

## 高輝度 Yb:YAG 固体レーザー技術に関する研究

### 高出力・短パルス Yb:YAG レーザの開発

#### (1)超短パルス Yb:YAG レーザの開発

研究員 平等拓範（分子科学研究所）

研究員 常包正樹（ふくい産業支援センター）

研究員 トライアン・ダスカル（ふくい産業支援センター）

研究員 石月秀貴（分子科学研究所）

研究員 パベル・ニコライ（分子科学研究所）

#### [研究の概要]

高出力・短パルス Yb:YAG レーザの要素技術となるエッジ励起マイクロチップ Yb:YAG レーザの研究開発を行い、CW（連続発振）動作で 340W の出力と  $M^2 < 17$  の高輝度ビーム（市販レーザーの約 9 倍の輝度）を得ることに成功した。また超短パルスを発生させるためのモード同期技術の開発では SESAM（半導体可飽和吸収体）を用いた Yb:YAG マイクロチップレーザで 780fs の超短パルスの発生に成功した。さらに波長変換や超短パルス発生素子としても期待される赤外域 OPO 用 MgO:LN の開発を行い、3mm 厚の LN 基板への反転分極構造の作成に世界で初めて成功した。

#### [成果展開可能なシーズ]

1．コンポジット Yb:YAG マイクロチップ構造、2．小型高性能水冷ヒートシンク、3．マイクロチップ用ダイボンド装置、4．高出力エッジ励起マイクロチップレーザ、5．SESAM を用いた超短パルスレーザ、6．厚い LN 基板への反転分布形成技術

レーザ光源として CW から超短パルス動作に至るまで、小型、高出力、高輝度である特長を生かし、各種理化学計測用組み込み光源を始め一般の産業用レーザ加工機光源から印刷機やディスプレイ光源、次世代の大容量ホログラムメモリー用光源、さらには将来の自動車エンジンの点火光源までを応用の視野に入れた、既存市場における性能向上のみならず小型化を生かした、全く新しい市場での広範囲な適用、展開が期待できる。

#### 1．はじめに

レーザによる次世代の材料加工創成技術の構築に必要な、高いビーム品質と変換効率、超短パルス発生の優位性を持つ Yb:YAG レーザに関する要素技術の研究を行った結果、その性能を最大限に引き出せる画期的な新構造としてエッジ励起マイクロチップレーザを提案、世界に先駆けて性能を実証した。エッジ励起に適した高機能コンポジット（単結晶コア + 透明セラミックガイド）レーザ媒質の試作や、その形状、製膜構造の最適化、超小型高性能水冷ヒートシンクや独自機構の高均一加重、低熱負荷ダイボンド装置の開発、さらに小型高出力 LD 励起モジュール（ヘッド）の開発により、小指の爪ほどのサイズ（5mm $\times$ 0.3mm）のレーザ媒質（マイクロチップ Yb:YAG コア）から 300W を超える連続光（CW）出力と  $M^2 < 17$  の高輝度ビーム（市販レーザーの約 9 倍の輝度）を得ることができるようになった。さらに Yb:YAG の持つ広い蛍光幅を利用し、半導体可飽和吸収体（SESAM）を組み合わせた共振器によりフェムト秒（fs）領域の超短パルス発生実験を行った。また合わせて高性能なパルス発生用素子としての QPM デバイスの研究開発、試作評価を行い、高出力動作に優位な 3mm 厚の LN 基板への反転分極構造の作成に世界で初めて成功した。

## 2. 研究目的および内容（フェーズ）

超短パルスレーザーを用いた各種加工の産業への応用が期待されているが、従来のチタンサファイアレーザーをベースとした大型で低効率、低出力、低安定性の超短パルスレーザーシステムに変わる新しいレーザーシステムが望まれていた。

本研究ではまず小型、高効率、高出力・高安定の超短パルス Yb:YAG 固体レーザーの実用化のための要素技術の確立を目的として、超短パルスマイクロチップレーザーおよび超短パルス増幅器の開発を行った。内容としてはエッジ励起による励起光閉じ込め効果の最適化と熱効果による波面歪みの補正や、QPM を用いたパルス圧縮伸長技術の開発を行い、目標として CW 出力 100W、TEM<sub>00</sub> モード、光-光変換効率 40% を目指した。

またレーザーの大きな特長である波長変換による加工性能の向上も期待されており、そのための Yb:YAG レーザーの波長変換法の開発の一環として、赤外域波長可変高出力 OPO の開発を行った。内容としては QPM デバイス等を波長変換素子として使用することとした。目標として波長可変域 1.5 ~ 5 μm、平均出力 1W 以上を目指した。

## 3. 研究成果（フェーズ）

### 3.1 高出力・超短パルス Yb:YAG 固体レーザーの開発

要素技術として超短パルスマイクロチップレーザーおよび超短パルス増幅器の開発を行った。

超短パルスマイクロチップレーザーの開発では、Yb:YAG の特性限界を追求する目的で準四準位レーザーに固有なレーザー下準位吸収損失を制御した高 Q 値マイクロチップ共振器を試作した。これにより Yb:YAG レーザーにおいて 85nm (24THz) の波長可変の世界記録を更新した。このことは Yb:YAG を用いても 100fs を切るような超短パルス発生が可能であることを示唆するものである。さらに試作したヒートシンクモジュールを用いてエッジ励起マイクロチップ Yb:YAG レーザーの発振に成功、CW で 3W 出力をスロープ効率 60% で得た。準 CW 動作では、最大 41W 出力をスロープ効率 38% を達成した。さらにチップの改良による特性改善を図り準 CW 動作で最大出力 94W をスロープ効率 45% 以上で達成した。

また、YAG に対する検討を行った結果、従来用いられてきた(111)カットよりも(100),(110)カット結晶を用いることで、熱複屈折による偏光解消損失を本質的に低減できる新たな手法を発見した。

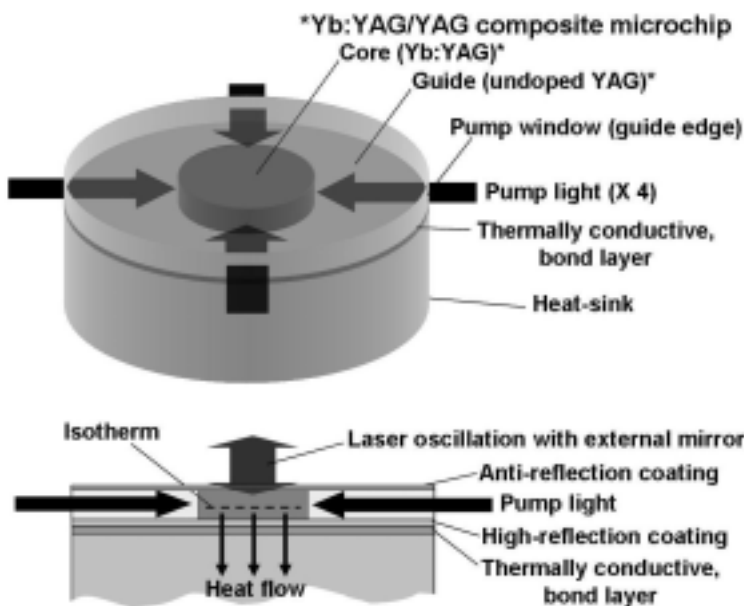


図 3-1 エッジ励起マイクロチップレーザーの概念図

Yb:YAG マイクロチップにおける超短パルス発生の一つとして、可飽和吸収体 Cr:YAG による短パルス化を検討し、6.5ps を得た。

超短パルス増幅システムの開発では Yb:YAG マイクロチップを用いたエッジ励起という新しいレーザー発振の開発を行った。図 3-1 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。中央のコアに Yb:YAG 媒質を配置し、その周囲にレーザー発振元素を含

ない透明なアンドープ YAG 媒質を一体形成した薄い円盤状のコンポジットマイクロチップの一面を、ヒートシンクに接合（接着）しレーザ媒質（コア）の冷却を行う。レーザ共振器はマイクロチップのヒートシンクに接着される面にあらかじめ形成されたレーザ光に対する全反射膜と、その反対側のレーザ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。ドイツで開発された薄ディスクレーザと大きく異なる点は、LD からの励起光はレーザ発振方向と垂直に、コア外周のアンドープ YAG（励起光ガイド）エッジから導入されることである。一旦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のような複雑な多重反射励起のための光学系をレーザ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ヘッドを構成することができる。さらに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有利である。加えて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光はこれと垂直に透過するため、レーザ発振光内での波面の乱れが生じにくく高輝度のレーザビームが得られやすい。またエッジ励起方式においてはチップの厚みが薄くなってもコアにおける高い吸収率が維持できるために、チップの薄膜化はレーザ媒質内の温度低減によるレーザ出力の向上、効率の改善に非常に有利である。

図 3-2 に、4 方向エッジ励起用マイクロチップコンポジット Yb:YAG をヒートシンクにマウントした試作ヘッド外観を示す。レーザ媒質として、2mm x 2mm の 10 at.% Yb:YAG 単結晶コア部を、無添加単結晶 YAG が取り囲むように拡散接合（ONYX Optics Inc.）し、外径 9mm のロッド形成したものから、厚み 400 $\mu$ m に薄く研磨加工することで、複数枚の Yb:YAG/YAG コンポジット構造マイクロチップを作製した。さらに、ヒートシンクとの接合面側にレーザ発振波長である 1030nm に対し全反射、反対面に無反射コーティングを施した。このチップを 200 $\mu$ m チャンネル幅の横水流型マイクロチャンネルヒートシンクに Au/Sn 混晶化反応により接合している。なお、励起光取り込み用に幅 2mm の窓をチップ側面形成する際に、寄生発振を防ぐため斜め研磨（3~5 $^\circ$ ）を施している。励起には、中心波長 940nm のファイバー結合形 LD（JOLD-100-CAXF-15A, JENOPTIK Laserdiode）光をレンズにて励起窓に集光し、用いた。この時、測定された励起光吸収効率は約 74%と高く、エッジ励起の場合、厚みに関係なく吸収光路を長くとれるため、簡単な励起光学系でも吸収効率を高くできることになり高出力化に有利であることが分かる。

このエッジ励起マイクロチップ Yb:YAG/YAG レーザの入出力特性を図 3-3 に示す。共振

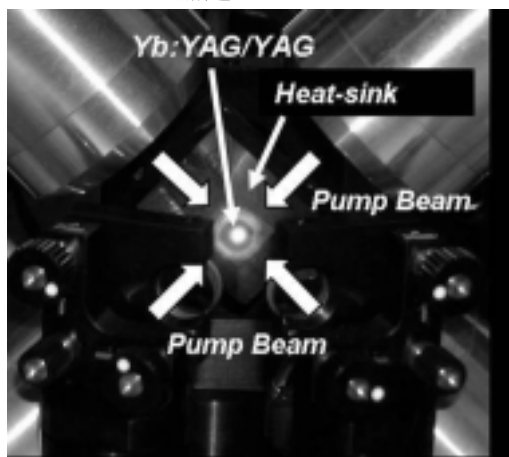


図 3-2 試作ヘッド外観

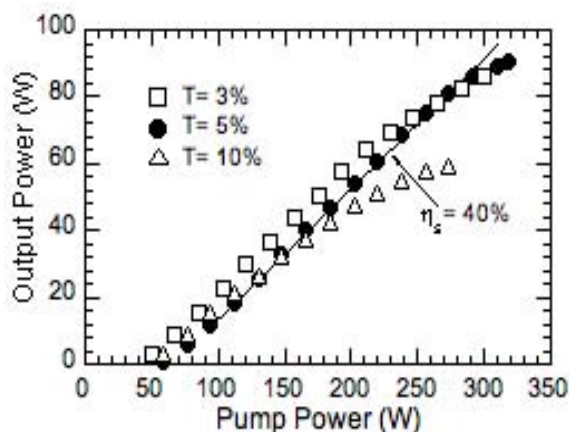


図 3-3 入出力特性

器は、曲率 100mm の出力結合鏡を、チップから約 50mm 位置に配置し、半共焦点形構成とした。透過率  $T=5\%$  時に出力最大となり、90.2W が得られた。この時の励起入力 は 318W、しきい値は約 55W で、その倍程度の励起に対するスロープ効率は 40% であった。 $T=3\%$  の場合、しきい値は約 40W と改善できるが、スロープ効率は 37% と低下した。 $T=10\%$  ではさらに 31% スロープまで低下した。ところで、Yb:YAG コア面積は、上記の共振器構成の基本モードの面積に比べ数 10 倍大きいため、その発振モードは高次横モードとなる。そこで、平面全反射後部鏡と曲率 1m の出力鏡により、長さ 660mm の V 形共振器を構成し、後部鏡から約 360mm 位置に Yb:YAG チップを配置することにより横モードの低次元化を図った。最大出力は約 25% 低下したものの、 $M^2$  値は 5 程度まで改善された。

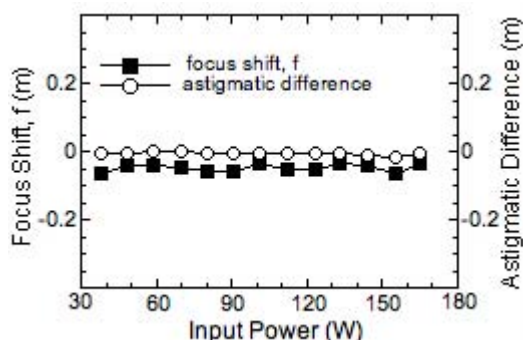


図 3-4 焦点シフトと歪み変化

次に励起に付随した発熱による波面歪みについて評価を行った。直径 3mm の He-Ne の出力光をプローブとし Yb:YAG 結晶に入射させ、反射させ往復透過光を Shack-Hartmann 波面センサー (Wavefront Science Inc., CLAS 2D) にて解析を行った。測定の結果、拡散接合周辺は大きな歪みが残っており、これがレーザ発振横モードを劣化させている 1 つの原因と分かった。さらに、評価を進めるため、コア中心部の直径 1.9mm 領域のみ選択し、Zernike 係数を抽出した。これにより出力波面が再構築される。得られた係数  $C_{2,1}$  より曲率が求まり、これより等価的焦点距離が計算される。また、係数  $C_{2,0}$  と  $C_{2,2}$  は歪みを表す量である。ここで、 $Zernike$  円形マスクの大きさを表す因子で、はレーザ媒質の屈折率である。なお、これらを除く高次係数は小さいため無視した。解析より得られた焦点シフトと歪み変化を図 3-4 に示す。入射励起パワー 40W から 180W の範囲内で、焦点シフト量はほぼ一定で 0.05m、歪みの変化も 0.01m と良好な結果を得た。このことは、Au/Sn 混晶により結晶と金属間で高い面内均一性を維持したまま、低い熱抵抗接合が可能であることを示すものである。

また Yb:YAG マイクロチップにおける高出力超短パルス発生法として、新たな 2 次の非線形光学効果を用いたモードロック法を検討し、Yb:YAG を用いて初めて短パルスの発生に成功した。本手法ではスイッチング速度は零であり、吸収損が無いため最終的には理想的な高出力超短パルスの発生が期待される。まず、Yb:YAG マイクロチップレーザの基本特性を評価するため同一共振器で非線形光学結晶 LBO の位相整合を外し CW 動作とし、76.4% のスロープ効率 (光

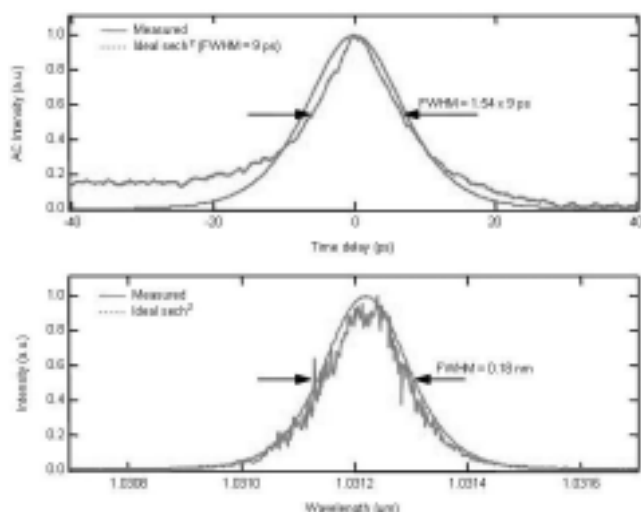


図 3-5 非線形ミラーによる超短パルスレーザのパルス幅

変換効率 62.4%) を得た。次に LBO の位相整合を行い非線形ミラーを形成した。10mm 長の LBO 結晶では励起入射パワー 0.9W で超短パルス発生を確認したが不安定であり、不揃いのパルスが出現した。励起が 1.6W 以上になると安定なモードロック状態となった。しかし、群速度不整合のためパルス幅は  $\text{sech}^2$  評価で 39ps に留まった。短パルス化を図るため LBO 結晶長を 5mm と半分にしたところ、9ps までパルス幅を短くできたが (図 3-5)、結晶長が短いため十分な変調が得ら

れず Q スイッチ型モードロック状態に留まった。非線形ミラーでは吸収損失が無いため高出力化に適しており、光変換効率も 51%にも達した。

また共振器構成の最適化により SESAM を用いた Yb:YAG マイクロチップレーザで平均出力 150mW、パルス幅 780fs の超短パルス発振を確認した。別の Yb 系材料では同種の構成で 490fs を得た。

これまで既にカイツーモードロックの実験で端面励起の Yb:YAG マイクロチップから平均出力 1 W のピコ秒パルスを得ているが、エッジ励起マイクロチップにおいても QCW 動作では 60W までの TEM<sub>00</sub> モード発振とカイツーモードロック動作を確認できた。

### 3.2 Yb:YAG レーザ光の波長可変法の開発

中赤外域波長可変高出力 OPO の試作を目標に高機能光パラメトリック発振器、差周波発生方式の検討を行った。出力光波長との関係 OPO+DFG により波長 5 $\mu$ m 帯中赤外光を得るためには、OPO 用 QPM デバイスにおける微細構造周期が 30 $\mu$ m 程度の素子を作製する必要がある。

Yb:YAG レーザ光から広帯域な赤外光を発生させる非線形波長変換方式として高効率化、多機能化の可能な擬似位相整合 (QPM) 法について検討した。QPM 材料として一般的な LiNbO<sub>3</sub> (LN) では光損傷閾値が低く高出力化には制限が有る。高輝度 Yb:YAG レーザの波長変換には、耐光損傷特性の高い MgO:LN の利用が不可欠である。このため、まず分極反転条件を明らかにするため分極壁その場観察法の開発を行った。

平成 13 年度における研究において、室温条件下での MgO:LN の分極反転特性を「分極反転のその場観察装置」(平成 12 年度開発)を用いて評価した。しかしこの時点では、高出力化に適した広い断面積 (結晶厚 3mm) の MgO:LN に、中赤外光発生に適した反転周期

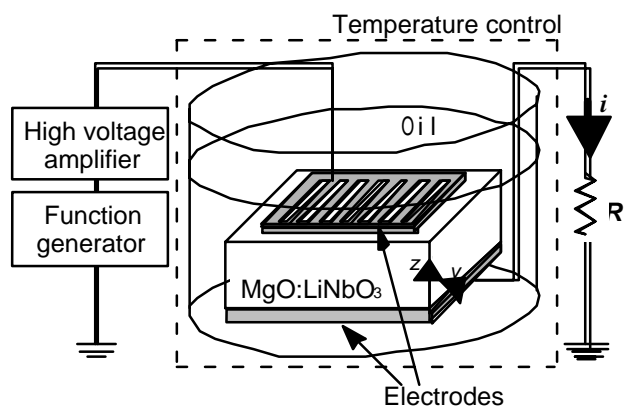


図 3-6 分極反転装置概略

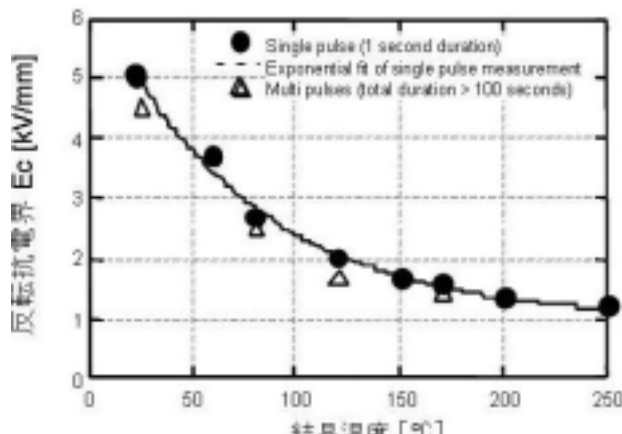


図 3-7 反転抗電界の温度依存性

期  $\text{OPO} \approx 30\mu\text{m}$  に近い構造を得ることはできなかった。この原因は作製しようとする微細周期構造の横方向拡がりを抑制できず、分極反転の周期性は維持できなかった。MgO:LN 結晶の分極反転は通常は室温条件下で行われるが、これを加熱条件下で行うとその特性が大きく変化することを平成 14 年度の研究において新たに見出した。温度特性評価は図 3-6 に示す構成で行った。高電圧印加のためのアルミニウム製金属電極を備えた MgO:LN 結晶を絶縁オイル中に浸し、温度を変化させてながら高電圧パルスを印加することで分極反転時の温度依存性を測定した。図 3-7 にその結果を示す。MgO:LN 結晶の反転抗電界  $E_c$  (分極反転に必要な電界) は、印加する高電圧パルスの時間幅により多少変化する。図 3-7 のグラフ中で、幅 1 秒の短パルス 1 発のみで測定した場合 (●) および計 100 秒以上のマルチパルスで測定した場合 (△) を示

している。 $E_c$  は結晶温度  $T$  の上昇で著しく減少し、 $T=250$  では  $E_c \sim 1.2\text{kV/mm}$  まで低下することを確認した。この値は、 $\text{MgO}:\text{LN}$  結晶の室温付近での  $E_c \sim 4.5\text{kV/mm}$  の約  $1/4$  であり、通常の  $\text{LN}$  の室温付近での  $E_c \sim 21\text{kV/mm}$  に比較すると約  $1/17$  と大きく低下した。また同時に、前年度の室温での実験における周期構造消滅の原因であった微細構造の横拡がりを、この結晶加熱により抑制できることが新たに明らかとなった。これらの結果は、 $\text{MgO}:\text{LN}$  では結晶の加熱が反転抗電界  $E_c$  の著しい低下につながり、かつ微細構造の横拡がりを抑制できることから、広断面積 QPM デバイス作製に望ましい特性を有することを示している。この加熱条件下における周期構造作製によって、これまで実現できなかった  $3\text{mm}$  厚  $\text{MgO}:\text{LN}$  結晶への約  $30\mu\text{m}$  周期の分極反転構造の作製に、世界で初めて成功した。実験の構成は図 3-6 とほぼ同じであり、絶縁オイル中に楕形電極を装架した結晶を浸し、高電圧を印加することで周期構造作製を試みた。いつか異なる高電圧印加条件（印加時間・印加電圧）の下で周期分極反転構造作製を試みた結果、結晶温度  $T=170$  の条件下で周期的反転構造を形成することに初めて成功した。図 3-8(a)~(d)に、エッチング処理により可視化した結晶表面及び断面写真を示す。 $3\text{mm}$  厚結晶の  $+Z$  面から  $-Z$  面まで貫通する周期  $30\mu\text{m}$  の分極反転構造（反転パターン幅：結晶厚=1：200）が実現できていることがわかる。

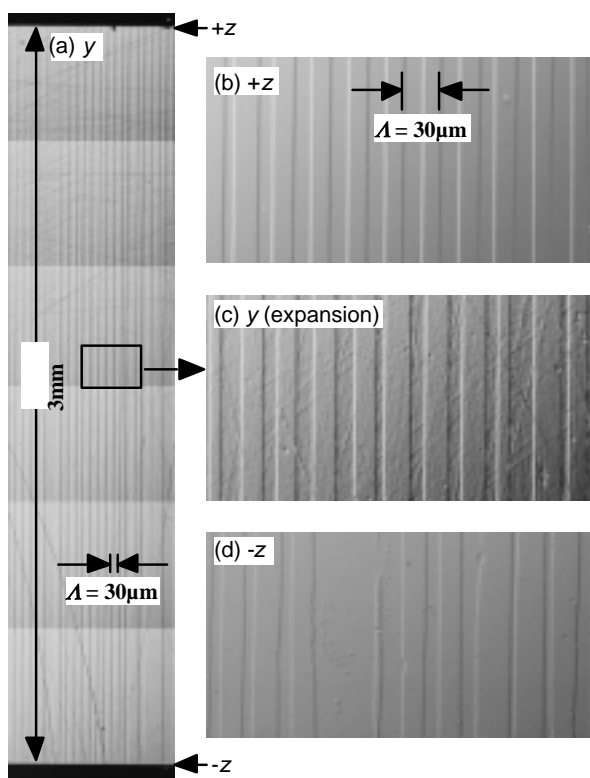


図 3-8 可視化した反転分極構造

以上、大きな非線形光学効果を示し光損傷に比較的強い  $\text{MgO}$  添加  $\text{LiNbO}_3$  結晶を用いた広断面積擬似位相整合デバイス作製を試みた。その結果、他の  $\text{LN}$  結晶と大きく異なる  $\text{MgO}:\text{LN}$  結晶の反転抗電界の温度依存性を明らかにし、従来実現できなかった厚さ  $3\text{mm}$  の結晶への周期  $30\mu\text{m}$  の分極反転を世界で初めて実現した。この結果、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶における周期分極反転の基礎技術をほぼ確立した。

#### 4. 研究目的と内容（フェーズ）

フェーズではフェーズでの2つの課題を統合し、超短パルス  $\text{Yb}:\text{YAG}$  レーザの開発に課題を集約して2つの目標について研究を行った。1つは高出力・超短パルス  $\text{Yb}:\text{YAG}$  レーザシステムの開発を行った。目標としてはパルス平均出力  $20 \sim 50\text{W}$ 、ビーム品質  $\text{TEM}_{00}$  モード、パルス幅 数  $100\text{fs}$  とした。もう一つは増幅システムの要素技術のエッジ励起マイクロチップレーザを用いた CW 方式  $\text{Yb}:\text{YAG}$  レーザの高出力化、高安定化を行った。目標としては CW 出力  $300\text{W}$ 、ビーム品質  $\text{TEM}_{00}$  モード、光変換効率  $40\%$  とした。研究の手順としてはまず CW 方式でのエッジ励起  $\text{Yb}:\text{YAG}$  マイクロチップレーザの高出力化と高安定化を行った後に、共振器構成の変更により同マイクロチップより高出力超短パルスレーザ光を発生させる方針で研究を進めた。

また B,C 研究グループへ  $\text{Yb}:\text{YAG}$  レーザを提供し、加工評価を行うためにコア研に於いてヒートシンク付き  $\text{Yb}:\text{YAG}$  マイクロチップを搭載した小型集光モジュールを製作し、それを

外部のレーザーメカに支給して、レーザー加工の現場に於いて稼働評価可能なプロトタイプレーザー装置を製作した。製作にあたっては必要な資材、具体的には Yb:YAG マイクロチップ結晶、励起用 LD、LD 駆動用電源、結晶及び LD 冷却用冷却器の仕様確定、メーカーの選定と発注に必要な書類、仕様図面の作成、納品資材の検収確認を行った。またレーザーの試作請負に関する詳細な仕様書および図面を作成した。また試作機に搭載可能な高性能で商用化に適したセラミック材料とのコンポジット Yb:YAG マイクロチップの研究試作および品質性能評価を行った。さらに高出力 CW レーザ用新型ヒートシンクを新たに開発、その冷却性能の実験的な評価を行った。またかかるヒートシンクの新技术について特許を作成した。さらに CW 動作マイクロチップ型 Yb:YAG の高性能化（高輝度化、高安定化）を目標として研究開発を行った。高輝度化の目標値としては TEM<sub>00</sub> モードで 100W 出力、高安定性としては 100 時間程度の連続安定動作を目指した。加えて高安定性を得るためにレーザー結晶に対して低負荷で、大面積化に対応できるダイボンド法の検討を行った。マイクロチップを高精度、高均一にヒートシンクに接合できる独自構造の加重方式のダイボンドを試作し、加熱温度、時間をパラメータとして結晶をヒートシンクに接合し、接合界面の品質を超音波断層計測で観測した。さらに実際に LD で励起を行い赤外線カメラにより界面や結晶の温度上昇を評価し、最適な加熱条件とそのトレランスを評価した。さらに製作した試作機に於いて長時間（～100h）時間運転によるレーザー発振特性評価と発振トラブル時の対応策のマニュアル化を行った。

一方、CW 方式のレーザーの開発と同時に Yb:YAG マイクロチップを用いた超短パルスモードロック発振器の開発研究を行った。MOPA 方式超短パルス Yb:YAG レーザシステム試作のオシレータ部の超短パルス発生技術について、各種の方式を比較検討した結果、端面励起 SESAM モード同期方式 Yb:YAG マイクロチップレーザーヘッドが励起効率、出力の安定性、制御性などの観点から有利であるとの結論に至り設計方針が確定された。また同じく高出力のピコ秒マイクロチップ Yb:YAG レーザの研究開発を行った。平均出力は数 W を目標とし、モード同期方式としては特にカイツーモード同期方式を選択し、高出力、高安定な加工用短パルスレーザー開発を目指した。

## 5．研究成果（フェーズ）

### 5．1 単結晶 Yb:YAG/セラミック YAG コンポジットマイクロチップ構造の開発

近年国産での透光性セラミックを媒質とした様々な固体レーザーの研究が注目されている。また同時にセラミックの自由度の高い製法を利用して製作したコンポジット構造は、前節で述べた結晶同士のコンポジット構造に比べ、量産性やコスト、納期の点から将来の産業用の固体レーザー媒質として実用性が高いと考えられる。そこでさらにマイクロチップとしてセラミックによるコンポジット構造を検討した。

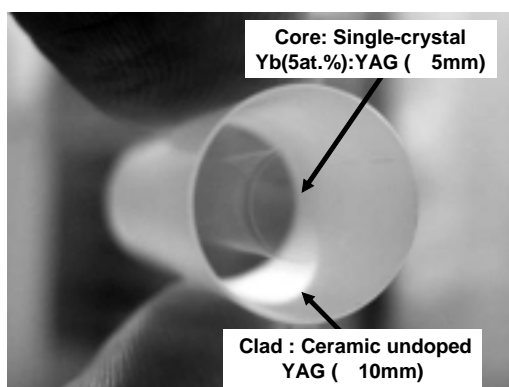


図5-1 コンポジットセラミック Yb:YAG ロッド

図 5-1 は神島化学工業により製作したコンポジット Yb:YAG ロッド（φ10mm×30mmL）である。単結晶コアとセラミックの境界には欠陥や変色などは見あたらず、単結晶同士に比べ肉眼ではほとんど見えない。このことは境界を横切って励起を行うエッジ励起の母材として適していることを表している。このロッドをチップに切断することで一度に大量のマイクロチップを製作することが出来る。マイクロチップ（300μm）に切り出したものの等価は面歪みを 1 μm のレーザー光を

プローブとしてシャックハルトマンセンサー (CLAS2D) で測定した結果、コア内には波面の乱れは見られず、周辺をセラミックで囲った事による歪みのようなものは観測されなかった。

## 5.2 高性能小型水冷ヒートシンクの開発

フェーズ1ではエッジ励起コンポジット Yb:YAG マイクロチップレーザにおいて、300W 励起時に QCW 動作で 135W、CW 動作で最大 90W を実証した。しかし加工用光源として CW 出力 300W を目指すためには、さらに3倍以上の高い 1kW 程度の励起光を結晶内に導入する必要がある。そこでフェーズ2ではさらに高い冷却効率を有する新しい方式の水冷ヒートシンクを研究開発した。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をくり抜いて冷却水が流れる細長いパイプ (ノズル) 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。冷却水はその後パイプの外側とヒートシンク内壁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

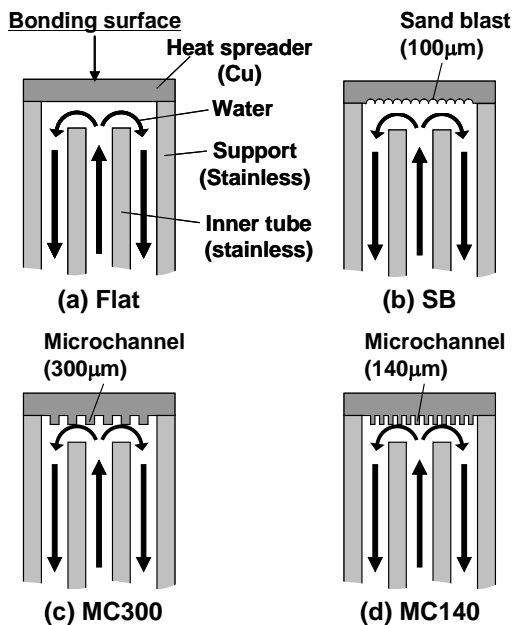


図 5-2 最適化サンプル構造

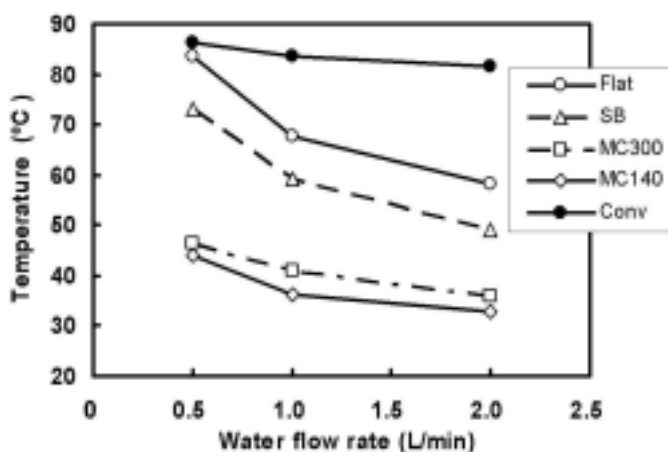


図 5-3 各サンプルの励起表面温度比較

いた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がヒートシンク裏面に衝突することによる噴流効果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でも例がみられるが、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を設けたヒートシンク (Vertical water-flow microchannel heat-sink:VFMH) を試作し、その性能を実験と理論設計の両面から評価、最適化した。

結晶取り付け部裏面のマイクロチャンネルの効果を比較評価、最適化するために図 5-2 に示すような評価サンプルを作成した。図 5-3 は、評価方法としては結晶取り付け面に 70W の連続波レーザ光 (5mm) を照射し、IR カメラにより照射面の温度上昇を測定した結果を、冷却水流量に対してプロットしたグラフである。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



(MC300 または MC140) で、結晶取り付け面の温度上昇をフラットのもの (Flat) 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 (Ø5mm 領域) の熱抵抗の値としては 140µm 間隔のマイクロチャンネル (MC140) で 2L/min 時において 0.25°C/W と求められる。

### 5.3 マイクロチップ用ダイボンド装置の開発

マイクロチップを開発したヒートシンクに Au-Sn 接合するためのダイボンド専用装置を開発した。市販されている半導体素子用ダイボンド装置と比較して設計上次の点に留意して設計製作を行った。

- (1) 接合面積が広い
- (2) 均一な排熱のために全面が接合されている必要がある。
- (3) 接合していない空孔領域をなくす。
- (4) 高い熱伝導率を得るためにハンダ層は極力薄くする。
- (5) ダイボンドの際、上面の AR コーティングに傷が付かないようにチップを押さえつける。
- (6) 誘電体膜が剥がれないように極力低い温度で短時間加熱する。

広い面積にわたり均一に接着するためには、まず準備としてマイクロチップおよびヒートシンクの接着面の平面度が十分高くなくてはならない。また接合前に形成するハンダ層の厚みも均一である必要がある。次にダイボンド装置としては接合の際、チップをヒートシンクに押しつけ、間の空気を押し出す必要があるが、このときチップとヒートシンクが平行になるように押さないと、事前の素子の準備がなされていても接触した一部例えばヒートシンク側の接合面の角しか接合しない。AR 面側からの押さえの先端が平面である場合が一般的であるが、その場合、押さえ面の凹凸や逆にチップの AR 面側の凹凸などで接触面積が著しく小さくなる場合上がる。その面の圧力が一点に集中するために、AR コートに傷が付く、最悪の場合チップが割れてしまう可能性がある。さらに押さえ面や AR 面に凹凸がなくても、押さえる圧力をかける方向と結晶の垂直面方向にズレがある場合、やはり押さえる角で押さえる形になるため圧力が一点に集中する。そこで一点あるいは一面で押さえるのではなく、面上で複数個の動作が独立した押さえで押さえつける方法を考案した。この方法であれば面積が広くても押さえる数を増やすことで対応できる。複数の点で独立にほぼ同じ圧力を加えるために力の総和としては平均化されチップとヒートシンクの面が平行

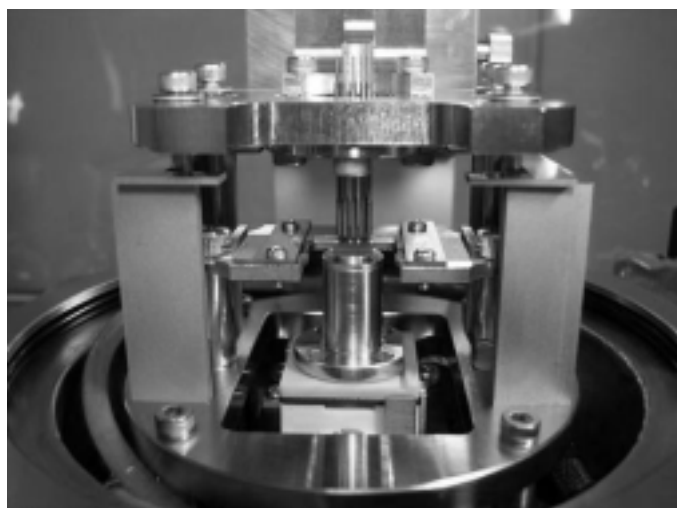


図 5-4 多点加圧システムの外観

に相対する方向で力が加わることになる。また仮に結晶やヒートシンク面上に微小な面のうねりや凹凸があっても複数の点で抑えるために広い面積に於いて良好な接合を得ることが出来る。さらに圧力が一点に集中せず、必ず分散されるために AR コートに傷が付くにくい。最悪の場合コアを避けて圧力点を配置すれば AR 面には全く傷が付くことはない。図 5-4 に試作した多点加圧システムの写真を示す。

誘電体膜への熱歪み、剥がれを防



図 5-5 ダイボンド装置全景

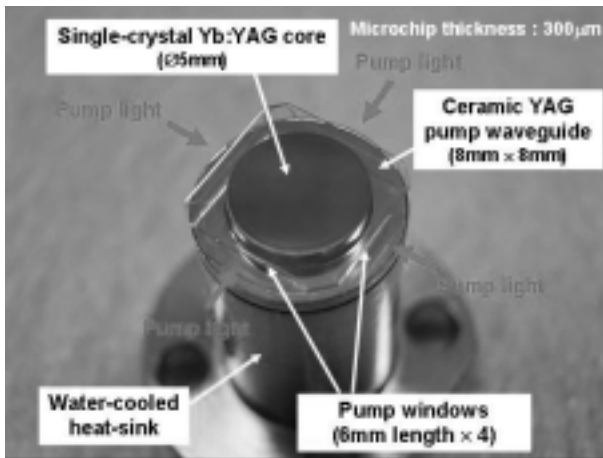


図 5-6 Au-Sn マウントされたマイクロチップ

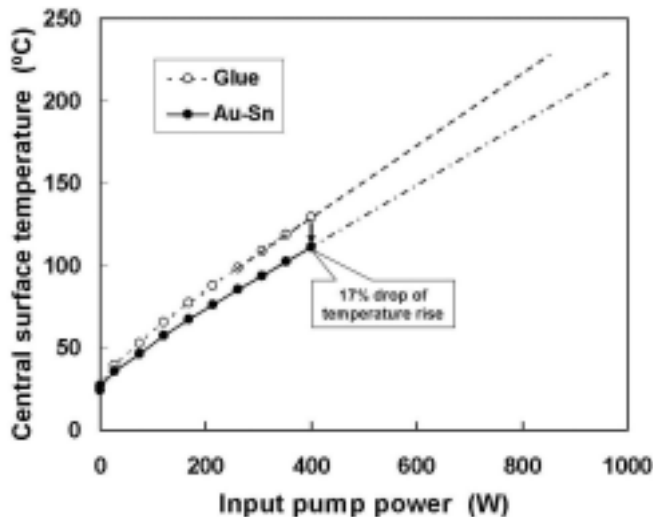


図 5-7 励起時のコア中央部の温度上昇の比較

止するために加熱温度は極力低く、加熱時間は短くすることが望ましい。すなわち昇温、降温（冷却）レートが速く、温度制御性、再現性の高いヒータが必要である。そこで市販の半導体用ダイボンド装置でも採用されているデジタル制御の SiC ヒータを採用した。ヒートシンクの加熱方法としては再現性を重視し、結晶からは遠いが接触面積が常に同じであるヒートシンクの取り付け面から熱を伝える方法とした。昇温レートとして  $50 \text{ }^\circ\text{C/s}$  が得られた。SiC ヒーターと高速デジタルコントローラを用いたダイボンド装置の試作を行い、300 までの到達時間 ~ 30 秒と高速化と制御性の向上、変動 3% 以下の高い温度再現性を確認した。N<sub>2</sub> ガス雰囲気中に還元剤として H<sub>2</sub> を微量導入した。Fig.5-5 に装置全景を示す。上部が加圧状態で加熱するチャンバー、中段が温度制御機器、下段がガス配管および流量制御である。

図 5-6 に Au-Sn によりヒートシンクにダイボンドしたコンジットマイクロチップの外形写真を示す。図 5-7 は 4 方向励起を行ったコア中央部の温度上昇を IR カメラにより測定した結果を示す。図中では比較のために高熱伝導製接着剤で接合した素子の温度上昇も合わせて示す。チップの厚みを含めコアの形状、Yb 濃度も同一である。測定結果より Au-Sn ダイボンドを行うことにより AR コートの表面温度上昇が 17% 低下することが分かった。これは Au-Sn の方が接着剤に比べ熱伝導率が 1 桁高いこと、軟化点（融点）が Au-Sn の方が 280 と接着剤の 100 にくらべ高いために、温度上昇に対する硬度や熱伝導率の低下が小さいこと、さらに漏れたレーザー光に対する反射率も Au-Sn の方が高いと考えられるために吸収による温度上昇が抑えられることが考えられる。

図 5-8 は実際に発振可能なコーティングがなされた Yb:YAG マイクロチップを接合したものの接合界面を超音波断層像

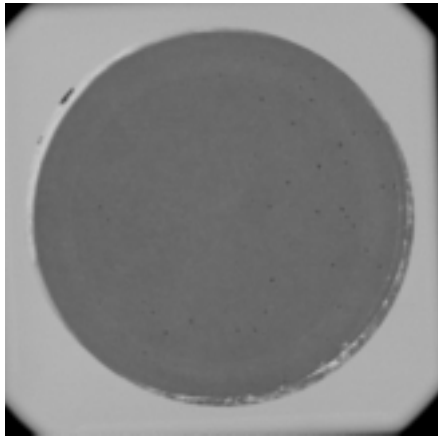


図 5-8 AuSn 接合界面の超音波断層画像

である。接着剤のような空孔はなく接合面全面にわたり均一な接合が形成され、本研究によるダイボンダ装置の高い性能が実証できた。

図 5-9 はコア内の励起光吸収分布のシミュレーション結果である。コアサイズ  $\phi 5\text{mm}$ 、厚み  $300\mu\text{m}$  で励起光の吸収係数は  $3/\text{cm}$ 、LD からの励起光は  $100\text{W}$  で 4 方向、励起ビーム幅 (SA 方向) は全幅  $2\text{mm}$  で平行光とした。図のようにコアの中心部  $2\text{mm}$  角でほぼ均一な励起光吸収分布が形成されることが予測される。図 5-10 は結晶内に入射する励起光入力パワー (4 方向合計)  $168\text{W}$  から  $866\text{W}$  (QCW 動作ピーク

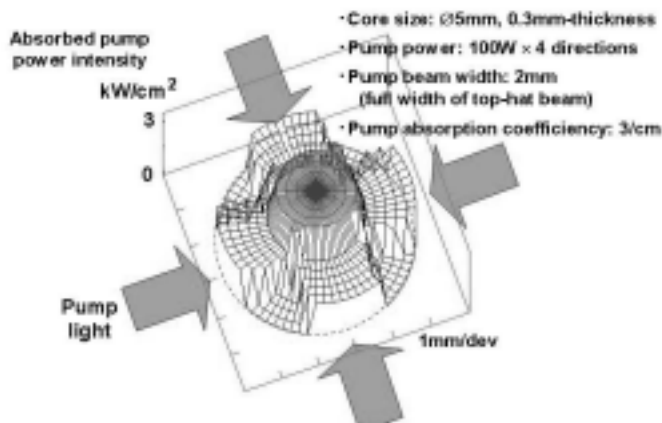


図 5-9 励起光吸収分布のシミュレーション

パワー、非発振状態) 時の蛍光分布を測定した結果である。蛍光強度は励起光の吸収分布を表しており、先ほどの計算結果から推定されたコア内部の励起光が重なる領域での均一な励起強度が測定結果からも示された。また励起光が高くなるほど励起が重なる四角の領域が広がっていく様子が観測されるが、これは LD の SA 方向の放射角が出力によって次第に大きくなり励起光の SA 方向の幅が広がることに起因する。

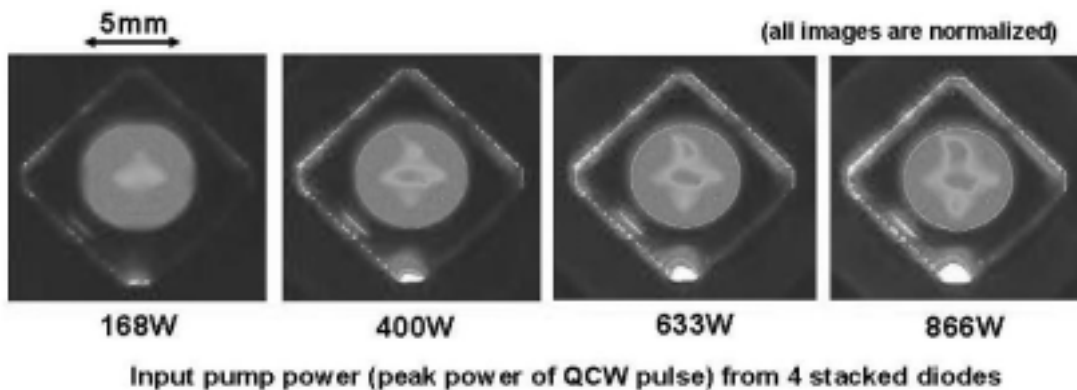


図 5-10 蛍光強度分布の励起強度依存性

#### 5.4 小型レーザヘッド (1kW 励起集光モジュール) の開発

レーザ装置の小型化、高効率化に向け LD からの励起光をファイバーを通さず直接 Yb:YAG マイクロチップのガイドに導入する方法を検討した。LD は一般に速軸 (FA) 方向のビーム品質は非常に高いためにスタック型の 2 次元アレイにしても細く絞ることが可能である。一方遅軸 (SA) 方向はビーム品質が低く絞れにくい。そこでビームが細く絞れる FA 方向をマイクロチップエッジ厚み方向、SA 方向をあまり絞れる必要のない径方向に絞ることにより効率よく励起光を導入することができる。実際に 6 段のスタック型 LD を用い、FA 方向の集光ビーム径 (全幅、 $1/e^2$ ) を測定した結果を図 5-11 にしめす。同図左は通常の焦点距離  $20\text{mm}$  の球面シリンドリカルレンズを 2 個用いた場合、同図右は  $f=7\text{mm}$  の 1 枚の非球面のシリンドリカルレンズを用いた場合である。球面レンズの場合には最大で

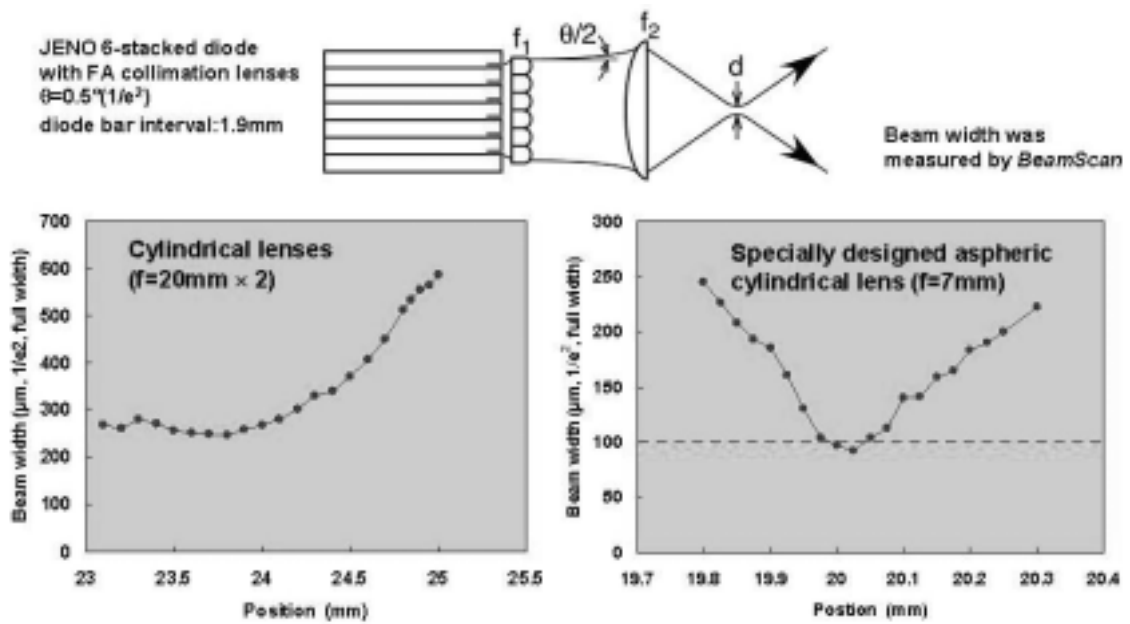


図 5-11 スタック型 LD の集光特性

250 $\mu\text{m}$  まで、非球面レンズを用いた場合には 100 $\mu\text{m}$  以下まで絞ることが出来ることが分かった。これより厚さとして 200 $\mu\text{m}$  以下のマイクロチップも高い入射効率で励起可能であることが分かった。また非球面レンズの集光性能の高さを再確認した。

図 5-12 は実際にマイクロチップを用いて励起光がどのぐらいの効率で入射するかを実測した結果である。コアのない 300 $\mu\text{m}$  厚アンドープ YAG のエッジウィンドウ (高さ 300 $\mu\text{m}$ 、幅 6mm) に SA 方向に  $f=30\text{mm}$  の球面シリンドリカルレンズ、FA 方向に  $f=7\text{mm}$  の非球面レンズを用いて集光し、相対するウィンドウから透過した励起光のエネルギーを測定した。ウィンドウには励起光に対する AR コートは行っていないためにフレネルロスが生じ、透過率は最大でも 82%に留まる。非球面レンズをチップの厚み方向 (Y 方向) に動かした結果、100 $\mu\text{m}$  以上の幅でほぼフレネルロスに相当する透過率が得られた。このことは励起光の FA 方向の集光ビーム径がチップの厚み 300 $\mu\text{m}$  より十分小さいことを表している。

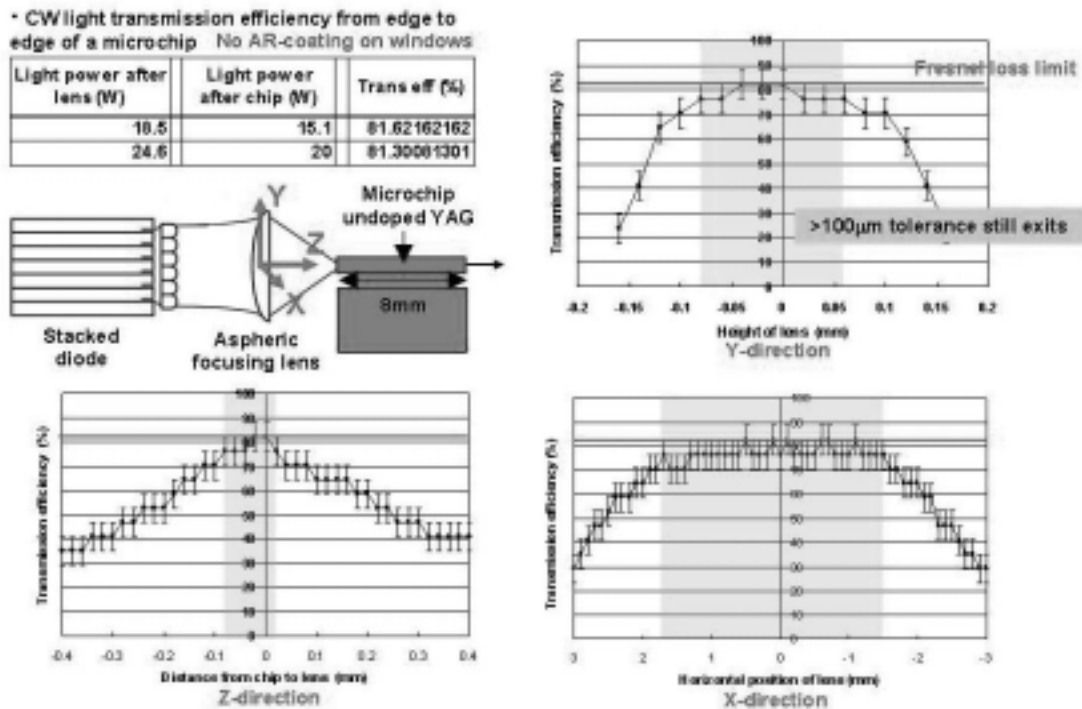


図 5-12 マイクロチップへの入射効率

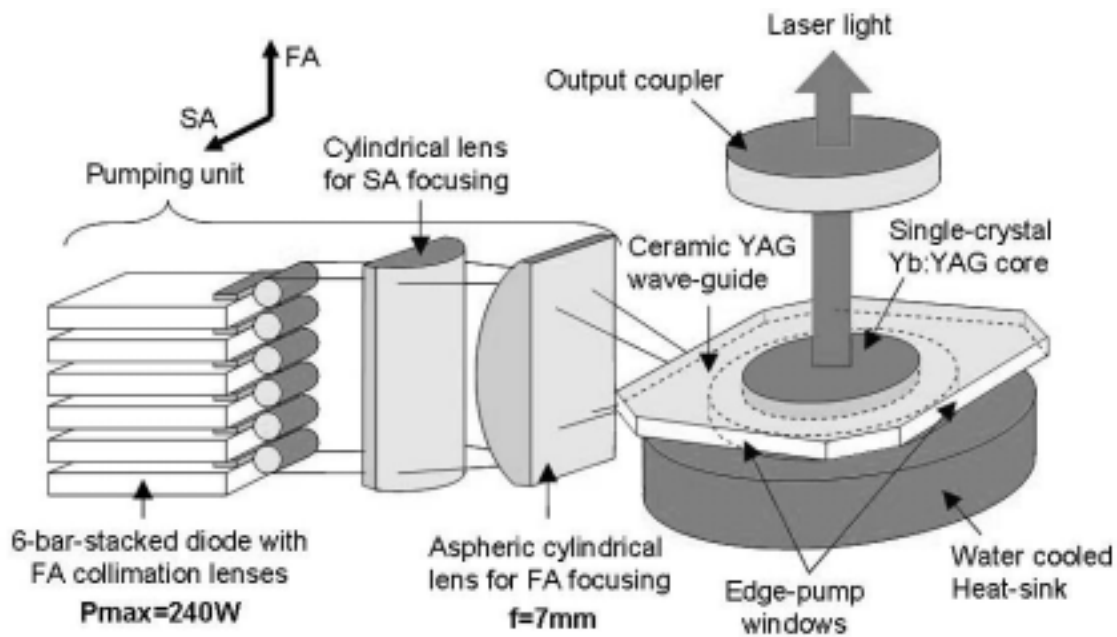


図 5-13 励起光学系

また 100 $\mu\text{m}$  のトレランスがあるということは先ほども集光ビーム径の測定結果から推測したようにチップの厚みが 200 $\mu\text{m}$  でも高い効率で励起できることが推測される。しかしながら励起光方向 (Z 方向) のトレランスが 100 $\mu\text{m}$  以下しかなく、アライメントには十分慎重に調整する必要がある。またウィンドウの幅方向 (X 方向) では 6mm のウィンドウに対して 3mm 以上の十分なトレランスがあることが分かる。逆に SA 方向のビーム径は 3mm 以下になっていることが分かる。また今回の実験結果よりピークでは理論上のフレネルロスに近い透過率が得られていることより、マイクロチップ内での励起光のロスはほとんどなく、すなわちヒートシンク側への光のしみ出しロスなどはなく、理論的な全反射で伝搬していることが証明された。さらに図 5-13 は実際に試作したプロトタイプレーザ装置に搭載した集光モジュール内の励起光学系を示す。

図 5-14 に製作したレーザヘッドの外観写真を示す。図 5-13 に示した励起集光光学系を 4 方向からは位置したレイアウトになっている。LD への冷却水はすべて塩ビ製の導水ブロックより下側から供給されヘッド内にホース等はない。ヒートシンク型 Yb:YAG マイクロチップデバイスでの冷却水も同様であるが、流量の調節のために LD とチップへの水路は完全に独立とした。A4 小の 19mm 角に収まっており非常にコンパクトになっている。

図 5-15 にレーザモジュールを内部に搭載した完成したプロトタイプ機の外形を示す。レーザ発振器の外形は幅 40cm、長さ 50cm、高さ 15cm である。ファイバーが接続可能でファ

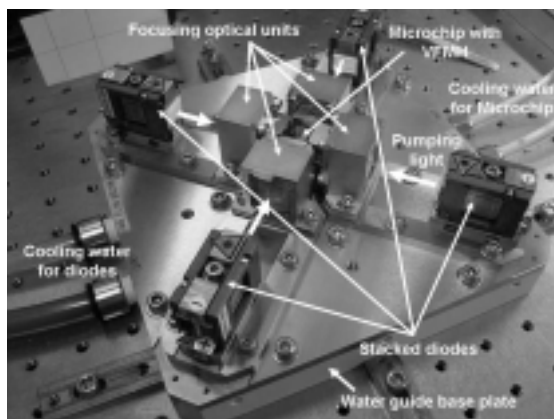


図 5-14 レーザヘッドの外観写真

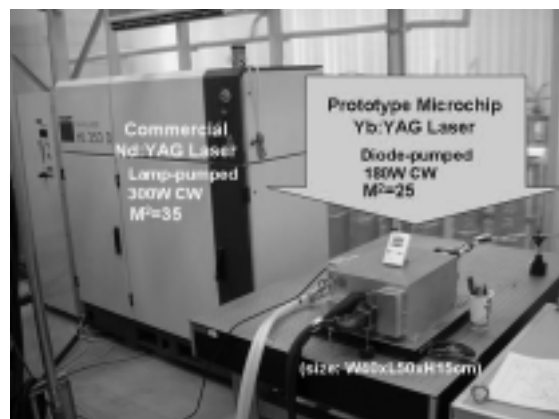


図 5-15 加工用プロトタイプ機

イバー出力端での最大出力は 180W CW、 $M^2$  (共振器出力) は 25 である。左奥に見えるのは市販の加工用レーザ装置で最大出力 300W、 $M^2$  (共振器出力) は 35 である。出力の差はあれ装置サイズの大きさの差は歴然としており、Yb:YAG による小型高輝度光源の優位性を確認できた。

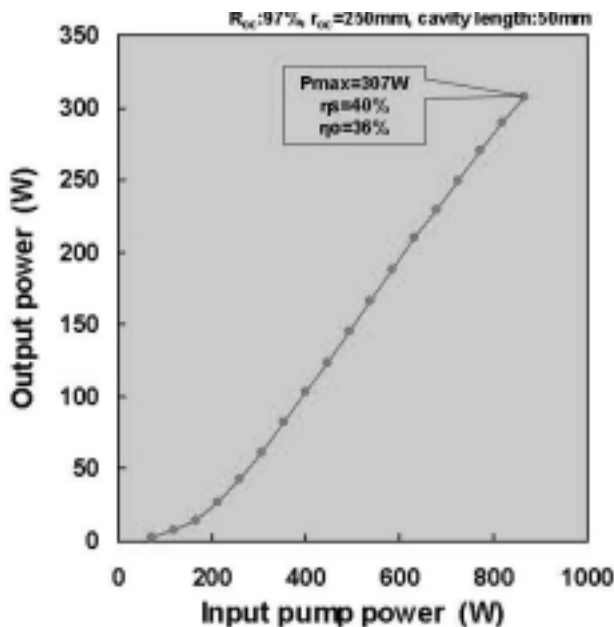


図 5-16 入出力特性

性能を向上することが出来ると考えられる。CW 100W で 15 分間の安定動作を確認した。

図 5-17 は凹面の出力ミラーを用いた直線型の共振器に於いて、ミラーの曲率を 0.25m から 1m まで、共振器長を 0.05m から 0.5m まで変化させてレーザ光の入出力特性やビーム品質がどのように変化するか測定した結果である。同じ曲率であれば共振器長が長くなるほど、また曲率が大きくなればなるほどビーム品質は大幅に改善され小さくなる様子が分かる。これに対し入出力特性の変化は小さいが、ビーム品質の向上と共に少しずつ出力も低下し、ビーム品質 30 程度が得られている曲率 1m、共振器長 0.5m では最大出力が 20% 程度低下した。またビーム品質の入力に対する変化も通常のロッド型レーザに比べ全く異なっており、ロッド型では熱レンズの関係でピークを有するが、マイクロチップレーザでは入力と共に単調に上昇の様子が分かる。この上昇はビーム品質の改善と共に小さくなる傾向がある。熱レンズの小さいマイクロチップレーザにおいて、入力と共にビーム品質が劣化する原因としては、

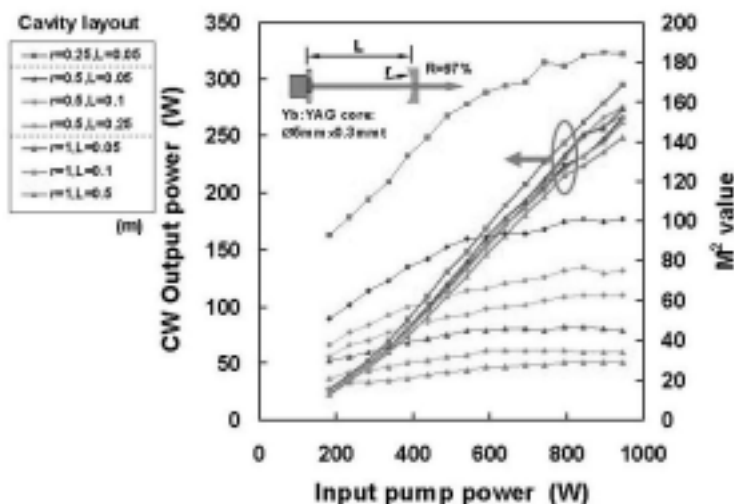


図 5-17 直線型共振器構成とビーム出力・品質

### 5.5 レーザ発振特性

図 5-16 にレーザ発振出力特性を示す。まず、透過率 97%、曲率 25cm の出力結合鏡を共振器長 50mm で配置することにより、CW 動作にて最大出力 340W を励起パワー 980W 時に得た。入射光に対するスロープ効率は 40%、光光変換効率は 36%であった。次に、準 CW (QCW) 動作にてその特性を評価した。繰り返し 10Hz、デューティ 10% 動作時に、最大出力 380W、スロープ効率は 50%、光光変換効率 44% を室温で得ることに成功した。QCW 動作においては温度上昇が抑えられるためにレーザ性能が向上する。したがってチップの厚みを今後 200 $\mu$ m 以下に薄くすることで CW 動作でのレーザ性能を向上することが出来る。

この上昇はビーム品質の改善と共に小さくなる傾向がある。熱レンズの小さいマイクロチップレーザにおいて、入力と共にビーム品質が劣化する原因としては、Fig.28 に示したようにコア内部の励起プロファイルが入力と共に少しずつ広がるためと推定される。また励起を上げるとチップが反るために反りによる影響も考えられる。Fig.45 は曲率 1m、共振器長 0.5m のときのレーザビームの強度プロファイルを CCD カメラで

測定した結果である。フラットトップの形状が得られている。

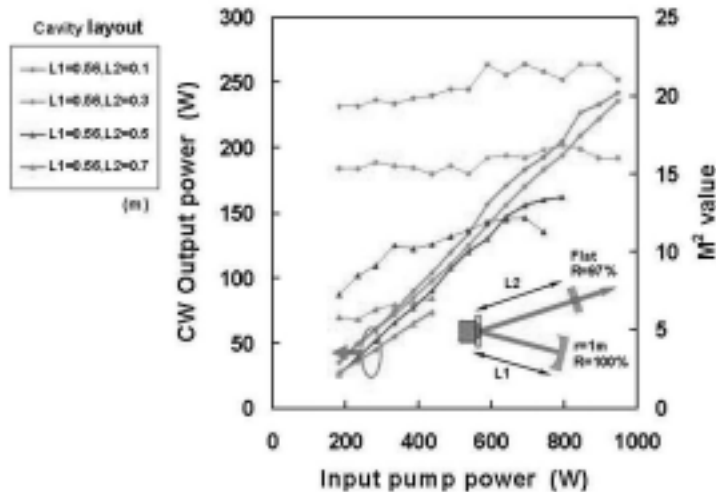


図 5-18 V字型共振器構成とビーム出力・品質

り、ビーム品質は改善され、同時に出力も少し低下しているが、200W を超える出力まで  $M_2=17$  が得られている。しかしながらさらに  $TEM_{00}$  発振モード径が大きくなる構成をとると発振開始直後はさらに改善されたビーム品質で動作するものの途中で出力が飽和してしまう現象が観測された。熱レンズ効果が小さいにもかかわらず出力が飽和する原因については、後述するようにチップの反りによって実効的なレンズ効果が生じ、レーザ発振が不安定になっている可能性もあるので、実際にチップの熱的な特性を測定した。

図 5-19 は発振しているマイクロチップに別の方向から Nd:YAG レーザの  $1\ \mu\text{m}$  の平面波光を当ててその反射光をシャックハルトマンセンサー (CLAS2D) で波面形状を計測し、実効的な熱レンズ量を測定した結果である。チップは励起する以前から既に曲率半径 2.5m 程度の凸面に湾曲しており、励起と共に反って凸がきつくなり、最大励起付近では曲率が 1m 近傍にまでなる。これはチップの冷やされていない AR 面では温度が 200 付近まで上昇するのに対し他方の HR 面側ではヒートシンクへの放熱により 40 に押さえられているために、熱膨張によって反るものと考えられる。しかし励起しなくても反っている点は製作上の問題であり、今後、ダイボンド時の温度プロセスかヒートシンク、ハンダ材料選択の検討を行う必要がある。波面測定の結果、マイクロチップがヒートシンクに一体化した

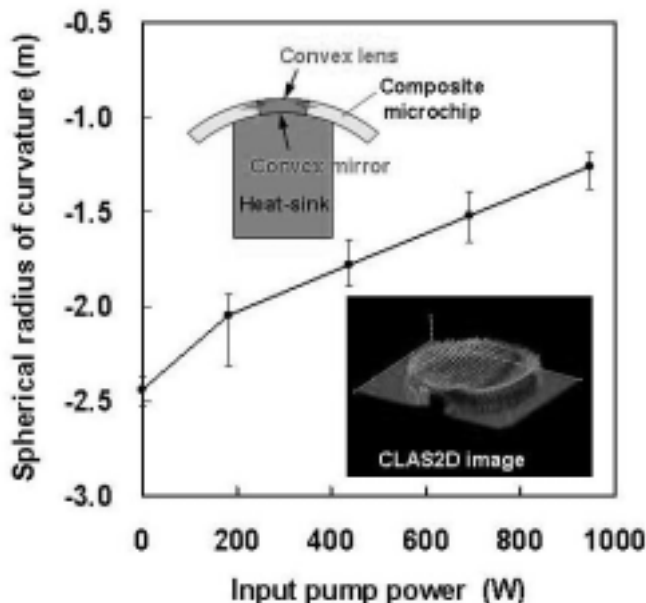


図 5-19 マイクロチップの波面歪み測定

図 5-18 はさらにビーム品質を改善するために共振器をマイクロチップで共振器を折り返す V 字型にし、 $TEM_{00}$  発振モード径をさらに広げるような構成にした結果である。全反射のエンドミラーの曲率は 1m とし出力ミラーはフラットとした。図のようにチップと凹面のエンドミラーまでの距離は 0.56m で一定とし、出力ミラーまでの距離を広げていくとチップでの  $TRM_{00}$  モードが広がる

状態において約-2.5m の曲率半径の凹面レンズと等価になって反っていることが分かった。励起を最大の 1kW まで上げると非冷却面の結晶の昇温膨張によって曲率半径-1.5m まで反りが大きくなった。そこでこの結果を基にレーザ結晶内では大きな発振モード、非線形光学結晶内では小さな発振モードになるように共振器を設計、所望の  $M^2 < 1.2$  の  $TEM_{00}$  モード発振を確認したが、出力は最大で 3W と激減した。

## 5.6 高安定化とトラブルに対する対策のマニュアル化

新しいダイボンド装置で製作したYb:YAGマイクロチップをレーザ光源に用いて、CW動作で340Wの出力を得ることが出来た。また100W出力、マルチ横モードに於いて15分間の安定動作を確認したが、その後励起光学系からの脱ガスにより集光レンズに曇りが発生した。そこで集光レンズホルダーの温度上昇と脱ガス対策として、レンズホルダーを水冷するためのジグを新たに製作した。その結果脱ガスを防止することが出来た。

またマイクロチップ結晶内でガイドのエッジで折り返されるパスの寄生発振が確認され、レーザエネルギーが一部損失していることが分かった。寄生発振を抑えるためにガイドのエッジ部分の加工を行い出力の向上を確認した。しかし寄生発振を完全に抑制するためには今後、ガイドの領域を大きくするなどコンポジットマイクロチップ結晶の根本的な設計変更が必要である。

また実証機に搭載したマイクロチップレーザからの出力が、コア研実験室で得られた300Wより大きく低下した原因について究明した。その結果、チップ前面のARコートにダメージがありレーザ光が損失していることが原因であると判明した。前面のコートのダメージはコーティングメカにて励起エッジにARコートを行う際にチップを抑えるための治具で傷が付いたものと推定される。そこでマイクロチップへのコーティングの製作手順として前面のコートをエッジのコートより後にするように仕様書(マニュアル)を変更した。また高輝度動作のためのV字型共振で $M^2 < 17$ で200W以上の出力を確認した。しかし $M^2 < 10$ では80Wでレーザ出力が飽和した。原因としては結晶の反りにより高次回折損失の可能性があり、さらに詳細に調べる必要がある。

## 6. 今後(フェーズ)の計画

コンポジット構造のYb:YAGマイクロチップ結晶およびヒートシンクの製作、ダイボンド装置およびダイボンド技術に関しては、平成16年度の経済産業省のコンソーシアム事業の認定を受け、福井県内の(株)ケイ・エス・ティー・ワールドに技術移管を完了し、現在製品化に向けた技術開発を進めている。今後は結晶やダイボンドの品質や歩留まり、コストなどが重要な開発課題となる。

またエッジ励起マイクロチップレーザの技術開発に関しては、フェーズの第一のステップとしてCW型Yb:YAGレーザの実用化のために、目標として発振波長 $1.03\mu\text{m}$ 、CW出力200W以上、 $M^2:3$ 以下を目指す。発振波長 $1.03\mu\text{m}$ およびCW出力200W以上は既に実証済みであり、残る目標は $M^2$ が3以下である。現状では $M^2$ は17程度と大きい。 $M^2$ を下げ輝度を上げるには基本的にコア内における $\text{TEM}_{00}$ モードをコア径と同じかそれ以上に広げるような共振器構成を取るか、逆に同じ共振器構成でもコア径を小さくすることで達成可能である。共振器構成による方法は既に実験済みだが $\text{TEM}_{00}$ 発振モード径を広げた構成では出力の飽和が観測されている。この原因としては発熱によるチップの反りによって共振器内に補正できない高次の波面歪みや収差が生じ損失が生じている可能性があり、Au-Sn接合条件(温度、時間)の再検討やヒートシンク材料の再検討、さらに低温癒着ハンダ材料の検討も必要である。またチップの厚みを薄くすることによる効果や非冷却面を少しでも冷却するような構造的な工夫も効果的かつ重要であり、これらの総合的な改善試作によりフェーズの目標に到達できると考えられる。またコアを小さくすることも輝度を上げるには非常に効果的だが発熱が狭い領域に集中するために信頼性の確認が重要である。さらに寄生発振によるエネルギーの損失も確認されているので、寄生発振を完全に防止したガイド構造(特許出願済み)を試作し効果を検証する必要がある。これらの技術は逐次



(株) ケイ・エス・ティー・ワールドにフィードバックし製品の品質向上に繋げていく必要がある。

さらにその後は Yb:YAG の特長を生かして CW 型で完成されたエッジ励起マイクロチップレーザの技術を高出力の超短パルスレーザあるいは増幅器に適用し、既存の固体レーザやファイバーレーザと差別化を図ってゆく予定である。

## 7 . 特記事項

ヒートシンク一体型 Yb:YAG マイクロチップデバイスは経済産業省のコンソーシアム事業の認定を受け福井県内の企業にて開発中。

## 8 . 参考文献

- 1) T. Y. Fan: "Optimizing the Efficiency and Stored Energy in Quasi-Three-Level Lasers", IEEE J. Quantum Electron. 28 (1992) 2692.
- 2) Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower: "Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers", Appl. Phys. B 58 (1994) 365.
- 3) Stewen, K. Contag, M. Larionov, A. Giesen, and H. Hugel: "A 1-kW CW Thin Disc Laser", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 6 (2000) 650.
- 4) L.E.Zapata, R.J.Beach, and S.A.Payne: "High power Yb:YAG/YAG composite thin-disk laser", in Conference on Lasers and Electro-Optics, paper, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D.C., 2001) paper CWF3.
- 5) S. Yamamoto, T. Yanagisawa, and Y. Hirano: "High-average-power side-pumped Yb:YAG thin disk lasers", in Advanced Solid-State Photonics, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D.C., 2004) paper WA1.
- 6) J. Lu, J. Lu, T. Mukai, K. Takaichi, T. Uematsu, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, Y. Akiyama, and A. A. Kaminskii: "Development of Nd:YAG ceramic lasers", in Advanced Solid-State Lasers, Martin E. Fermann and Larry R. Marshall, eds. Trends in Optics and Photonics Series 68 (Optical Society of America, Washington, D.C., 2002) 507.