

令和3年度学内公募研究（実用化型）
〔研究論文〕

アレキサンドライトレーザーの小型化技術の開発

佐藤 篤¹⁾, 平間 圭悟²⁾

Development of a compact alexandrite laser

Atsushi SATO¹⁾, Keigo HIRAMA²⁾

Abstract

A compact alexandrite laser pumped by a blue laser diode was developed. In continuous-mode operation at a crystal temperature of 70°C, an output power of 0.21 W was obtained for an absorbed pump power of 0.77 W. The slope efficiency with respect to absorbed pump power was 44% at an output coupling of 3%. The laser was operated at a central wavelength of 756 nm. Pulsed operation was achieved in a gain-switched mode. A single laser pulse with a pulse width of 750 ns was obtained at a pulse repetition frequency of 150 Hz.

1 はじめに

波長0.7 μ m帯のレーザー光は、第2高調波発生により1回の波長変換で紫外（UV-A）領域に到達できることから、センシング分野や加工分野で必要とされる高出力パルス紫外光源の基本波として利用価値が高い¹⁾。しかしながら、波長0.7 μ m帯は、代表的な固体レーザーとして知られるNd:YAGレーザーの基本波（波長1064nm）とその第2高調波（波長532nm）のギャップ波長領域にあたる。さらに、波長0.7 μ m帯で発振可能なレーザーとして知られるチタンサファイアレーザーは、一般に励起光源にQスイッチNd:YAGレーザーの第2高調波が用いられるため、レーザーシステムが大型あるいは複雑になりやすい。このような背景から、波長0.7 μ m帯は、安価で高出力な小型パルスレーザーが入手困難な波長領域となっている。筆者らは、半導体レーザー励起下における波長0.75 μ m帯アレキサンドライトレーザーの高効率連続発振動作に成功し、出力パワー1.02W、入射励起パワーに対するスロープ効率36%を達成している²⁻⁴⁾。これを第2高調波発生により紫外パルス光源とするには、レーザー動作のパルス化及び高出力化が必要であり、さらに実用化を

1) 東北工業大学 工学部 情報通信工学科

Department of Information and Communication Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology.

2) 東北工業大学大学院 工学研究科 通信工学専攻

Department of Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku Institute of Technology.

見据えると小型化及び省電力化を実現することが望ましい。そこで、本研究ではダイクロイックコーティングを施した小型レーザー結晶を用いたアレキサンドライトレーザーの開発とそのパルス動作試験を行ったので報告する。

2 レーザーの設計及び試作

2.1 レーザー結晶の製作

図1にレーザー結晶の仕様及び共振器構成例を示す。アレキサンドライト結晶のCrドープ率は0.2at.%とし、結晶サイズは0.9mm(a)×3mm(b)×3mm(c)及び1.9mm(a)×3mm(b)×3mm(c)の2種類とした(a, b, cは結晶軸)。このうち、レーザー発振実験では、高い励起光吸収率が期待できる厚さ1.9mmの結晶を使用した。結晶の励起側端面(DM1)には、励起光に対し高透過($T>97\%$)、レーザー光に対し全反射となるダイクロイックコーティングが施されており、この面が共振器の平面全反射鏡となるように設計されている。励起波長は、波長443nm及び638nmの2波長を想定した。出力側端面となるDM2には、レーザー光に対する無反射コーティングに加え、励起光に対する高反射コーティングを施し、1回目のパスで吸収されなかった励起光を反射し2回目のパスでさらに吸収率を高めることを検討したが、成膜の複雑さから今回は見送り、無反射コーティングのみとした。この無反射コーティングの励起波長での反射率は、波長443nmに対して15%、波長638nmに対して1%であった。DM2面のコーティングは、将来的には部分反射コーティングに置き換えマイクロチップレーザーとすることを目指しているが、現時点では出力結合及びパルス化方法の最適化を行うため、出力鏡を外部に取り付けられる構成とした。図2(a)及び(b)にそれぞれ試作したレーザー結晶及びその固定用のマウントを示す。写真の結晶は、厚さ0.9mmのタイプのサンプルである。アルミブロックの上にペルチェ素子を取り付け、その上に銅製結晶マウントを固定した。結晶マウントとアレキサンドライト結晶の間には、厚さ50 μm のインジウムシートを挿入し、熱伝達率を高めた。このレーザーでは、共振器長を最短にした場合、励起光学系を除く共振器部分を長さ30mm以下にまで小型化することが可能である。

2.2 励起光源の選定

筆者らのグループによる先行研究では、アレキサンドライトレーザーの励起は波長637nm付近の赤色半導体レーザーにより行ってきた²⁻⁴⁾。一方、近年では、GaN系の青色半導体レーザーもまた高出力化が進み、低価格の市販品が入手可能になってきている。赤色半導体レーザーでは、容易に入手可能な市販製品の波長領域が635～640nm付近に限られるのに対し、青色半導体レーザーでは、波長405～460nmの範囲に広く製品ラインナップがあり、励起光源の選択肢が広い。そこで本研究では、実用化に向けた構成部品の入手性向上を考慮し、青色半導体レーザー(THORLABS L450G1)を励起光源に用いた。励起用半導体レーザーの最大光出力は3.2Wであり、中心波長は443nmであった。励起光の集光光学系を含むレーザーの構成を図3に示す。図3の写真では、反射率97%の凹面出力鏡を結晶のDM1面から距離100mmの位置に配置している。出力鏡は、レーザー結晶マウントに一体化させることも可能であるが、本実験での反射率ではレーザー発振が得られなかったため、図3の構成では結晶内での共振器モードが絞られる位置に配置している。励起光は、焦点距離8mmのコリメートレンズにより平行光線へとビーム整形され、

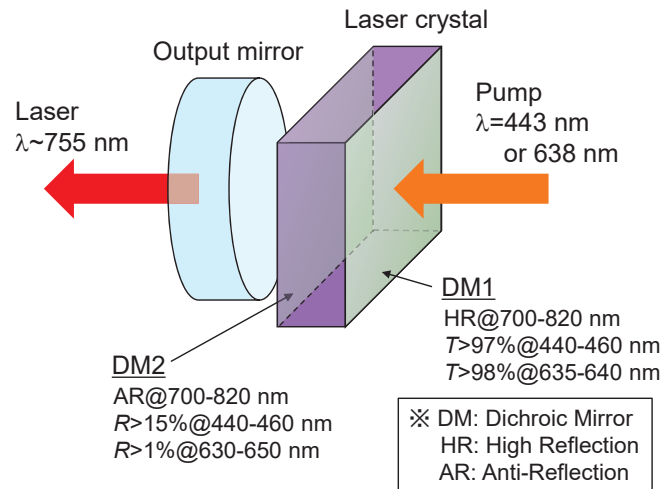


図1 レーザー結晶の仕様と共振器構成.

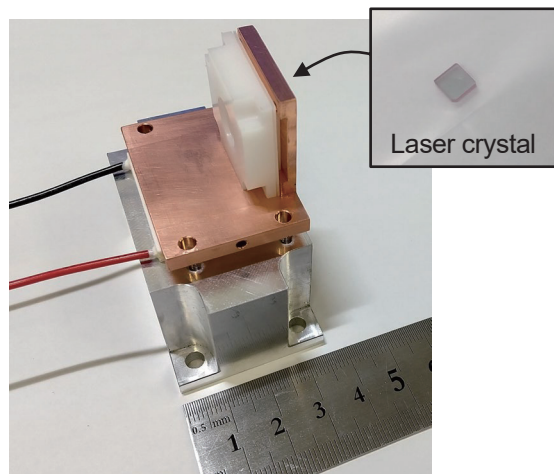


図2 試作したレーザー結晶と結晶マウント.

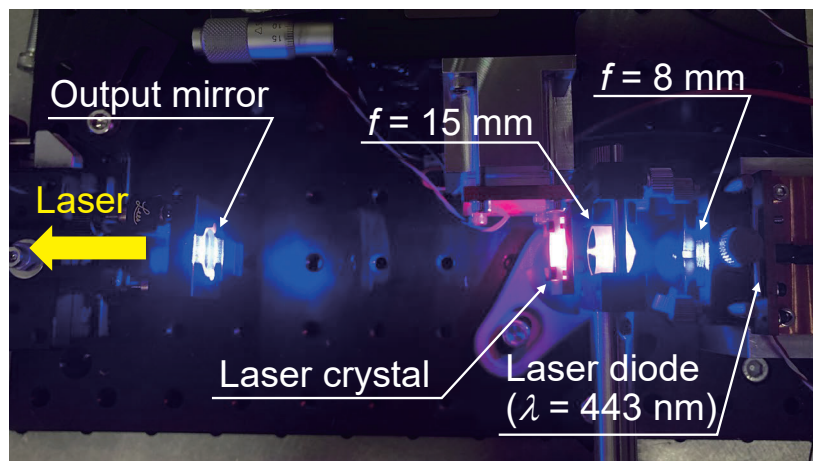


図3 試作した青色半導体レーザー励起アレキサンドライトレーザー.

焦点距離 15mm のフォーカスレンズにより結晶内に集光される。集光スポット半径は、ナイフエッジ測定の結果、 $15\mu\text{m}$ （垂直方向） \times $58\mu\text{m}$ （水平方向）であった。励起光がアレキサンドライト結晶に吸収されると赤色波長帯の蛍光が発生するため、結晶は赤紫色に発光しているかのように見える（図3の中央部参照）。

3 実験結果

3.1 入出力特性

図4に連続発振時のアレキサンドライトレーザーの入出力特性を示す。横軸は吸収励起パワー、縦軸はレーザー出力パワーを示している。結晶温度は、 $20\sim 70^\circ\text{C}$ まで変化させた結果、最も高出力が得られた 70°C とした。図4より、励起パワーの増加に対して、出力パワーはやや非線形性を示しながら増加していくことが確認された。これは、実験で使用了光共振器の共振器モード半径が $100\mu\text{m}$ 程度であるのに対し、励起光の集光スポット半径が $60\mu\text{m}$ 以下と小さいことから、励起パワーが低いときにはモードマッチング効率が低下しているためであると考えられる⁵⁾。励起パワーが 0.5W 以上のデータにフィッティングした場合のスロープ効率は44%に達することがわかった。また、励起パワー 0.77W に対し最大出力パワー 0.21W が得られた。本実験では、励起光学系に使用したオプティクス類が青色波長帯において無反射コーティングされておらず、励起用半導体レーザーの光出力のうち結晶に吸収される割合が25%と低かった。適切なコーティングを施したオプティクスに置き換えることにより、励起光吸収率ならびに出力パワーは2~3倍程度にまでは改善できる見込みがある。また、その改良により、本来の小型構成（共振器長 $20\sim 30\text{mm}$ ）でのレーザー動作が可能になると考えている。

図5に光スペクトラムアナライザーで測定した発振スペクトルを示す。波長 443nm の位置にわずかに励起光のスペクトルが確認できる。レーザー光のスペクトルは、中心波長 756nm であることがわかった。結晶温度 $20\sim 70^\circ\text{C}$ の範囲では、発振波長の大きな変化は確認されなかった。

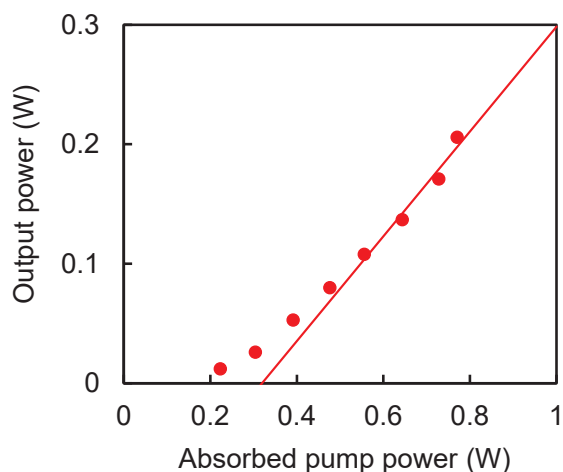


図4 入出力特性.

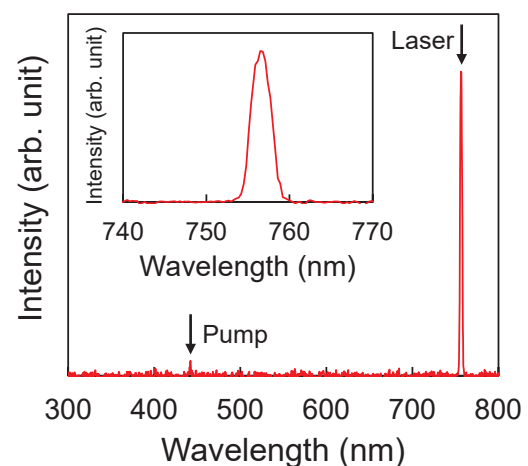


図5 発振スペクトル.

3.2 レーザーのパルス化

レーザーのパルス化手法の代表的なものとしては、Qスイッチ法とゲインスイッチ法があるが、本研究では励起用半導体レーザーの駆動電流の制御のみでパルス化が可能でかつ光学の追加の必要がないゲインスイッチ法を用いた。図6(a)及び(b)にそれぞれ半導体レーザーの駆動電流パルスとレーザーパルスのタイミング及びゲインスイッチパルス波形を示す。駆動電流パルス幅は $58\mu\text{s}$ とした。パルス繰り返し周波数は、半導体レーザー用電源の仕様上、最大デューティー比が7.5%であったため、150Hzで制限された。図6(b)に示されるように、レーザーはシングルパルスで動作しており、そのパルス幅は半値全幅で750nsであった。本実験に使用した光共振器の共振器長は100mmであるが、最終的には出力鏡をレーザー結晶部と一体化することにより、共振器長は20～30mmにすることを狙っている。パルス幅が共振器長に比例することや今後の高出力化も短パルス化に寄与することを考慮すると、パルス幅は数nsのオーダーにまで短くできると考えている。さらに、ゲインスイッチ法によるパルス化技術開発と並行して、パッシブQスイッチ法によるパルス化技術の開発にも着手する予定である。

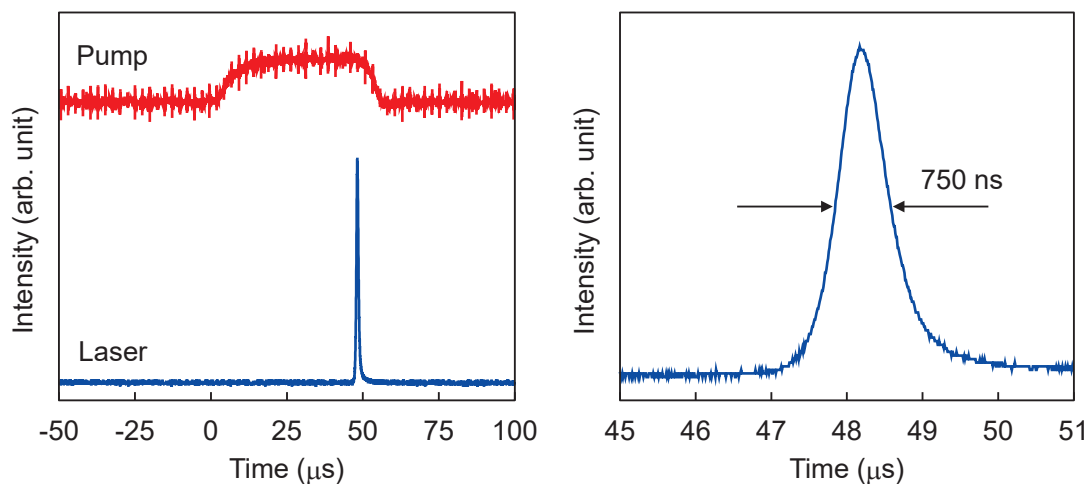


図6 ゲインスイッチ動作時のレーザーのパルス波形。(a) 励起用半導体レーザーの駆動電流パルスとレーザーパルス、(b) 時間軸を拡大したレーザーパルス。

4 まとめ

本研究では、青色半導体レーザー励起による小型アレキサンドライトレーザーを開発し、その動作特性について実験的に検討した。連続発振動作では、スロープ効率44%の高効率動作を達成し、最大出力0.21Wを得た。また、ゲインスイッチ法によるパルス化を行い、パルス幅750nsのシングルパルス動作を達成した。引き続き、産学連携研究の枠組みの中で実用化研究を進めていく。

謝辞

本研究は、令和3年度東北工業大学研究支援センター学内公募研究（実用化型）及び令和3年度KCみやぎ産学共同研究会の助成を受け、実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Y. Song, Z. Wang, Y. Bo, F. Zhang, Y. Zhang, N. Zong, and Q. Peng, "2.55 W continuous-wave 378 nm laser by intracavity frequency doubling of a diode-pumped alexandrite laser", *Appl. Opt.*, Vol. 60, No. 20, pp. 5900-5905, July 2021.
- 2) 佐藤 篤, 平間圭悟, "半導体レーザー励起アレキサンドライトレーザーのワット級連続発振動作", *Optics & Photonics Japan 2021*, 27aD2, 2021年10月.
- 3) 佐藤 篤, 平間圭悟, "アレキサンドライトレーザーの発振スペクトルの温度依存性評価", 地域連携センター・研究支援センター紀要『EOS』, Vol. 34, No. 1, pp. 11 ~ 16, 2021年11月.
- 4) 平間圭悟, 佐藤 篤, "ワット級連続発振アレキサンドライトレーザーの最適動作条件の検討", 第76回応用物理学会東北支部学術講演会, 2a-B-2-2, 2021年12月.
- 5) W. P. Risk, "Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 5, No. 7, pp. 1412-1423, July 1988.