

令和2年度学内公募研究（萌芽型）
〔研究論文〕

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

佐藤 篤¹⁾, 平間 圭悟²⁾

Temperature dependence of lasing spectra of an alexandrite laser

Atsushi SATO¹⁾, Keigo HIRAMA²⁾

Abstract

Red lasers operating in the 700-nm wavelength region are useful for a variety of applications, including lidar remote sensing, laser processing and medical applications. An alexandrite laser is one of the most promising candidates of red lasers because it can be pumped by commercially available laser diodes. In this study, a diode-pumped alexandrite laser with an end-pumping scheme was developed. The lasing occurred at a crystal temperature of 30-90 °C. In this temperature range, the red shift of the lasing wavelength was observed under higher crystal temperatures. As a result, the center wavelength of this laser was tuned from 754.6 to 756.1 nm.

1 はじめに

ルビーレーザーやアレキサンドライトレーザーに代表される赤色波長帯の固体レーザーは、皮膚疾患の治療や脱毛など医療・美容分野において利用されている¹⁻²⁾。また、他分野においても、カリウム原子での共鳴散乱を利用した成層圏ライダー観測³⁾や、高調波光源（紫外波長帯）を用いたレーザー加工⁴⁾及び風向風速観測⁵⁾など、多岐にわたる応用が期待されている。特に、4準位系であるアレキサンドライトレーザーは、3準位系であるルビーレーザーよりも発振しきい値が低いため、小型・高効率化という点で優れている。近年、半導体レーザー（LD）技術の進展により、市販の高出力LDを励起光源に用いた、より実用的なメンテナンスフリーのアレキサンドライトレーザーの実現が可能となった。本研究では、筆者らによるLD励起型アレキサンドライトレーザーの光学設計ならびに基礎特性の評価結果⁶⁾に基づき、レーザーを構築し発振実験ならびに発振スペク

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.

トル評価実験を行ったので、その結果を報告する。

2 レーザーの構成

図1(a)及び(b)に試作したアレキサンドライトレーザーの構成を示す。レーザー結晶には、Crドープ率0.4 at.%, 結晶サイズ2.5mm(a)×5.3mm(b)×5mm(c)のアレキサンドライトを使用した。結晶の両端面は、波長600-800nmに対する無反射 (AR) コーティングが施されている。レーザー結晶は、誘導放出断面積が大きいb軸が図1(a)において紙面に垂直な方向を向くように取り付けられている。レーザー光の偏光方向は、このb軸に平行になるように設計した。レーザー結晶は、銅製ヒートシンクにマウントされており、結晶とヒートシンクの接触面には熱伝達率を高めるため厚さ50 μ mインジウムシートを挿入した。結晶ヒートシンクは、ペルチェ素子によって20～90 $^{\circ}$ Cの範囲で温度調整が可能である。

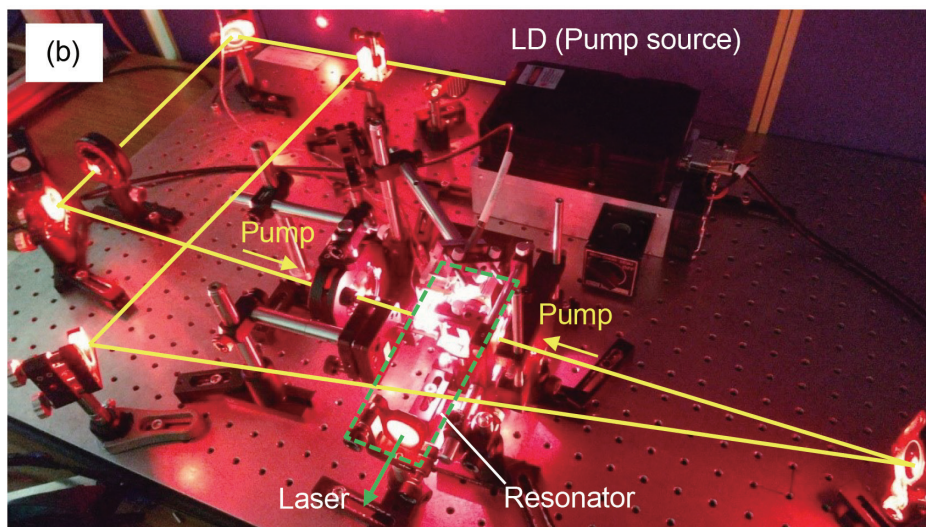
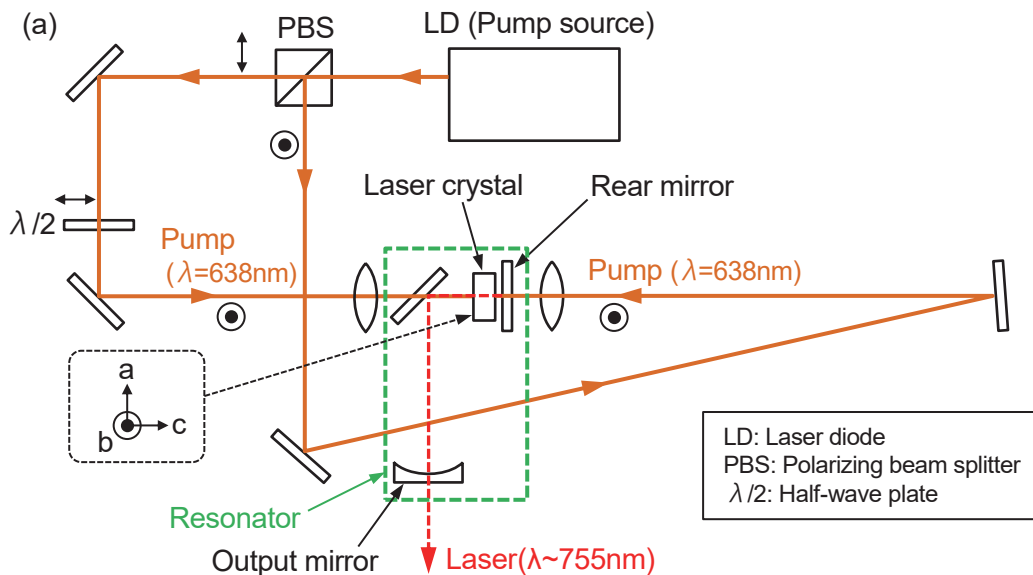


図1 試作したアレキサンドライトレーザー。(a) レーザーの構成, (b) レーザーの外観。

本研究で使用したアレキサンドライト結晶でレーザー発振を行った場合、結晶内での励起ビーム半径が $100\mu\text{m}$ になるまで集光すると、発振しきい値が1W程度になることが筆者らによる先行研究⁶⁾からわかっている。レーザー実験の初期段階は最適化前の状態であることも考慮すると、この数倍の発振しきい値を想定しておく必要がある。そこで、中心波長638nmで連続波出力6WのLD (CivilLaser社製 LSR638CP-6W)を励起光源として選定した。LDから出射される励起ビームは、ビームサイズ 5.16mm (水平方向) \times 4.37mm (垂直方向)、ビーム拡がり角 2.286mrad (水平方向) \times 3.036mrad (垂直方向)であり、四角形のビームパターンを持つコリメート光である。図2にナイフエッジ法による結晶位置での励起用LDの集光スポット半径の測定結果を示す。集光用レンズの焦点距離は、 30mm とした。測定の結果、集光スポット半径は、 $59\mu\text{m}$ (水平方向) \times $96\mu\text{m}$ (垂直方向)であった。この結果から、設計したレーザーは、発振可能な条件を満たしていることがわかった。

図1(a)に示した通り、レーザーは結晶を両端面から励起する構造になっている。励起用LDから出射される励起光は、ランダムな偏光になっており、励起光の偏光方向をアレキサンドライト結晶のb軸に平行にするためには、水平方向と垂直方向の直線偏光成分を分ける必要がある。そこで、励起用LDの出射口付近に偏光ビームスプリッター (PBS)を配置した。図1(a)においてPBSをそのまま透過する方向(左方向)には励起光のうち水平偏光成分のみが伝搬し、PBSで直角に反射する方向(下方向)には垂直偏光成分のみが伝搬する。このうち、水平偏光成分は、 $\lambda/2$ 波長板によって結晶への入射が垂直偏光となるように調整される。その結果、結晶の両方向からb軸に平行な偏光成分での端面励起が実現する。なお、本稿執筆時点では、上述の両端面励起方式での実験の実施には至っておらず、次節では、片方向から(図1(a)において結晶の右側から)のみの励起による実験結果を示す。

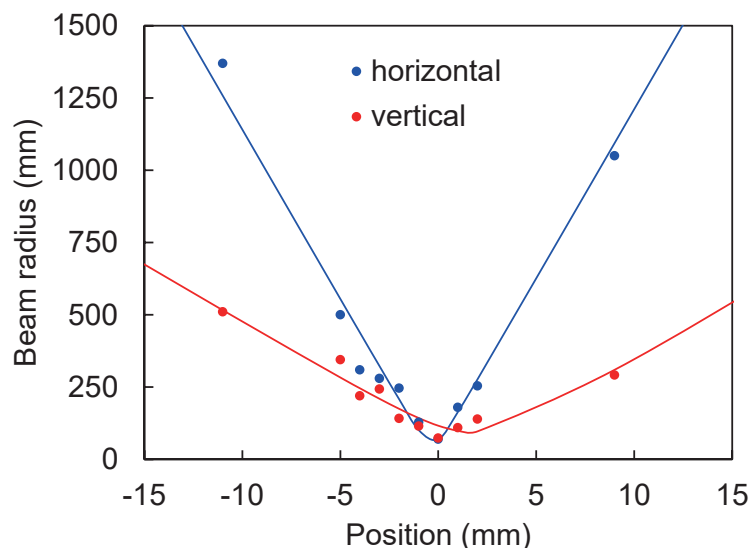


図2 励起ビーム半径の測定結果.

3 実験結果

図3(a)~(d)に、アレキサンドライトレーザーの発振スペクトルを示す。スペクトルの測定は、ファイバー結合型光スペクトラムアナライザー（波長分解能0.5nm）を用いて行い、光ファイバプローブの先端は、結晶の近くに固定した。結晶ヒートシンク温度は、最も発振が容易であった90℃とした。図3(a)は、レーザー発振をしていないときの励起光及び蛍光スペクトルを示している。波長638nm付近に励起光スペクトル、波長680nm付近には 2E 準位からの発光スペクトルが確認され、それらと重複するように波長700nm付近にピークを持つ 4T_2 準位のブロードな発光スペクトルが確認された。図3(b)は、レーザー発振時のスペクトルを示している。さらに、図3(b)で示したスペクトル成分から図3(a)で示したスペクトル成分を差し引き、レーザー光成分のみを表示したスペクトルを図3(c)及び(d)に示す。レーザーの発振波長は、共振器ミラーの調整により変化させることができたが、本実験の条件下では766nm付近が比較的発振しやすく、アレキサンドライトレーザーの代表的な発振波長として知られる755nm付近での発振も確認できた。また、共振器ミラーの調整のみで、図3(d)に示されるような2波長同時発振も容易に実現できることがわかった。なお、波長同調化については、今後、複屈折フィルターの利用を想定している。

アレキサンドライトレーザーは、高温で高効率に発振するなどレーザー出力が温度依存性を示すことが知られている⁷⁾。図4に発振波長の温度依存性を示す。実験では、波長755nm付近で発振するように共振器を調整し、その状態で結晶温度を30~90℃の範囲で変化させた。レーザーの中心波長は、結晶温度の上昇と共に長波長側にシフトしていくことが確認され、測定温度範囲に対応する波長可変範囲は754.6~756.1nmであった。この

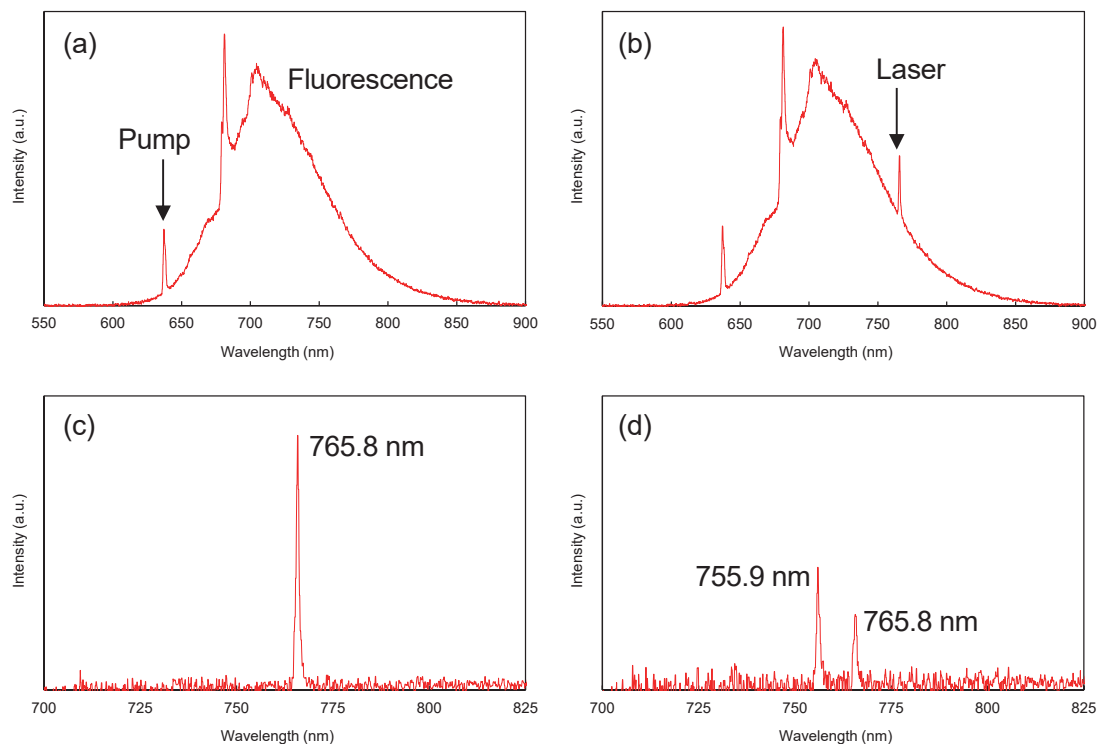


図3 アレキサンドライトレーザーの発振スペクトル。(a) 励起光と蛍光、(b) 励起光と蛍光と発振スペクトル、(c) 発振スペクトル（励起光と蛍光を除去）、(d) 発振スペクトル（2波長発振）。

波長同調化実験では、波長選択素子による利得や損失の制御をしていないため、発振波長の変化はレーザー利得のピーク波長の変化と考えてよい。これは、長波長側でのレーザー発振には、高温での動作が適していることを意味している。実際のレーザーシステムで波長同調化を行う際は、前述したように、複屈折フィルターを使用し共振器損失の波長成分を制御するため、本実験よりも広範な波長範囲での発振が得られることが期待できる。

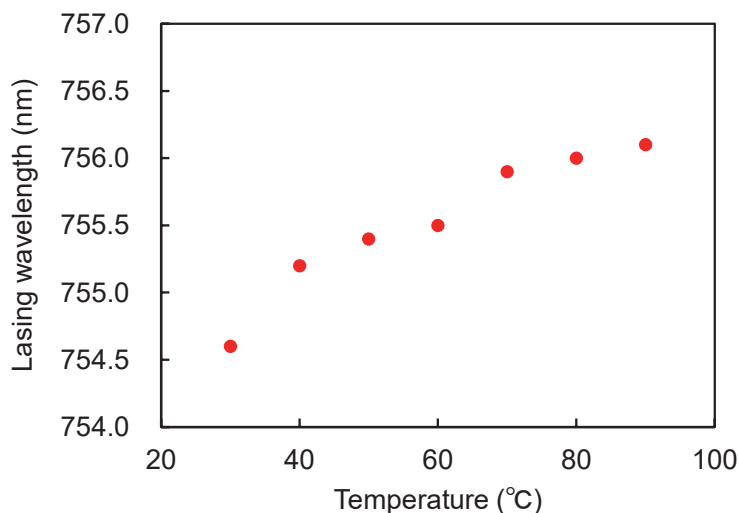


図4 発振波長の温度依存性.

4 まとめ

本研究では、開発を進めているLD励起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について実験的に検討した。実験の結果、波長755～765nm付近でのレーザー発振が確認され、その中心波長は高温ほど長波長側にシフトすることを明らかにした。今後、両端面励起下での実験において、高出力化ならびにパルス化を進めていく。

謝辞

本研究は、東北工業大学研究支援センター 学内公募研究（萌芽型）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る。

参考文献

- 1) D. Li, H. Zhang, B. Chen, Y. B. Zhao, W. J. Wu, Y. Yuan, and Z. X. Ying, "Experimental investigations on thermal effects of a long-pulse alexandrite laser on blood vessels and its comparison with pulsed dye and Nd:YAG lasers", *Lasers Med. Sci.*, vol. 35, no. 7, pp. 1555-1566, Sept. 2020.
- 2) S. P. Nistico, E. D. Duca, F. Farnetani, S. Guida, G. Pellacani, A. Rajabi-Estarabadi, and Keyvan Nouri, "Removal of unwanted hair: efficacy, tolerability, and safety of long-pulsed 755-nm alexandrite laser equipped with a sapphire handpiece", *Lasers Med. Sci.*, vol. 33, no. 7, pp. 1479-1483, Sept. 2018.
- 3) A. Munk, B. Jungbluth, M. Strotkamp, H.-D. Hoffmann, R. Poprawe, J. Höffner, and F.-J. Lübken, "Diode-pumped alexandrite ring laser in single-longitudinal mode operation for atmospheric lidar measurements", *Opt. Express*, vol. 26, no. 12, pp. 14928-14935, June 2018.

- 4) F. Völker and S. Dong, "Active Q-switching of the alexandrite laser", *Opt. Laser Tech.*, vol. 23, no. 6, pp. 331-334, Dec. 1991.
- 5) A. Munk, M. Strotkamp, M. Walochnik, B. Jungbluth, M. Traub, H.-D. Hoffmann, R. Poprawe, J. Höffner, and F.-J. Lübken, "Diode-pumped Q-switched alexandrite laser in single longitudinal mode operation with watt-level output power", *Opt. Lett.*, vol. 43, no. 22, pp. 5492-5495, Nov. 2018.
- 6) 佐藤 篤, "半導体レーザー励起アレキサンドライトレーザーの開発", 東北工業大学地域連携センター・研究支援センター紀要 EOS, vol. 33, no. 1, pp. 5-14, 2021年2月.
- 7) U. Demirbas, A. Sennaroglu, and F. X. Kärtner, "Temperature dependence of alexandrite effective emission cross section and small signal gain over the 25-450 °C range", *Opt. Mater. Express*, vol. 9, no. 8, pp. 3352-3370, Aug. 2019.