

低温伝導冷却アクティブミラー増幅器の新規構造

Novel Structures of Conduction Cooling Active-Mirror Amplifier at Low-Temperature

阪大レーザー研¹, 阪大院工², 名大院工³,○(M2) 黒岩 堯彦^{1,2}, 北島 将太郎³, 時田 茂樹^{1,2}, 金井 恒人¹, 荻野 純平¹, 河仲 準二^{1,2}ILE, Osaka Univ.¹, GSE, Osaka Univ.², Dept. of Electronics, Nagoya Univ.³,○Takahiko Kuroiwa^{1,2}, Shotaro Kitajima³, Shigeki Tokita^{1,2}, Tsuneto Kanai¹, Jumpei Ogino¹, Junji Kawanaka^{1,2}

E-mail: kuroiwa-t@ile.osaka-u.ac.jp

レーザー駆動加速器や中性子源等の実現に向け、大型レーザーの高繰返し化が求められている。我々は 100 K 以下の低温で動作させる伝導冷却アクティブミラー増幅方式を用いた 100 J / 100 Hz 級高繰返し Yb: YAG レーザーの研究開発を行っている[1]。熱伝導率が高く、安価で加工性に優れた銅をヒートシンクに用いる伝導冷却アクティブミラー増幅器では、冷却時に利得媒質とヒートシンクとの熱膨張率差に起因して生じる利得媒質の変形が問題となる。この変形を抑制し、低温下での低熱変形動作を実現するために、新たなヒートシンク構造を検討した。低温冷却時の熱変形は、接合部のはんだの粘塑性[2-4]を考慮した数値シミュレーションモデルにより精度良く予測できる[5]。本研究では、数値シミュレーションを用いて新たなヒートシンク構造を設計し、それらが低熱変形動作を可能にすることを示す計算結果を得た。

利得媒質の熱変形抑制手法を 3 種に分類する。第一に、ヒートシンクに利得媒質と温度に対する熱膨張の傾向が一致する材料を使用する熱膨張マッチング型である。Yb: YAG レーザーでは、例えばモリブデンをヒートシンクに用いて実現できる。第二に、材料を補強あるいは軟化させて利得媒質にかかる応力を減少させる応力緩和型である。今回、このモデルとして冷却アレイヒートシンクを設計した。そして、第三に利得媒質の変形を複数の材料を用いて補償する構造をもつ受動補償型である。このモデルとして環状コンポジットヒートシンクを設計した。本稿では、以下に応力緩和型、受動補償型について詳細を述べる。比較のために、図 1 に利得媒質とヒートシンクとを単純に接合したモデルの構造とその熱変形の様子を示す。

図 2 に応力緩和型である冷却アレイヒートシンクを示す。これは、ヒートシンク上部の利得媒質接合部を配列状に分割し、利得媒質にかかる熱応力を緩和させて熱変形を抑制する構造である。ただし、配列部と利得媒質とを直接接合した場合、配列由来の高い空間周波数をもつ応力分布が見られた。細かい波面擾乱は高次の収差成分を生じ、ビーム品質の悪化につながるため、その抑制のために利得媒質とヒートシンクの間には補強材料としてモリブデンディスクを挿入した。このモデルについて、構造解析ソフトウェア (ANSYS) を用いてはんだの融点 (450 K) から室温 (300 K) まで冷却し、室温から低温領域 (77 K) まで冷却した際の熱変形を計算した。図 2(c) に低温領域での利得媒質の熱変形を示す。計算結果により冷却アレイヒートシンクでは低温での熱変形が 1% 以下に低減できることが分かった。一方で、低熱変形と低熱抵抗はバーの幅と長さに相関するため、これらを満たす最適なバーの幅と長さに設定する必要がある。

次に、図 3 に、受動補償型である環状コンポジットヒートシンクを示す。これは、銅ヒートシンクの内部に筒構造を作りその外周に配置したモリブデン環を上部のヒートシンクキャップ部と接合する構造である。これにより、冷却時にキャップ部の径方向は環材料と引き合うことで収縮が抑制され、光軸方向は外周部の収縮が環材料に阻害されることで中心部がより大きく収縮する。これによりキャップ部は凹面変形をするため、ヒートシンクと利得媒質の熱膨張率差により生じる凸面変形と相殺して利得媒質の変形が補償されることを図った構造である。冷却アレイと同様の数値シミュレーションを実行した結果、図 3(c) に示すように、銅ヒートシンクと比べて熱変形を 12% 程度低減できることがわかった。一方で、環状コンポジットヒートシンクは、受動的に変形させる力をはたらかせることでヒートシンクと利得媒質の接合部にかかる応力が大きくなるため、応力やはんだの緩和による影響などを考慮して最適な寸法を設定する必要がある。

本研究により、銅をヒートシンクに用いた伝導冷却アクティブミラー増幅器において、低温動作下での熱変形を抑制する新規構造が示された。今後は、最適化されたこれらの構造を用いて、実験実証を目指す。

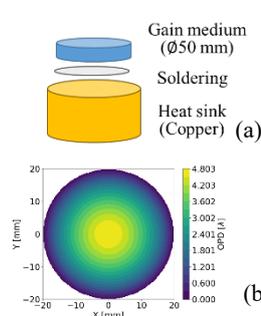


Fig. 1: Conduction cooling heat sink (a) description and (b) thermal deformation at 77 K of laser wavefront

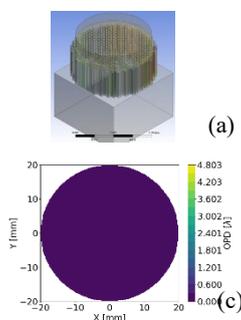


Fig. 2: Cooling array heat sink (a) isometric view, (b) description, and (c) thermal deformation at 77 K of laser wavefront

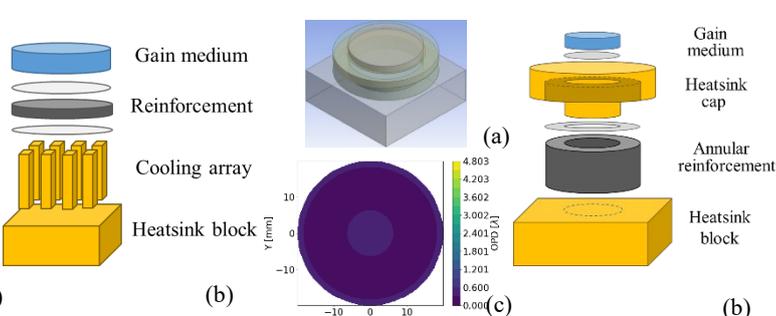


Fig. 3: Annular composite heat sink (a) isometric view, (b) description, and (c) thermal deformation at 77 K of laser wavefront

参考文献

- [1] J. Ogino *et al.*, *Opt. Lett.* **46**, 621 (2021).
 [2] L. Anand, *Int. J. Plast.* **1**, 213 (1985).
 [3] S. B. Brown *et al.*, *Int. J. Plast.* **5**, 95 (1989).
 [4] R. W. Chang *et al.*, *J. Electron. Mater.* **38**, 1855 (2009).
 [5] 黒岩堯彦ら, レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会, B10-14p-II-02.