

1064nm マイクロチップレーザの開発と応用

High pulse-energy microchip lasers and their applications

株式会社オプトクエスト 技術開発第2部

2020年5月24日

1. はじめに

Nd:YAG などのレーザ結晶にミラーコーティングを施して、モノリシックに構成される小型のレーザが 1980 年代後半に提案され、1989 年には CW 発振が、1994 年には受動 Q スイッチによるパルス発振が実現されている¹⁾²⁾。このようなレーザはマイクロチップレーザと呼ばれているが、構成部品が少なく、外乱に対してロバストであるといった長所を持ち、低価格でコンパクトなレーザを実現する候補として盛んに研究が進められてきた。また、2006 年には自然科学研究機構分子科学研究所のグループにより、ミリジュールを超える高いパルスエネルギーのサブナノ秒パルスを発生させる基本技術が確立し、以降、同グループを中心とした研究により急速な高強度化を遂げている³⁾⁵⁾。

我々は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 「ユビキタス・パワーレーザーによる安心・安全・長寿社会の実現」の支援を受け、同プログラムで開発された高出力マイクロチップレーザの製品化開発を 2017 年度より進めてきた⁶⁾⁷⁾。本稿では、高出力マイクロチップレーザの動作原理について簡単に説明し、弊社で開発を進めているレーザとその応用例を紹介する。

2. マイクロチップレーザの基本構成と動作原理

ここでは波長 1064nm で動作する受動 Q スイッチマイクロチップレーザを例にとり、基本構成と動作原理を説明する。図 1 に示すように、レーザ媒質としては Nd³⁺:YAG 結晶を用い、結晶端面に施された波長

1064nm の高反射率誘電体多層膜と別体の部分反射ミラーとでレーザ共振器を構成する。また、内部に Cr⁴⁺:YAG 結晶を挿入し、パルス発生のための光スイッチとして作用させる。Cr⁴⁺:YAG は入射光量が低い間は比較的高い吸収を示すが、入射光量が高くなると透明化し、透過率が高くなるという性質を持つ(可飽和吸収)。このレーザ共振器を図 1 のように波長 808nm の励起光により端面励起すると、Nd³⁺:YAG 結晶内に反転分布が形成されて利得が生じるが、励起開始直後は Cr⁴⁺:YAG の高い吸収によりレーザは発振できない。しかし、この間に Nd³⁺:YAG 結晶は励起され続けるので、結晶内部の反転分布密度は高くなり、利得(エネルギー)が蓄積され、それとともに共振器内の光量が徐々に増加する。そして、共振器内の光量がある程度高くなったところで Cr⁴⁺:YAG が透明化し、レーザ発振して蓄積されていたエネルギーが短時間の間に放出され、波長 1064nm の短光パルスとなって出力される。(Cr⁴⁺:YAG の可飽和吸収作用により共振器の Q 値を変化(スイッチ)させてパルスを形成することから、受動 Q スイッチ動作と呼ばれる。)

出力される光パルスの時間幅は、共振器長に比例して短くなる⁵⁾⁸⁾。図 1 のような構成では、結晶長と同程度まで共振器長を短くすることができ、長さ 10mm 以下の短共振器を構成することも容易である。この場合、パルス時間幅としては、500~700psec 程度が得られる。また、図 1 では、Nd³⁺:YAG、Cr⁴⁺:YAG、エンドミラーを別体として表示しているが、接合技術を用いてモノリシックに構成すれば非常にコンパクトなパルスレーザが実現可能である³⁾。

発生するパルスエネルギーは、Nd³⁺:YAG の Nd 濃度、

Cr:⁴⁺YAG の初期透過率、エンドミラーの反射率等、多くのパラメータによって決まるが、最適化することによりサブナノ秒でミリジュールクラスのパルスエネルギーを得ることが可能となっている⁴⁾。また、横モード（ビーム形状）は、共振器内部の発振モードに依存するが、マイクロチップレーザの場合、結晶内部で発生した熱による熱レンズ効果を有効に利用して、発振モードを形成することが多い。このため、結晶内部の温度分布の制御は非常に重要である。高いパルスエネルギーを発生させる場合は内部の強い熱レンズの影響を受けるため、ビーム品質は一般的に悪くなる。（この他、内部の熱複屈折により偏光度が著しく劣化するという問題もある。）この問題に対処するために、結晶自体に冷却構造を導入する方法が提案され、良好なビーム品質を保ちながら 20mJ を超える高いパルスエネルギーが得られている⁹⁾。また、マイクロチップレーザのように高いエネルギーがコンパクトな共振器内に閉じ込められる場合は、内部のレーザ媒質等の損傷が問題となるが、結晶を光学セラミックス材料に置き換えることにより耐性を向上し、更なる高出力化が指向されている³⁾。

ングした Cr:⁴⁺YAG 結晶を挿入し、受動 Q スイッチ動作を実現する。共振器長は約 10mm であり、共振器全体をペルチエ素子により温度一定制御している。図 2 はレーザ共振部を含むヘッドの外観であるが、サイズ 30mm x 40mm x 125mm（突起部除く）のコンパクトな筐体内に励起光学系、レーザ共振器、ペルチエ素子を収めている。また、内部の光学部品はスポット溶接により固定されており、調整箇所のない安定な共振器を構成している。

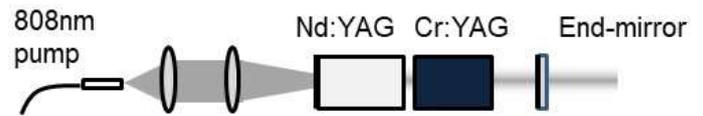


図 2 試作したマイクロチップレーザの構成とヘッド部

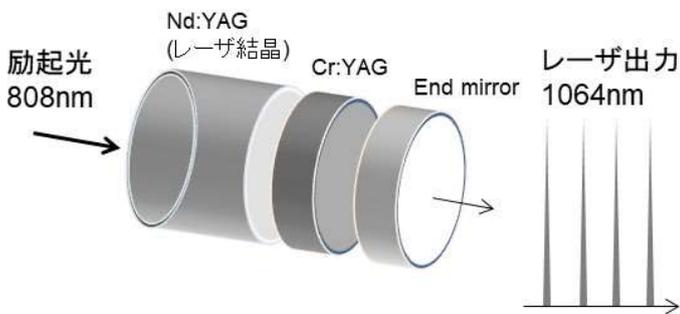


図 1 受動 Q スイッチマイクロチップレーザの基本構成

3. 開発した高出力マイクロチップレーザの性能

図 2 に試作したマイクロチップレーザの構成とヘッド部の外観を示す。波長 808nm の半導体レーザからのファイバ導光された励起光を 2 枚のレンズで Nd³⁺:YAG 結晶内部で集光している。共振器は、Nd³⁺:YAG の端面に施された 1064nm 高反射誘電体多層膜と部分反射ミラーにより構成され、部分反射ミラー側から出力パルスが取り出される。また、両端を 1064nm 帯で無反射コーティ

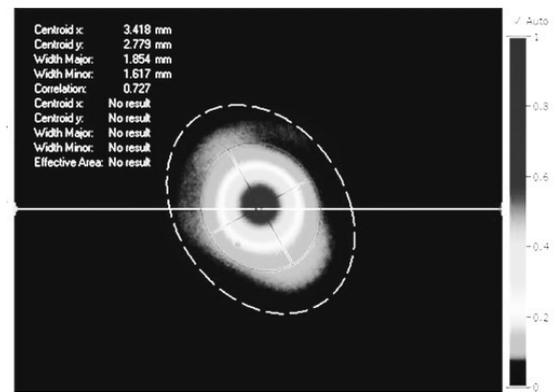


図 3 高出力マイクロチップレーザ試作機のビームプロファイル(3.7mJ, 100Hz)

本試作機の出カパルスエネルギーは 3.7mJ、繰り返し周波数 100Hz であり、コンパクトなヘッドにもかかわらず、非常に高いエネルギーの光パルスを得ることができる。図 3 に出力ビームのプロファイルを示す。中央部は真円に近い良好なビーム形状が得られている一方で、熱

レンズの影響による裾部の広がりや楕円化がみられる。パルス時間幅は 700psec (半値全幅) であり、パルス波形は安定である。パワー安定性についても、起動開始の数パルス分を除いては非常に安定で、1 時間で 0.5%rms 程度である。ポインティングスタビリティも $\pm 10 \mu \text{rad}$ (1 時間、ヘッド静置時) と良好である。

4. 開発したマイクロチップレーザの応用

開発したマイクロチップレーザは、サブナノ秒のパルス幅でミリジュールを超える光パルスが得られており、ピークパワーはメガワットを超える。このため、照射対象物によっては、集光しない状態でもアブレーションが観測されるほか、集光状態では空中でのブレイクダウン現象を観察することも可能である。用途としては、従来のレーザ加工だけでなく、レーザ点火、レーザ超音波探傷などの先端計測、皮膚治療などの美容・医療分野への応用が検討されている。

また、手のひらサイズのレーザヘッドからミリジュールクラスのパルスエネルギーが得られることから、レーザ自体を直接ロボットアームに搭載して対象物に直接照射するような使い方も可能になると思われる。ここでは、大阪大学浅井研究室で進められている革新的スマート溶接システムへの応用について紹介する¹⁰⁾。図 4 にその検証試験の様子を示すが、アーク溶接の状態をリアルタイムにモニタすることが可能な溶接システムであり、溶接と検査工程 (補修) を同時に行うインプロセス計測を目標としている。溶接状態のモニタとしてレーザ超音波法を用いているが、超音波を加振するための光源として開発したマイクロチップレーザが使用されている。従来の mJ クラスの固体レーザではサイズ・重量の問題があり、ロボットアームに搭載するのも困難であったが、本機のような手のひらサイズのヘッドでは、図 4 のように溶接ヘッドに直接搭載することが可能である。これにより現場で溶接しながら内部の欠陥等を検知するインプロセス計測がデモンストレーションされている。¹⁰⁾

以上のように、従来のレーザにはない性質を持つことから、前述した ImPACT プログラム内でも数多くのアプリケーション開発がなされている⁶⁾⁷⁾。これらの新しい

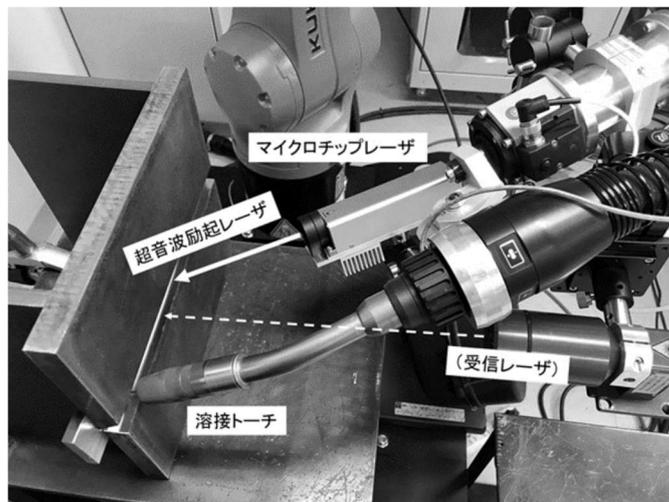


図 4 革新的スマート溶接システムへの適用例 (写真提供：大阪大学大学院工学系研究科浅井研究室)



項目	仕様
波長	1064nm
パルスエネルギー	>2.5mJ
繰り返し周波数	20-100Hz
パルス幅	<1nsec
冷却方式	空冷(ペルチエ)
偏波	直線偏波

図 5 開発中のマイクロチップレーザの外観と仕様

応用の開拓に貢献すべく、弊社ではレーザ使用経験の少ないユーザでも簡単に使用できるような製品機の開発を進めている。図 5 に ImPACT プログラム期間中に開発した試作機の外観と仕様 (暫定) を示す。

5. むすび

弊社で開発した高出力マイクロチップレーザについて紹介した。コンパクトなサイズでありながら、従来の大型固体レーザでしか出せなかったような高いパルスエネルギーを発生させることが可能であり、サブナノ秒パルス特有の高いフルエンスによる新しいアプリケーションが生まれつつある。今後は、従来のレーザの単なる置き換えだけでなく、新しいレーザの使い方の開拓を期待したい。

謝辞

本報告は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施された成果です。本開発においてご協力・ご指導を賜りました理化学研究所／自然科学研究機構分子科学研究所 平等拓範教授、川崎泰介様、自然科学研究機構分子科学研究所 佐野雄二様、東芝エネルギーシステムズ株式会社 三浦崇広様、大阪大学大学院工学系研究科マテリアル生産科学専攻浅井知教授、野村和史助教に謝意を表します。

執筆

株式会社オプトクエスト 技術開発第2部

参考文献

- [1] J. J. Zayhowski and A. Mooradian, "Single-frequency microchip Nd lasers," *Opt. Lett.*, vol. **14**, no. 1, pp. 24-26, 1989.
- [2] J. J. Zayhowski and C. Dill, "Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers," *Opt. Lett.*, vol. **19**, no. 18, pp. 1427-1429, 1994.
- [3] T. Taira, "Domain-controlled laser ceramics toward giant micro-photonics [invited]," *Opt. Mater. Express*, vol. **1**, no. 5, pp. 1040-1050, 2011.
- [4] T. Taira, Y. Matsuoka, H. Sakai, A. Sone, and H. Kan, "Passively Q-switched Nd:YAG microchip laser over 1-MW peak output power for micro drilling," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science*

Conference and Photonic Applications Systems Technologies, Technical Digest, paper CWF6, 2006.

- [5] H. Sakai, H. Kan, and T. Taira, ">1MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd:YAG microchip laser," *Opt. Express*, vol. **16**, no. 24, pp. 19891-19899, 2008.
- [6] 佐野, "ユビキタス・パワーレーザーによる産業と科学技術の振興," *オプトロニクス*, no.4, pp. 140-141, 2018.
- [7] 佐野, 三浦, 北村, "ImPACT プログラムにおけるマイクロチップレーザ製品化と適用技術開発," 第90回レーザ加工学会講演論文集, pp. 139-143, 2018.
- [8] J. J. Degnan, "Optimization of passively Q-switched lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. **31**, no. 11, pp. 1890-1901, 1995.
- [9] L. Zheng, A. Kausas and T. Taira, "Drastic thermal effects reduction through distributed face cooling in a high power giant tiny laser," *Opt. Mat. Express*, vol. **7**, no. 9, pp. 3214-3221, 2017.
- [10] 浅井知, "革新的スマート溶接システムの開発," *溶接技術*, vol. **65**, No. 8, pp.107-111, 2017.