エッジ励起高出力マイクロチップレーザー用水冷ヒートシンクの開発

常包 正樹^{1,2}, 平等 拓範²

¹(財)ふくい産業支援センター 産業技術研究センター (〒910-0102 福井市川合鷺塚町61字北稲田10)

²自然科学研究機構 分子科学研究所 分子制御レーザー開発研究センター

(〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38)

Efficient, Water-Cooled Heat Sink for High-Power Edge-Pumped Microchip Lasers

Masaki TSUNEKANE^{1,2} and Takunori TAIRA²

¹Fukui Industrial Support Center 61-10 Kawaiwashizuka, Fukui 910-0102

²National Institutes of Natural Sciences, Institute for Molecular Science, Laser Research Center for Molecular Science,
38 Nishigo-Naka, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585

(Received September 13, 2005)

An efficient, compact water-cooled heat sink has been developed for high-power edge-pumped microchip lasers. A vertical, water jet impingement cooling system can reduce the heat sink cross-sectional area to $\varnothing 10$ mm. Experimental results and theoretical analysis show dramatic enhancement of the heat transfer rate by a microchannel structure on the water-impinged, behind the heat sink top where laser material is bonded. Thermal resistance of $0.25^\circ\text{C}/\text{W}$ was achieved in the central $\varnothing 5$ mm area of the heat sink's cooling surface. Continuous-wave (CW) laser output over 300 W was successfully obtained from the diode edge-pumped, Yb:YAG microchip core ($\varnothing 5$ mm area 0.3 mm thick) bonded on the new heat sink.

Key Words: Heat-sink, Jet impingement, Microchannel, Microchip, Yb:YAG

1. はじめに

福井県には、伝統的に金属工作加工機械、眼鏡枠、表面処理、繊維、化学、プラスチックなどの材料創成・加工産業が発達しているが、これらの産業が保有する技術を基盤にさらに新技術創出を図ることを目的として、平成12年から5年間の計画で文部科学省から地域結集型共同研究事業の指定を受け「光ビームによる機能性材料加工創成技術開発」を研究テーマに、産学官での共同研究を行っている。その中では高輝度光ビームを発生する新しい光源開発として特にYb:YAG固体レーザー媒質の有する可能性と実用性の高さに注目し、高出力のCWおよび超短パルスレーザー装置の開発を進めている。本報告ではマイクロチップレーザー¹⁾のスケラブルな発展型として著者らが取り組んでいるユニークな高出力エッジ励起Yb:YAGマイクロチップレーザー²⁾に不可欠な高性能小型水冷ヒートシンクの試作とその冷却性能評価、設計の最適化について、実験と計算の両面から検討した結果について述べる。

2. エッジ励起Yb:YAGマイクロチップレーザーの特長

2.1 Yb:YAGの特長

Yb:YAGはInGaAs系半導体レーザー(Laser Diode以下LDと記す)において励起可能な940 nmと970 nm帯に吸収域を

持ち1030 nmのレーザー光を発生する固体レーザー媒質である。励起光波長とレーザー発振光波長が近いことから、エネルギー差として媒質内で発生する発熱の割合も吸収エネルギーの9%(940 nm励起の場合)に抑えられ、同じ母材で既に広く普及している808 nm励起のNd:YAGの発熱量の半分以下であるため、高出力動作時にも熱によるレーザービームへの影響、いわゆるビーム品質の劣化の少ない固体レーザー媒質として近年急速に期待が高まっている^{3,4)}。加えて励起光の吸収許容波長幅がNd:YAGの15倍広い(波長半値幅18 nm)、LDの波長の変動によるレーザー出力の変動が小さいこと、Ybを高濃度添加してもレーザー特性の劣化が少なく、このため薄い媒質内でも励起光を十分吸収させることができる。またもう一つユニークなYb:YAGの特長として、発光のスペクトル幅が8.5 nmと広い(波長半値幅)ために、同じ媒質でCWのみならずピコからフェムト秒までの超短パルス発生も可能であるという点^{5,6)}があげられる。

このようにYb:YAGは多くの優れた特長を有するが、一方で室温において既にレーザー下準位に電子が存在する準四準位系材料であるためレーザー光の自己吸収があり、また誘導放出断面積が小さいためにレーザー発振を起こさせるために必要な励起光の強度(しきい値密度)がNd:YAGに比べ高い欠点がある。さらに環境温度に比較的敏感で高温になるほどレーザー特性が大きく劣化するこ

とも実用上問題である．このような欠点をできるだけ抑え、先ほど述べたYb:YAGの特長を最大限に生かす媒質形状がアクティブミラー⁷⁾であり、励起も含めた構成の典型例に薄ディスクレーザー^{8,9)}とエッジ励起マイクロチップ¹⁰⁾があげられる．

2.2 エッジ励起コンポジットYb:YAGマイクロチップレーザーの構成と動作原理

Fig. 1にエッジ励起マイクロチップレーザーの概念構造を示す．コンポジットマイクロチップは中央のコアにYb:YAG、その周囲にレーザー発振元素を含まない透明なアンドープYAGが一体形成されており、その片側一面をヒートシンクに接合しレーザー媒質(コア)の冷却を行う．レーザー共振器はマイクロチップのヒートシンクに接合される面にあらかじめ形成されたレーザー光に対する全反射膜と、その反対側のレーザー光に対して無反射膜の形成された面を通して外部に設けた出力ミラーとの間で構成される．基本的には薄ディスクレーザーなどのアクティブミラーの発振・排熱構成と同一である．エッジから導入された励起光はアンドープYAGガイドおよびYb:YAG媒質中を全反射で伝搬し、コアのYb:YAG内を伝搬する際に次第に吸収されレーザー光に変換される．この際Yb濃度を適切に設定することで径方向にmmオーダーあるコアを1回通過する際にほとんどの励起光を吸収させることが可能であるため、同軸励起型の薄ディスクレーザーのような多重反射励起のための複雑な光学系をレーザー媒質の近傍に配置する必要がなく、簡便な構成で強靱なレーザーヘッドを構成することができる．またマイクロチップのガイド周囲の励起光の導入方向を増やすことでコアを広げることなく高密度励起や高出力化が容易である点も大きな利点である．もちろんFig. 1(b)に示すようにアクティブミラーの特徴としてコア内での等温面はヒートシンクの面と平行に形成されレーザー光はこれと垂直に透過するため、レーザー発振光内での波面の乱れが生じにくく高輝度のレーザービームが得られやすい．

Fig. 1 Configuration of the diode edge-pumped, composite Yb:YAG/YAG microchip laser, a top (a) and a cross-sectional view (b).

3. 高性能小型ヒートシンク開発の必要性

以上述べたように多くの優れた特長を有するエッジ励起コンポジットYb:YAGマイクロチップレーザーにおいて、これまで著者らのグループでは300 W励起時にQCW動作で135 W¹¹⁾、CW動作で最大90 W¹²⁾を実証している．しかし加工用光源としてCW出力300 Wを目指すためには、さらに3倍以上の高い1 kW程度の励起光を結晶内に導入する必要がある．LDからのより多くの励起光を薄いマイクロチップエッジに絞り込むためには焦点距離の極めて短い集光レンズ($f < 10$ mm)を用いる必要があるが、その場合集光レンズはエッジから3 mm程度まで近接する配置となり、しかも多方向から例えばコアの周囲4方向から励起光を導入する場合、レンズがヒートシンクにぶつからないためにはヒートシンクの断面積はマイクロチップの外形(現行約 $\phi 10$ mm)とほぼ同じかそれ以下にする必要がある．さらに近接するレンズのサイズも考慮するとヒートシンクはその断面積を維持したまま縦に10 mm以上長いことが必要になる．従来我々のグループで開発した水冷ヒートシンク^{11,12)}は冷却水をマイクロチップに対して横に流す配置であったため、ヒートシンクの水の出入り口2方向に大きな突起がありそのままでは突起のある2方向からはレンズを近づけることができない、また単に結晶取り付け部(金属部分)のみ長く伸ばした場合、結晶から冷却水までの距離が著しく長くなり冷却効率が低下することが容易に予想される．そこで今回、新しく縦長形状の水冷ヒートシンクを試作開発した．

新しいヒートシンクは形状を細く長くするために内部の導水構造を従来のものから大幅に変更し、縦長の円筒状ヒートシンク内部に、冷却水が流れる細長いパイプ(内パイプ)を先端が結晶取り付け部の裏側近傍まで達するまで挿入し、その先端から冷却水が結晶取り付け部の裏側に向けて吹き付ける構造とした．冷却水はその内パイプの外側とヒートシンク内壁(外パイプ内側)の間を通過して外部に排出される．このような構造にすることで細長いヒートシンク形状においても確実に冷却水を先端まで導入することができ、さらにヒートシンクの外形の長さが変わっても結晶取り付け部近傍は変わらないために常に安定して同じ冷却効率を得ることができる．また後述するように水(噴流)がヒートシンク裏面に衝突することによって従来の水を横に流す場合に比べ冷却効率の向上(水とヒートシンクとの界面での熱伝達係数の向上)も期待される．これと似た構造はドイツの薄ディスクレーザーでも例がみられるが¹³⁾、我々はさらなる冷却効率の向上を目指し、水を吹き付ける結晶取り付け面の裏側にマイクロチャンネルの凹凸を設けたヒートシンク(Vertical water-flow microchannel heat-sink: VFMH)を試作し¹⁴⁾、その性能を実験と理論設計の両面から評価、最適化した．なお、噴流と冷却面の凹凸構造を組み合わせたものはLD用のヒートシンクで既に適用された例¹⁵⁾があり、形状やサイズの違いはあれ冷却作用としては本稿のヒートシンクと原理的に同じであると考えられる．しかしながら、本稿のように詳細に且つ定量的に構造と冷却性能を評価した

論文は著者が知る限り初めてである。また固体レーザー結晶の冷却に適用した例も初めてであり、本稿は今後様々なヒートシンクの設計論を定量的に議論する上で有意義な論文になると考えている。

4. 新型ヒートシンクの冷却性能の実験評価

4.1 比較サンプルの構造

高出力高性能固体レーザーの開発においては結晶の選択や形状、励起方法などと同様に結晶を冷やすヒートシンクの冷却効率もレーザー性能を左右する非常に重要なファクターである。我々は構造の最適化も含めてヒートシンクの冷却性能の客観的な評価を実験的に試みた。Fig. 2に比較のために試作した4種類の縦水流型ヒートシンクと従来の横水流型ヒートシンクの断面構造の模式図を示す。それぞれ結晶取り付け面の裏面が平面のもの(a)、裏面一面にサンドブラスト加工($\phi 100\mu\text{m}$ のガラスビーズを高速エアで吹き付ける加工)を行い $100\mu\text{m}$ 程度のランダムな凹凸を付けたもの(b)、 $300\mu\text{m}$ の幅で $600\mu\text{m}$ 間隔に深さ 0.5mm の格子状の溝(マイクロチャンネル)をワイヤー放電加工により形成したもの(c)、さらに細かく $140\mu\text{m}$ 幅で $280\mu\text{m}$ 間隔に同じく深さ 0.5mm の溝を形成したもの(d)である。なおヒートシンクの最外形(外パイプ)は $\phi 10\text{mm}$ (Fig. 10参照)で高さは 25mm 、外パイプの内径は $\phi 8\text{mm}$ である。内パイプの内径は $\phi 2.6\text{mm}$ 、外径 $\phi 5\text{mm}$ で内パイ

Fig. 2 Cross-sectional view of 4 types of the vertical water flow heat-sinks, a flat back (a), a sand blasted (b), a $300\mu\text{m}$ -width microchannel (c), a $140\mu\text{m}$ -width microchannel (d), and a conventional transverse flow microchannel heat-sink with the photo (e).

プの先端とヒートシンク裏面のマイクロチャンネル凸部(ない場合は平面部)との距離は 0.5mm ですべて一定とした。またヒートシンクの上面(結晶取り付け面)と裏側のマイクロチャンネル凹部(ない場合は平面部)との距離(厚み)は 0.5mm である。(e)は従来のヒートシンクで溝幅は $300\mu\text{m}$ 、間隔は $600\mu\text{m}$ 、マイクロチャンネルの長さは最大 15mm である。新しい構造のヒートシンクの材料としては結晶を取り付ける上部のヒートスプレッダーは銅(Cu)、本体はステンレス(SUS304)で、電子ビーム溶接により接合一体化した。従来のヒートシンクはすべてCuW(Cu30)である。なお、以下図中では(a)をFlat, (b)をSB, (c)をMC300, (d)をMC140, (e)をConvと表記する。

4.2 冷却水の圧力損失

水冷ヒートシンクの場合、冷却効率が高くても水の圧力損失が大きいと駆動に強力(巨大)なポンプが必要になり実用的でない。Fig. 3は製作したヒートシンクの水の流量に対する圧力損失(差圧)を測定した結果である。縦水流型では裏面の処理にかかわらず 2L/min (リッター毎分)時に約 0.2MPa の損失を生じている。これは主にヒートシンク内部で 180 度水路が折り返さる際に生じていると考えられる。励起用高出力半導体レーザーに使用されている水冷ヒートシンクにおいても定格冷却水流量において $0.2\text{k}\sim 0.5\text{MPa}$ が一般的であるため、同じ冷却系を使用する上においてまったく問題ない圧力損失である。なお、従来の横水流型では水の流れる断面積が大きく、水路の折れ曲がりも少ないため非常に低い圧力損失を示している。しかし流体を用いて高い冷却効率を得ようとする場合、内径を細くして流速を上げる、流体との放熱接触面積を増やす、流れの屈曲による衝突効果などで温度境界層を薄くする等の方法が取られるが、これらはいずれも同時に流体の粘性による摩擦損失を生じ圧力損失は上昇するため、一般に圧力損失と冷却性能とは正の相関がある。したがってあまり圧力損失が低いヒートシンクは逆にそれらの作用が少ないとも考えられ、冷却能力も同様に低い可能性が疑われる。

4.3 冷却性能の比較実験

Fig. 4にヒートシンクの冷却能力を測定した実験系を示す。方法としてはヒートシンクの結晶取り付け面に所定

Fig. 3 Differential water pressure of the heat-sinks as a function of water flow rate.

Fig. 4 Experimental setup for the measurement of the cooling efficiency of the heat-sinks.

の熱量を与え、その領域の温度上昇をIRカメラで非接触に測定して冷却能力を評価した。熱源としてコア径 $\phi 0.6$ mm, NA0.2のファイバー出力型LDからのレーザー光(波長940 nm)を焦点距離60 mmのレンズでヒートシンクの結晶取り付け面に緩く集光し、表面で吸収させて非接触に発熱させた。ヒートシンク表面での光束径は $\phi 5$ mmで、今回開発を進めているコンポジットYb:YAGマイクロチップのコア径と同サイズとした。照射光束の強度プロファイルは中央にやや高いピークを有するがその周囲はほぼフラットである。照射されるヒートシンクの表面にはレーザー結晶は取り付けず、熱源となるレーザー光を効率よく吸収し、かつIRカメラで精度よく温度が測れるように薬品を用いて表面を酸化させ薄く均一な黒色膜を形成した。使用したIRカメラはNikon LAIRD-S270AでSpectral rangeは $3\sim 5\ \mu\text{m}$ である。

Fig. 5に測定した各ヒートシンクの照射面のカメラの温度イメージ像を示す。LDからの照射エネルギーは70 Wの連続光(CW)で、冷却水の水温は 20°C である。冷却水の流量は0.5から2 L/minまで変化させた。なお、この70 Wの照射による発熱は、黒色膜での吸収率(0.78)を考えると実際にYb:YAG結晶を接合した場合における600 Wの励起光吸収時に相当する発熱量になる。この結果よりいずれの構造のヒートシンクにおいても流量の増加と共に表面温度が低下している様子がわかるが、特に(c) (d)のマイクロチャンネル構造のヒートシンク(VFMH)においては少ない流量から温度上昇が小さいことが分かる。また裏面がフラットな(a)の2 L/min時よりも、流量の少ない0.5 L/min時のマイクロチャンネル構造のものの方が低い温度上昇を示していることは特筆すべきである。また溝幅の異なる(c)と(d)ではそれほど大きな差は見られないが溝幅が小さ

Fig. 5 IR camera images of the laser-irradiated heat-sinks as a function of water flow rate.

い方が温度上昇はより低く抑えられている。一方横水流型の(e)では温度上昇も大きくまた流量を2 L/minまで増やしても温度の低下の度合いは少ない。従来型のヒートシンク材料であるCuWはCuに比べ熱伝導率が65 %と小さいが、この温度上昇の振る舞いは材料の熱伝導率の違いでは説明できず、冷却構造そのものに大きな原因があると考えられる。

Fig. 6はFig. 5の測定結果を流量に対する温度で示したグラフである。光束中央を除き強度プロファイルがほぼフラットになっている領域の温度を平均して示した。結晶取り付け面の裏側にマイクロチャンネル構造を形成することで、結晶取り付け面の温度上昇をフラットのものに比べ最大1/3の 33.4°C まで低減できた。さらに従来の横水流型に比べると1/4以下に抑えることが出来、今回ヒートシンクの小型化と同時に高排熱化も達成することができた。VFMH($\phi 5$ mm領域)の熱抵抗の値としては $140\ \mu\text{m}$ 間隔のマイクロチャンネルで2 L/min時において 0.25°C/W と求められる。

4.4 有限要素法による冷却効率改善の見積もり

実験結果より結晶取り付け面の裏面にマイクロチャンネル構造を付与することにより冷却効率が改善され温度上昇が大幅に抑えられることが分かった。次に有限要素法を用いてマイクロチャンネルの効果を理論的に解析し実験結果と比較を行った。熱構造解析には市販の有限要素法ソフト(ANSYS ED ver.7.0¹⁶⁾)を用いた。本構造の熱解析を行うにおいて最も不明なパラメータはヒートシンクと冷却水との界面での熱伝達係数である。特に今回のように噴流を吹き付ける構造で吹き付けられる表面に複雑な構造を有する場合には計算だけで求めるのは容易でなく、また大きな誤差を含む可能性がある。そこで今回、熱伝達係数は実験結果と計算をフィッティングさせて見積もりながら裏面形状の違いによる温度差の解析を進めた。Fig. 7に具体的な解析形状の一例((d)MC140)を示す。マイクロチャンネルは同図のように理想的な矩形を仮定し、その表面における水との熱伝達係数は凸部、凹部、その側面いずれも一様と仮定した。与えた熱量(熱流量 $2.78\ \text{MW/m}^2$)は実験における $\phi 5$ mmに70 Wのレーザー光を照射した場合に酸化銅の放射率の文献値 $0.78^{17)}$ より78 %のエネルギーが表面で吸収されると想定したものである。

Fig. 6 Temperature of the laser-irradiated surface of the heat-sinks measured by an IR camera as a function of water flow rate.

Fig. 7 Modeling of the finite element method for the MC140 structure.

Fig. 8は水とヒートシンク表面の間の熱伝達係数(横軸)をパラメータとし結晶取り付け面の温度上昇を計算した結果である。裏面の形状としては凹凸がない(a)Flatと、(c)MC300、(d)MC140の2種類のマイクロチャンネル構造(高さ(depth) 0.5 mm)を想定した。この図より熱伝達係数が高くなるほど表面温度が下がること、またマイクロチャンネル構造を設けることで、表面における熱伝達係数が同じでも放熱面積の増加によりFlatに比べ半分以下に温度上昇が低減できる様子が計算でも求められる。詳細に見るとFig. 6の結果よりFlatの温度は流量0.5 L/minの時83℃と求められている。これをFig. 8に当てはめると熱伝達係数として47 kW/m²Kという値が求められる。形状が大きく変化しなければ熱伝達係数はほぼ水の流量(流速)で決まると考えられるので、マイクロチャンネル構造における各面の熱伝達係数もそれぞれの面はFlatと同じ熱伝達係数を有すると考えると、47 kW/m²Kにおけるマイクロチャンネル構造の温度上昇の計算値をFig. 8から求めることが出来る。同様に1 L/min, 2 L/min時のFlatの温度上昇の測定値から熱伝達係数を求め、その値を代入してFig. 8からマイクロチャンネル構造の温度上昇の計算値を求めることが出来る。

Fig. 9はFig. 6の計測結果にFig. 8の計算により求めたマイクロチャンネル構造の温度上昇を重ね書きしたものである。測定値と計算値の温度が非常に良く一致していることが分かる。このことからマイクロチャンネル構造の付加により表面積が増加しそれによって温度上昇を大幅に低減できることが理解できた。また本構造における熱伝達係数の流量に対する概算値も得ることが出来た。

Fig. 10は見積もられた熱伝達係数を用いて、さらに構造パラメータとして横軸にマイクロチャンネルの溝の深さを変えて、結晶取り付け面の温度上昇を計算した結果で

Fig. 8 Calculated temperature of the laser-irradiated surface of the heat-sinks by the finite element method (FEM) of ANSYS as a function of heat-transfer coefficient.

Fig. 9 Comparison of the temperatures of the laser-irradiated surface of the heat-sinks measured by an IR camera (Exp.) and calculated by FEM using the estimated heat-transfer coefficient (Cal.).

ある。Fig. 10の挿入図に解析形状を示す。マイクロチャンネル表面の熱伝達係数としては流量がほぼ1 L/min時に相当する60 kW/m²Kとした。この計算ではさらにヒートシンクの材料として熱伝導率は劣るが線熱膨張係数がYAGに近いCuW (Cu30 %)を用いた場合も検討している。なお、この計算では今後レーザー結晶取り付け面に段差加工をすることを考慮し、ヒートシンクの上面(結晶取り付け面)と裏側のマイクロチャンネル凹部(ない場合は平面部)との距離(厚み)は1 mmと厚く想定している。この図より熱伝導率の高いCuの方が全域にわたり5℃程度温度が低くなるが、いずれの材料においてもチャンネルの深さが0.5 mmを超えると温度上昇はほぼ一定になっており、それ以上深く(長く)してもあまり改善は期待できないことが分かる。これはマイクロチャンネルの凸部がヒートシンクより0.5 mm以上離れた領域では、放熱によってしだいに水温と温度差がなくなり、それ以上長くしても放熱効果が飽和するためである。この計算結果よりマイクロチャンネルの深さは0.5 mmでほぼ十分であることが分かった。実際にチャンネルの高さが1 mmのヒートシンクも試験的に製作し同様の温度上昇の測定を行った結果からも、高さ0.5 mmのものに比べ温度上昇の改善は2℃程度と小さいことが確認された。この計算結果から、先に実験で示した従来型の横水流型マイクロチャンネルヒートシンク(e)においてはチャンネルの長さが10 mm以上あるものの、そのほとんどの部分が冷却に寄与しておらず、

Fig. 10 Calculated temperature of the laser-irradiated surface of the heat-sinks by FEM as a function of the depth of the microchannel.

逆に不要な水の割合(断面積)が多いために流速が遅く、このため熱伝達係数が低い値となり冷却効率が低くなったものと理解できる。

4.5 衝突噴流における熱伝達係数の見積もりについての考察

衝突噴流は比較的簡単な構成で高い熱・質量輸送効率を得ることが出来るために、古くから注目され、また実際に工業的にも金属やガラスの加熱・冷却・乾燥処理やエンジンの冷却などに適用されている。原理としては表面に衝突した噴流はそこで減速して圧力が生じ、今度は表面に沿った流れが加速される。噴流衝突直下のよどみ領域(stagnation region)では、速度境界層や温度境界層の厚みが数10 μm のオーダーと極めて薄くなるために、衝突表面の近傍で非常に高い熱・質量輸送係数を得ることができる。前項では実験結果と有限要素法による計算結果との比較よりヒートシンクと水との界面の熱伝達係数を見積もったが、噴流衝突冷却については学問的にもこれまで多くの実験・解析結果が発表されている。しかしながら形状や条件が多様で、現象も非常に複雑でかつ実験条件に敏感であるために結果のばらつきが大きい。また衝突面に凹凸を有するような実験解析例は非常に少なく¹⁸⁾、特にVFMHの様に閉じた系では例がない。そこで衝突面がフラットである実験解析結果を参照し、熱伝達係数の大きさを検討する。よどみ領域においてヌセルト数は次式で表される¹⁹⁾。

$$Nu = hd/k \quad (1)$$

ここで h は熱伝達係数、 d はノズル直径(2.6 mm)、 k は流体(水)の熱伝導率(0.6 W/mK)である。またヌセルト数は一般にレイノルズ数 Re とプラントル数 Pr (300 K常圧の水の場合5.85)の関数としても表され、今回の実験の場合 Re は流量1 L/minでおよそ9500と計算される。さらに Nu は d とノズル先端と衝突表面との距離 z_0 と比 z_0/d でも大きく変化するが、今回の場合 z_0 は0.5~1 mmであるため $z_0/d < 1$ となり Nu は z_0/d に対して依存しない、ほぼ一定の値の領域になる。この条件における Nu の値(測定値)は複数の論文^{18,19)}から約200(ばらつき10%程度)と求められるため、(1)式から熱伝導率 h として46 kW/m²Kと求められる。今回の実験でFig. 8のFlatから求めた値(62 kW/m²K)はこの文献値に比べやや大きい。構造の違いや文献による測定値のばらつきなどを考えると、衝突噴流構造における熱伝達係数としては矛盾のない値であると考えられる。

5. ヒートシンクへのマイクロチップの実装とレーザー発振特性

Fig. 11に今回開発したVFMHに実際にYb:YAGマイクロチップを接合した外観写真を示す。マイクロチップはコアとなる5 at.% 単結晶Yb:YAGロッド(Scientific Material)の周囲にアンドープのセラミックYAGを焼成により一体化(コンポジット化)した後(神島化学工業製)、マイクロチップに加工整形し、各面にそれぞれHR、ARコートを行

った後HR面側をヒートシンクにAu-Snハンダにより加熱接合した。真円形の単結晶Yb:YAGコアは $\phi 5$ mm、外側の励起光ガイドとなるアンドープYAGセラミックの外形は8 mm角、厚みは0.3 mmで、4カ所に励起光を導入するための直線ウィンドウ面(幅6 mm)を有する。

Fig. 12にFig. 11で示した結晶付きヒートシンクに励起を行うために試作した4方向1 kW励起モジュール(レーザーヘッド)の外観写真を示す。使用した励起用LDはFA方向コリメートレンズ付き6段スタック型LD(JOLD-240-CAFN-6A, JenaOptics)最大単体出力240 Wで、集光光学ユニットは2枚のシリンドリカルレンズ、焦点距離それぞれ30 mm(SA方向)、7 mm(FA方向)から構成される。これによりLDからの励起光はマイクロチップの光ガイドウィンドウ面内でおおよそ高さ0.1 mm(FA方向)×幅4 mm(SA方向)の矩形スポット(1/e², 全幅)に集光され、高効率で結晶内に導入される。

次に試作したVFMHが、実際にレーザー結晶を装着した状態で所望の冷却性能を発揮していることを確認するための検証を行った。Fig. 13は励起入力183 W(CW)時のYb:YAGコア中心部の表面(AR面)温度上昇をIRカメラ(Thermo-vision CPA-8000(CHINO), Spectral range: 7.5~13 μm)により計測した結果である。測定は非発振状態で行った。なお発振状態においても温度上昇値はほぼ同等であった。横軸は冷却水の流量で水温は20 $^{\circ}\text{C}$ である。またFig. 8で見積もられた熱伝達係数を用いてYAG結晶上面の温度上昇をANSYSでシミュレーションした結果も合わせて示す。なおシミュレーション結果中のエラーバーは励起強度の見積もり誤差を反映したものである。理論計算

Fig. 11 Photography of the new heat-sink (VFMH) with a composite Yb:YAG microchip bonded on the top.

Fig. 12 1 kW diode edge-pumping module.

Fig. 13 Comparison of the measured and calculated temperatures of the AR coated surface of the Yb:YAG microchip core bonded on the VFMH as a function of water flow rate, edge-pumped by diode lasers (183W CW).

に比べ測定結果の方がやや温度が高いが良い一致が得られている。理論計算では結晶とヒートシンクの間の各層の界面の熱伝達を理想的なものと考えているが、実際には酸化層や変性層、欠陥などにより途中に熱抵抗が生じたために計算より温度が上昇した可能性がある。

Fig. 14にFig. 12の集光モジュールを用いて得られたレーザー発振特性を示す。VFMHへの冷却水温度20 °C、流量2 L/min、レーザー共振器長50 mm、出力ミラーの曲率250 mm、反射率97 %においてCW動作で958 W励起時に出力340 W(スロープ効率40 %、光-光変換効率36 %)と良好な高出力発振特性が得られ²⁰⁾、新しいヒートシンク(VFMH)の高い冷却性能を確認することが出来た。なおこのVFMHに高熱伝導性接着剤を用いてマイクロチップを接着した素子においても、同じ励起構成において280 Wを超えるCW出力を確認している²¹⁾。

6. まとめ

エッジ励起高出力マイクロチップYb:YAGレーザー用のヒートシンクを開発した。冷却水を縦方向に吹き上げる方式に変更することで四方から集光レンズを近接できる外形 $\phi 10$ mm×高さ25 mmのスリムな構造を実現できた。

Fig. 14 CW laser performance of the diode edge-pumped Yb:YAG microchip laser using the VFMH.

結晶取り付け面の裏側にマイクロチャンネル構造を形成することで、結晶取り付け面の温度上昇をフラットのものに比べ最大1/3まで低減できた。さらに従来の横水流型に比べると1/4以下に抑えることが出来、ヒートシンクの小型化と同時に高排熱化も達成することができた。また有限要素法による理論計算によりこの効果が放熱面積の拡大によるものであることが理解でき、さらにチャンネルの深さは0.5 mmあれば放熱効果として十分であることが分かった。製作したVFMHに実際にYb:YAGマイクロチップを実装しLD励起を行うことで、CWレーザー出力340 Wを得ることが出来た。このエッジ励起マイクロレーザー発振特性の詳細については別途稿を改めて報告する。

謝 辞

ヒートシンクの製作を手伝って頂いた自然科学研究機構分子科学研究所、装置開発グループの鈴木班長、矢野技師に感謝する。また本地域結集型共同研究事業のアドバイザーとしてヒートシンク上面の超平面加工研磨に関しご助言頂いた森 勇蔵、大阪大学名誉教授ならびに片岡俊彦、大阪大学教授に感謝する。本研究により開発されたヒートシンクに取り付けたマイクロチップ固体レーザー結晶は平成16年度の経済産業省の地域発コンソーシアム事業に採択され、福井県内の企業((株)ケイ・エス・ティー・ワールド)において製品化に向けた開発を現在進めている。

参考文献

- 1) 庄司 一郎, 平等 拓範: 光アライアンス **12** (2001) 19.
- 2) 平等 拓範, 常包 正樹, ダスカル・トリアン: レーザー研究 **33** (2005) 228.
- 3) P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan: Opt. Lett. **16** (1991) 1089.
- 4) T. Y. Fan: IEEE J. Quantum Electron. **29** (1993) 1457.
- 5) E. Innerhofer, T. Sudmeyer, F. Brunner, R. Haring, A. Aschwanden, R. Paschotta, C. Honninger, M. Kumkar, and U. Keller: Opt. Lett. **28** (2003) 367.
- 6) J. Saikawa and T. Taira: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L649.
- 7) T. Y. Fan: IEEE J. Quantum Electron. **28** (1992) 2692.
- 8) A. Giesen and F. Dausinger: レーザー研究 **33** (2005) 219.
- 9) T. Kasamatsu, H. Sekita, and Y. Kuwano: Appl. Opt. **38** (1999) 5149.
- 10) N. Pavel, J. Saikawa, and T. Taira: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) 146.
- 11) T. Dascalu, T. Taira, and N. Pavel: Opt. Lett. **27** (2002) 1791.
- 12) T. Dascalu, N. Pavel, and T. Taira: Appl. Phys. Lett. **83** (2003) 4086.
- 13) U. Brauch, A. Giesen, A. Voss, and K. Wittig: US Pat. 5553088 (1996).
- 14) 常包 正樹, ダスカル・トリアン, 平等 拓範: レーザー学会第25回年次大会予稿集(2005年1月) p. 46; 常包 正樹, 平等 拓範: 特願2003-375057.
- 15) 宮島 博文, 古田 慎一, 鈴木 英樹, 大石 諭, 森田 剛徳, 宮本 昌浩, 神崎 武司, 菅 博文: レーザー学会第290回研究会報告 RTM-01-36 (2001) p.29.
- 16) CAD/CAE委員会編: ANSYS工学解析入門(理工学社, 東京, 2003年).
- 17) 相原 利雄: 伝熱工学(裳華房, 東京, 2004年).
- 18) D. Friedeman, V. Callahan, and B. W. Webb: J. Heat Transfer **116** (1994) 486.
- 19) B. W. Webb and C. -F. Ma: Adv. Heat Transfer **26** (1995) 105.
- 20) M. Tsunekane, T. Dascalu, and T. Taira: Technical Digest of Conf. on Lasers and Electro-Optics. Baltimore, May 2005, CTuZ3 [invited].
- 21) M. Tsunekane and T. Taira: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L1164.