基本的な光学特性（透過波面，偏光特性）や，初期面精度が接合体の光学品質に与える影響についての知見は得られていなかった．今後，本接合体を用いた高出力パルスレーザー光源を開発する上で，これらの評価は重要である．このような背景から，本研究では上述の光学特性の評価や，最適な接合条件の探索を目的として研究を実施した．

2. 実験方法

2・1 パルス通電接合

図1に，パルス通電焼結装置(PECS)の原理図を示す⁶⁾．本焼結法は，真空中または不活性ガス雰囲気中で試料を一軸加圧しながら加熱処理をすることができる．類似の焼結法にホットプレス法があるが，主な違いは上下部の電極間に1キロアンペア程度のパルス電流が印加され，瞬時（例えば100°C/min）に試料を加熱することができる点である．粉体の焼結では比較的低温で緻密化が完了することが知られており，種々の機能性セラミックスの作製に用いられている．

接合体の開発に関しては，異種の金属間，金属とセラミックス，異種のセラミックス間等で報告がある⁷⁾．本接合法も一種の熱拡散接合と言えるが，低温熱処理が可能であることから熱膨張の違いによる悪影響が低減されると考えられる．一方，透明材料の接合に関しては著者らの報告以外にはほとんど報告されていない．

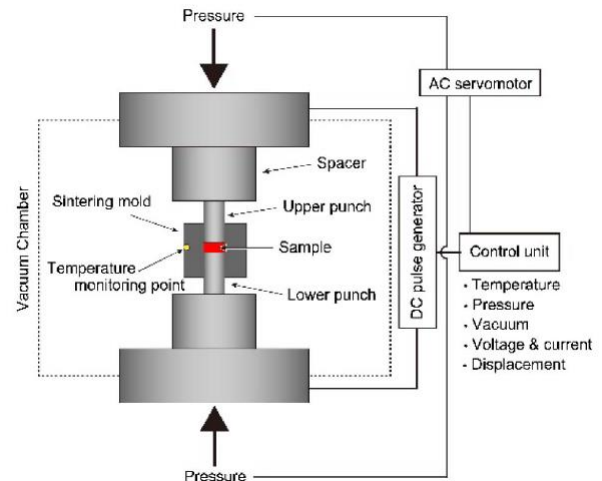


図1：パルス通電接合法の原理図⁶⁾．

本研究では，市販のサファイア単結晶（φ10 mm，厚み2mm）とNd:YAG（Yb:YAG）セラミックス（φ10 mm，厚み2mm）を使用した．接合界面の初期面精度が接合体に与える影響について調査をするため，サファイア単結晶はλ/10に，Nd:YAGセラミックスはλ，λ/5，λ/10程度に光学研磨を施した．図2に試料構造を示すように試料を接着した

後、炭素系焼結型に導入してパルス通電接合処理を行った。典型的な接合条件は、温度 1100 度、加圧力 64 MPa、保持時間 1 時間である。処理後に接合体の両端面に再度光学研磨を施し、透過スペクトル、透過波面、複屈折、レーザー特性の評価を実施した。

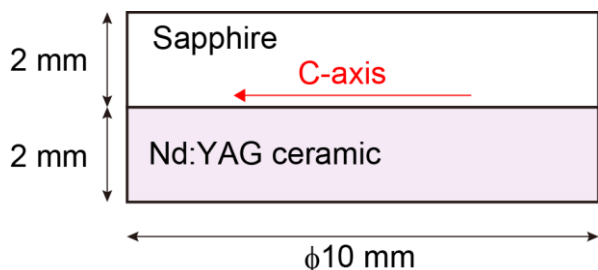


図 2: 接合体の構造図⁶⁾。

2・2 光学特性の評価

初期面精度の異なる接合体に対して、透過スペクトルを評価した。測定には紫外可視赤外分光光度計 (UV-3600) を使用し、初期面精度の違いによって接合後の光学品質を調査した。

図 3 に複屈折の測定系を示す。光源には He-Ne レーザーを用い、レンズを用いて光束径約 5 mm の平行光にした後、接合体に導入した。試料前後にグラントムソン偏光子を設置し、検光子を 5° 間隔で回転させた際のパワーをフォトダイオードセンサで検出した。

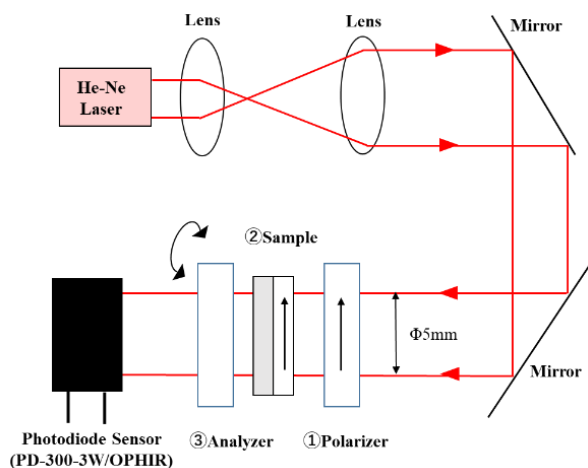


図 3: 複屈折実験系。

レーザー特性の評価では、平板のダイクロイックミラーと R=50 mm の出力ミラーを用いて、長さ約 25 mm の共振器を構成した。波長 808 nm、コア径 100 μm のファイバー結合型半導体レーザーを励起光源に用いて試験した。

3. 実験結果

3・1 サファイア/Nd:YAG セラミックス接合体

図 4 に初期面精度の異なるサファイア/Nd:YAG セラミックス接合体の透過スペクトルを示す⁸⁾。波長 1064 nm における透過率は、それぞれ 83.8% (λ)、84.6% ($\lambda/5$)、84.6% ($\lambda/10$) であり、初期面精度が $\lambda/5$ 以下であれば接合後の光学品質は理論透過率とほぼ同等であることが明らかとなった。また、接合後の透過波面は $\lambda/5$ 以下となることを確認しており、レーザー品質を維持できることを見出した。

複屈折の実験結果では、He-Ne の偏光度が 42 dB であるのに対して、接合体を挿入した場合においても 30 dB 以上の偏光度を維持していることを明らかにした。このことから、各接合体内部に応力複屈折が発生している可能性はあるが、レーザー品質に大きな影響はないと考えられる。また初期面精度による大きな違いは見られなかった。

図 5 に各初期面精度の接合体に対するレーザー入出力特性の結果を示す。初期面精度が $\lambda/10$ の試料では $\lambda/5$ 、 λ と比較してわずかにスロープ効率が高かった。特筆すべきは、初期面精度が λ においてもレーザー特性に大きな違いは生じていないことである。これは、大口径の接合体を作製する際に要求される面精度が低くても有効な接合体が得られる可能性を示唆しており、高パルスエネルギーかつ高繰り返し用のレーザー材料として期待できる。すでに図 6 に示すような 1 インチ径のサファイアと Nd:YAG セラミックスとの接合を実証しており⁹⁾、今後の大口径化 (例えば 2 インチ径) に向けて評価と検討を進める予定である。

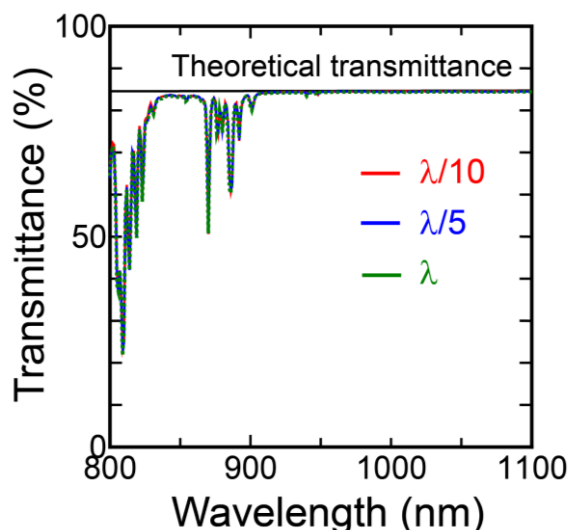


図 4: 初期面精度の異なるサファイア/Nd:YAG 接合体の透過スペクトル⁸⁾。

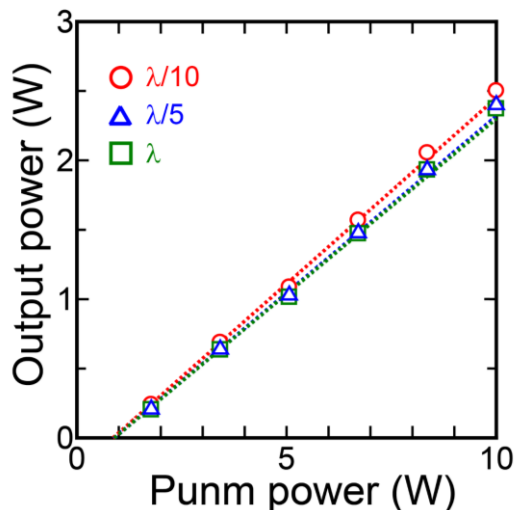


図5: サファイア/Nd:YAGセラミック接合体のレーザー入出力特性⁸⁾.

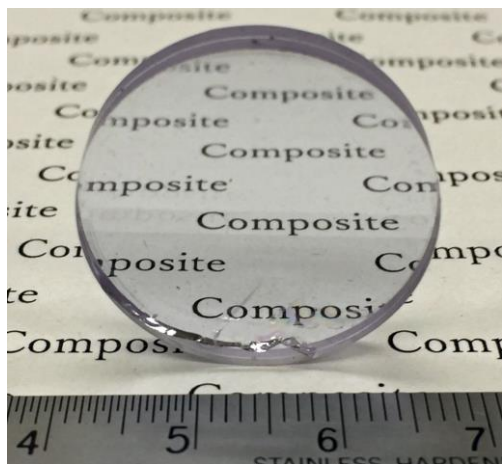


図6: 1インチ径のサファイア/Nd:YAG接合体⁹⁾.

3・2 サファイア/Yb:YAGセラミック接合体

本研究では、Yb:YAGセラミックに対しても接合試験を行った。Nd:YAGセラミックとの接合ではa-cutサファイアを用いたが、今後レーザー材料として利用する場合は複屈折による偏光解消が生じないc-cutサファイアとの接合実証も重要である。一方、サファイアとYAG間の熱膨張率の違いはc-cutサファイアとの接合の方が大きくなるため、同条件で接合可能かどうかを調査する必要がある。さらに、サファイア/YAG/サファイアのサンドイッチ構造の接合体が作製できれば、レーザー材料を両面から伝導冷却できるため、より効果的と考えられる。本節では、これらの原理実証とレーザー特性を評価した。

図7に各接合体の写真を示す。図7(a)のa-cutサファイアとの接合では、Nd:YAGの場合と同じ接合条件で高品質な接合体が得られ、接合後の透過波面はλ/3程度であった。図7(b)のc-cutサファイア/Yb:YAGセラミックの接合では、熱膨張の違いから同じ接合条件では接合はできなかったが、より高温あるいは長時間の適した接合条件を見出し、良好な接合体の作製に成功した。さらに、図7(c)に

示すようなa-cutサファイアとYb:YAGセラミックのサンドイッチ構造の接合にも成功しており、高い透過特性が得られている。

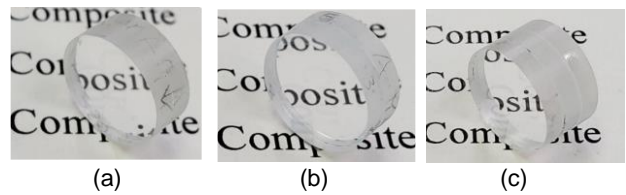


図7: (a) a-cut, (b) c-cut サファイアとの接合体写真。(c) a-cut サファイアとのサンドイッチ構造。

各接合体に対して、Nd:YAGセラミックの場合と同様の共振器を構成し、レーザー入出力特性の比較を行った。励起光源には波長940nm、コア径100μmのファイバー結合型半導体レーザーを用いた。また比較のためYb:YAG単体に対してもレーザー特性を評価した。

図8にレーザー特性の結果を示す。いずれの接合体においても励起光源の増大に伴い熱問題が発生することに起因したレーザー出力の低下が見られたが、その現象はYb:YAG単体において最も低い励起パワーで生じており、サファイアとの接合枚数が増大するほど熱問題が発生しにくいことがわかる。このことからサファイア伝導冷却効果が確認できた。また各試料でスロープ効率や発振閾値に大きな差が生じていないことから、接合体内での損失は無視できるほど小さいことがわかる。さらに、接合したサファイアの結晶方位がレーザー伝搬方向に対して異なっても、出力特性に大きな差は生じておらず、c-cutサファイアとの接合においても高品質な接合体が得られたと考えられる。

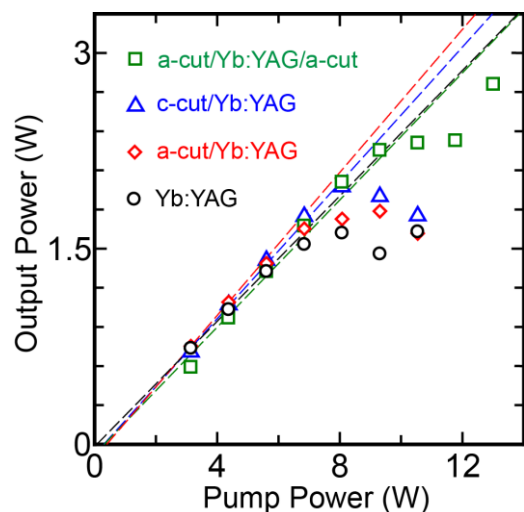


図8: サファイア/Yb:YAGセラミック接合体のレーザー入出力特性。

4. 結言

本研究では、高出力レーザー材料として有効と思われるサファイア/YAG セラミック接合体の大口径化および高品位化につなげることを目的に、接合に要求される初期面精度の条件や、接合体内の複屈折等の基礎特性を調査した。また、多段接合やサファイア結晶軸が接合条件に与える影響についても調査した。

初期面精度については、 $\lambda/5$ 程度の面精度で、透過率および透過波面において良好な接合体が得られた。偏光測定からは、接合による顕著な応力複屈折は見られなかった。サファイア/YAG/サファイアのサンドイッチ型構造の接合や、サファイア結晶軸の異なる場合においても良好な接合体が得られる条件を見出した。さらに、レーザー特性評価から、サファイア接合面が増加する程、伝導冷却効果によって高出力動作が可能となることを示唆する結果が得られた。

今後は、2インチ径を超えるような大口径接合体の作製や、増幅特性などを明らかにするとともに実用化に向けた検討を続ける予定である。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2018216-B3) による支援を受けて行われたものであり、謝意を表します。研究の実施にあたり、ご協力いただいた自然科学研究機構核融合科学研究所の安原亮先生に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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**, 100 (1997).
- 2) S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita, T. Kawashima, and Y. Izawa, "Sapphire-conductive end-cooling of high power cryogenic Yb:YAG lasers," *Appl. Phys. B* **80**, 635 (2005).
- 3) 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," *Opt. Express* **25**, 22797 (2017).
- 4) L. Zheng, A. Kausau, and T. Taira, "Drastic thermal effects reduction through distributed face cooling in a high power giant-pulse tiny laser," *Opt. Mater. Express* **7**, 3214 (2017)
- 5) L. Zheng, A. Kausas, and T. Taira, ">30 MW peak power from distributed face cooling tiny integrated laser," *Opt. Express* **27**, 30217 (2019).
- 6) H. Furuse, Y. Koike, R. Yasuhara, "Sapphire/Nd:YAG composite by pulsed electric current bonding for high-average-power lasers," *Opt. Lett.* **43**(13), 3065 (2018).
- 7) M. Tokita, "Recent and future progress on advanced ceramics sintering by Spark Plasma Sintering" *Nanotechnol. Russ.* **10** (2015) 261.
- 8) Y. Kagami, H. Tanaka, R. Yasuhara, and H. Furuse, "Optical characterization of sapphire/YAG ceramic composite by Pulsed Electric Current Bonding (PECB)," *The 10th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2021)*, Online virtual conference, 19-21 April, 2021. paper ALPS-Poster-05.
- 9) 古瀬裕章, 森田孝治, 安原亮, 金炳男, 吉田英弘, 鈴木達, 目義雄, 平賀啓二郎, "放電プラズマ焼結法によるレーザー光学素子の開発," *レーザー研究* **47**, 448 (2019).