

高熱伝導率流体冷却による固体レーザーの高出力化

自然科学研究機構 核融合科学研究所

教授 安原 亮

(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019221-B3)

キーワード：高出力レーザー，液体金属，熱光学効果

1. 研究の目的と背景

レーザーの高出力化は、熱的、非熱的な手法を問わず、レーザー加工にとって必須である。高出力化は、加工のスループットを向上させるに留まらず、難加工材料への応用も可能にする。レーザーの出力向上では、レーザー媒質の冷却技術が主要な開発課題であり、実際にファイバーレーザー等の高出力化は冷却能力の向上と合わせて出力が向上してきた。レーザー動作における光(励起光)から光(レーザー光)の変換過程では、100%の変換効率が得られない。変換されない部分は熱となりレーザー性能を劣化させるため、レーザーの高出力化には冷却技術が必須となるのである[1-7]。今回、報告者は、固体レーザー媒質の冷却媒体に常温で液体となる「液体金属」を用いた冷却方法を採用し[8, 9]、冷却性能の格段の向上によるレーザーの高出力化に着目した。これは、冷却媒体そのものを高熱伝導率化(水に比べて30倍程度の熱伝導率が見込める)することで、様々なレーザー装置の高出力化が可能となる広範に適用可能な技術である。レーザー高出力化技術のブレークスルーを実現し、レーザー加工の応用範囲拡大を目指す。

本報告では、液体金属による固体レーザー媒質の冷却効率を調査するために、①数値シミュレーションによる検討、②実験による比較を行った結果を報告する。

2. 液体金属による冷却効果の検討

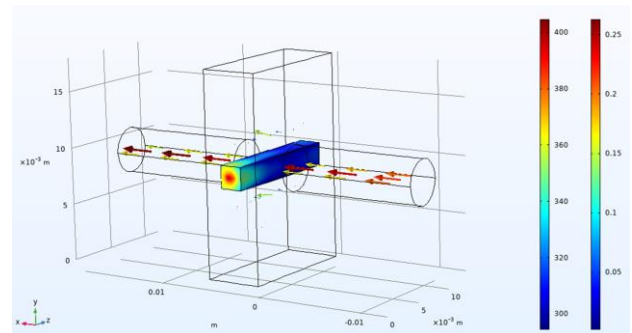
液体金属を用いた冷却性能向上について、数値計算による性能比較を行った。液体金属として、ガリウム系材料である Galinstan を想定した。この材料はガリウム、インジウム、スズの共晶合金で、融点が摂氏マイナス19度と低く、常温で液体である。熱伝導率は水と比較して24.89 W/mK と極めて高い。報告者のグループで近年積極的に研究に取り組んでいる中赤外固体レーザー、特に波長2.9 μm で連続波発振する半導体レーザー励起 Er:YAP レーザー[10, 11]を題材に計算を試みた。用いた Er:YAP 結晶は、Er 添加濃度 5at%で、結晶サイズは、2 mm \times 2 mm \times 12 mm の角柱で、12 mm の方向が光軸と仮定した。表1にその他計算に用いたパラメータ群を示す。

励起パワーは30W、投入パワーの7割が熱になるとして計算を行った。計算モデルでは、結晶のレーザー入出力面以外の4面はすべて流体と接しているとした。また流量は0.2m/s と固定した。結晶中の励起分布を計算するための数値として吸収係数1.15 cm^{-1} とした。これらの条件を基に作動流体を水として計算した結果を図1に示す。(a)が

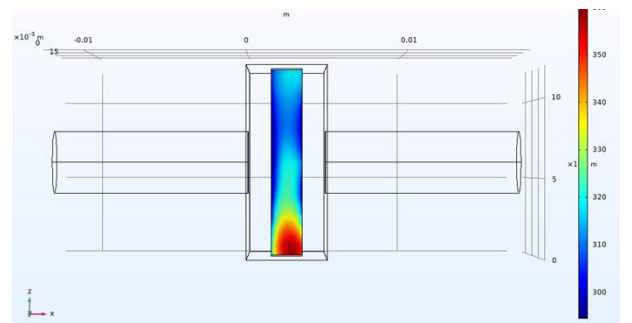
横方向から温度分布を可視化した結果、(b)が上方向から温度分布を可視化した結果である。

表1 計算に用いたパラメータ

	YAP 結晶
熱伝導率	11.7W/mK
熱容量	0.557 J/gK
密度	5.35 g/cm ³
	Galinstan
熱伝導率	24.89W/mK
熱容量	0.4179 J/gK
密度	6.3632 g/cm ³
	水
熱伝導率	0.606 W/mK
熱容量	0.4179 J/gK
密度	0.997 g/cm ³



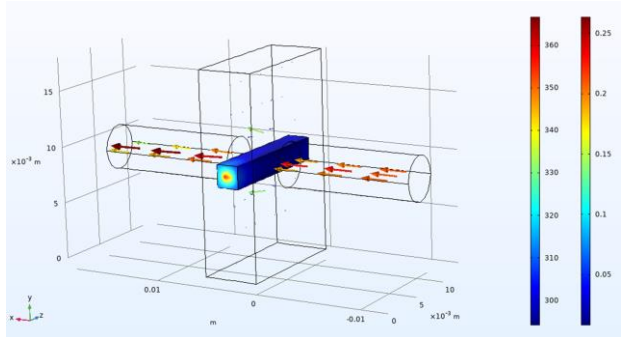
(a) 横方向から



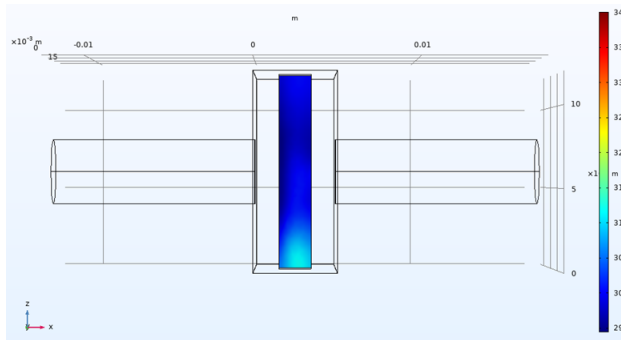
(b) 上方向から

図1 冷却用流体に水を使った場合の数値計算結果

図2には、液体金属、ガリンスタンを作動流体として用いた場合の数値計算結果を示す。同様に(a)が横方向から温度分布を可視化した結果、(b)が上方向から温度分布を可視化した結果である。



(a) 横方向から



(b) 上方向から

図2 冷却用流体に液体金属を使った場合の数値計算結果

図1と図2より、本計算条件での水を用いた場合の結晶の最大温度は、395度、液体金属を用いた場合は、365度であることが分かった。作動流体の差で、30度の差があった。図3に、励起パワーを変化させた場合の最大温度の比較を示す。励起パワーは5Wから30Wまで変化させた。傾きを取ると、水の場合は、3.3W/K、ガリンスタンの場合は2.5W/Kと、ガリンスタンの方が、約25%傾きが小さい。

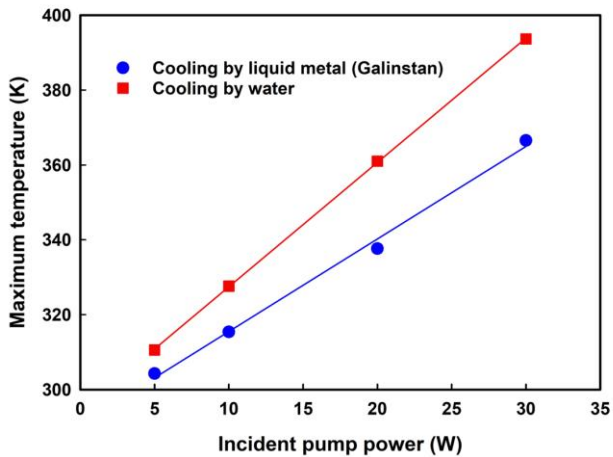


図3 冷却用流体に液体金属を使った場合の数値計算結果

3. 液体金属による冷却効果実験的検証

次に、液体金属による冷却効果を検証するために、ファイバーレーザーの発熱除去に液体金属冷却を適応した、実証実験を行った。図4に実験構成を示す。用いたファイバーは、Er 添加 ZBLAN ファイバーで、波長 976nm の励起に対して、2800 nm のレーザー光を出力する。3μm 付近の中赤外レーザーは、材料加工やセンシング応用などに向けて研究が進んでいる[12]。今回の実験では、片側連続光励起した Er:ZBLAN ファイバーを、一方は金属プレートによる伝導冷却、もう一方は、自作のガリウム混合液体金属をファイバーに直接接触させた冷却方法を試みた。液体金属は、液体ポンプを用いて循環させ、外部の熱交換機によって排熱した。また比較実験のための金属プレートは、水冷した。

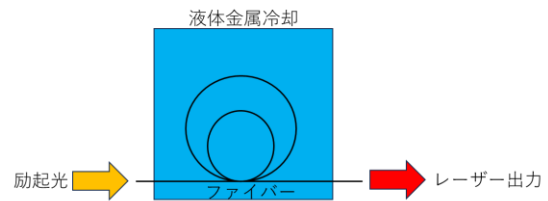


図4 液体金属冷却ファイバーレーザー概要

以上のような実験を行ったところ、液体金属冷却を用いた場合、比較実験で得られた出力の3倍の出力が得られた。液体金属冷却が効果的に働いたことを示している。

4. まとめ

固体レーザー媒質の冷却媒体に常温で液体となる「液体金属」を用いた冷却方法を採用し、冷却性能の格段の向上によるレーザーの高出力化に着目した。これは、冷却媒体そのものを高熱伝導率化（水に比べて30倍程度の熱伝導率が見込める）することで、様々なレーザー装置の高出力化が可能となる広範に応用可能な技術である。レーザー高出力化技術のブレークスルーを目指した。本報告では、液体金属による固体レーザー媒質の冷却効率を調査するために、①数値シミュレーションによる検討、②実験による比較を行った結果を報告した。①のシミュレーション研究では、Er:YAP レーザーを対象に、冷媒に液体金属であるガリンスタンを採用した場合と水を採用した場合、それぞれの冷却能力を COMSOL を用いて計算を行った。結果、水の場合は、3.3W/K、ガリンスタンの場合は2.5W/Kと、ガリンスタンの方が、約25%傾きが小さい結果となった。次に②の実験による比較では、ファイバーレーザーの冷却方法として、ガリウム混合材料を液体金属として用いてレーザー発振実験を行った。結果、比較対象である従来手法と比較して、3倍近い出力向上が得られた。このように、本研究によって液体金属冷却がレーザーの高出力化に効果的であるということが示唆された。

一方で、課題も確認された。一般にガリウム系の液体金属は、金属に対して浸食性があるとされている。したが

って長時間の利用では、部品構成を考える際に金属部品を避け、フッ素樹脂系の材料やセラミック材料などの採用を検討しなければならない。これらは一般的に高コストで難加工であるために導入の障壁となる可能性がある。

謝 辞

本研究の一部をサポートしていただいた公益財団法人天田財団 (AF-2019221-B3) に感謝いたします。

参考文献

- (1) C. L. Haefner, A. Bayramian, S. Betts, R. Bopp, S. Buck, J. Cupal, M. Drouin, A. Erlandson, J. Horáček, J. Horner, J. Jarboe, K. Kasl, D. Kim, E. Koh, L. Koubíková, W. Maranville, C. Marshall, D. Mason, J. Menapace, P. Miller, P. Mazurek, A. Naylor, J. Novák, D. Peceli, P. Rosso, K. Schaffers, E. Sistrunk, D. Smith, T. Spinka, J. Stanley, R. Steele, C. Stolz, T. Suratwala, S. Telford, J. Thoma, D. VanBlarcom, J. Weiss, P. Wegner, "High average power, diode pumped petawatt laser systems: a new generation of lasers enabling precision science and commercial applications", *Proceedings Volume 10241, Research Using Extreme Light: Entering New Frontiers with Petawatt-Class Lasers III*; 1024102 (2017) <https://doi.org/10.1117/12.2281050>.
- (2) Paul Mason, Martin Divoký, Klaus Ertel, Jan Pilař, Thomas Butcher, Martin Hanuš, Saumyabrata Banerjee, Jonathan Phillips, Jodie Smith, Mariastefania De Vido, Antonio Lucianetti, Cristina Hernandez-Gomez, Chris Edwards, Tomas Mocek, and John Collier, "Kilowatt average power 100 J-level diode pumped solid state laser," *Optica* 4, 438-439 (2017).
- (3) Saumyabrata Banerjee, Klaus Ertel, Paul D. Mason, P. Jonathan Phillips, Mathias Siebold, Markus Loeser, Cristina Hernandez-Gomez, and John L. Collier, "High-efficiency 10 J diode pumped cryogenic gas cooled Yb:YAG multislabs amplifier," *Opt. Lett.* 37, 2175-2177 (2012).
- (4) Takashi Sekine, Takashi Kurita, Yuma Hatano, Yuki Muramatsu, Masateru Kurata, Takaaki Morita, Takeshi Watari, Takuto Iguchi, Ryo Yoshimura, Yoshinori Tamaoki, Yasuki Takeuchi, Kazuki Kawai, Yujin Zheng, Yoshinori Kato, Norio Kurita, Toshiyuki Kawashima, Shigeki Tokita, Junji Kawanaka, and Ryosuke Kodama, "253 J at 0.2 Hz, LD pumped cryogenic helium gas cooled Yb:YAG ceramics laser," *Opt. Express* 30, 44385-44394 (2022).
- (5) Martin Divoký, Jan Pilař, Martin Hanuš, Petr Navrátil, Ondřej Denk, Patricie Severová, Paul Mason, Thomas Butcher, Saumyabrata Banerjee, Mariastefania De Vido, Chris Edwards, John Collier, Martin Smrž, and Tomas Mocek, "150 J DPSSL operating at 1.5 kW level," *Opt. Lett.* 46, 5771-5773 (2021).
- (6) Jumpei Ogino, Shigeki Tokita, Shotaro Kitajima, Hidetsugu Yoshida, Zhaoyang Li, Shinji Motokoshi, Noboru Morio, Koji Tsubakimoto, Kana Fujioka, Ryosuke Kodama, and Junji Kawanaka, "10 J operation of a conductive-cooled Yb:YAG active-mirror amplifier and prospects for 100 Hz operation," *Opt. Lett.* 46, 621-624 (2021).
- (7) Ryo Yasuhara, Toshiyuki Kawashima, Takashi Sekine, Takashi Kurita, Tadashi Ikegawa, Osamu Matsumoto, Masahiro Miyamoto, Hirofumi Kan, Hidetsugu Yoshida, Junji Kawanaka, Masahiro Nakatsuka, Noriaki Miyana, Yasukazu Izawa, and Tadashi Kanabe, "213 W average power of 2.4 GW pulsed thermally controlled Nd:glass zigzag slab laser with a stimulated Brillouin scattering mirror," *Opt. Lett.* 33, 1711-1713 (2008)
- (8) J. Vetrovec, A. S. Litt, D. a. Copeland, J. Junghans, and R. Durkee, "Liquid metal heat sink for high-power laser diodes," *Spie Lase*, vol. 8605, no. 303, p. 86050E, 2013.
- (9) K. Ma and J. Liu, "Liquid metal cooling in thermal management of computer chips," *Front. Energy Power Eng. China*, vol. 1, no. 4, pp. 384-402, 2007.
- (10) Hiroki Kawase and Ryo Yasuhara, "2.92- μ m high-efficiency continuous-wave laser operation of diode-pumped Er:YAP crystal at room temperature," *Opt. Express* 27, 12213-12220 (2019).
- (11) Weichao Yao, Hiyori Uehara, Hiroki Kawase, Hengjun Chen, and Ryo Yasuhara, "Highly efficient Er:YAP laser with 6.9 W of output power at 2920 nm," *Opt. Express* 28, 19000-19007 (2020).
- (12) Shigeki Tokita, Mayu Hirokane, Masanao Murakami, Seiji Shimizu, Masaki Hashida, and Shuji Sakabe, "Stable 10 W Er:ZBLAN fiber laser operating at 2.71-2.88 μ m," *Opt. Lett.* 35, 3943-3945 (2010)