

モード同期 Yb:CaF₂ 単結晶 thin-disk レーザーの研究

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 基盤理工学専攻 白川晃研究室 鈴木 優哉

1. はじめに

1960年にメイマンがルビーレーザーの開発に成功してから現在に至るまで、分光応用、計測、ホログラフィー、加工、核融合研究といった多岐にわたる分野のためにレーザーの研究及び実用化がなされてきた。現在、非熱微細加工、高次高調波発生等の応用のために高出力超短パルスレーザーの研究は盛んに行われている。超短パルス生成のためには、共振器内部の縦モードの位相間隔を揃えるモード同期と呼ばれる手法を用いる必要がある。外部からの変調を音響光学素子(AOM)や電気光学素子(EOM)によりモード同期を行う能動モード同期や半導体可飽和吸収鏡(SESAM)やカー効果による非線形現象を用いて受動的にモード同期を行う受動モード同期がある。変調素子の応答速度の観点から能動モード同期では ps スケール、SESAM を用いた受動モード同期では数十~数百 fs、カーレンズモード同期においては数 fs~数百 fs 程度のパルス幅がこれまでに報告されている。

高出力超短パルスレーザーのパワースケーリング限界は、主に熱歪や光学的なダメージなどで決定される。これを解決するための手法の一つに thin-disk レーザーがある。thin-disk レーザーのコンセプトは利得媒質を薄くし、背面から利得媒質を冷却することで、排熱効率を上げることである [1]。排熱効率向上に伴いバルク材料では行うことのできないパワーレベルまでパワースケーリングが可能となる。これにより、熱レンズ効果を低減することができる。また利得媒質が薄いために非線形光学効果が小さい利点がある。

2000年にパルス幅 730fs、平均出力 16W の世界で最初のモード同期 thin-disk レーザーが報告された [2]。その後高出力化のため様々なレーザーが開発されてきた。私たちの研究室においても Yb:LuAG セラミックで平均出力 16W、パルス幅 161 fs、Yb:Lu₂O₃ セラミックで平均出力 3.7W、パルス幅 98 fs が達成されている [3]。

本研究で生成を期待する数十 fs の超短パルスレーザーはこれまで半導体可飽和吸収鏡(SESAM)を用いた Yb:CALGO で平均出力 5.1W、パルス幅 62fs が報告されている [4]。一方で、ほぼ同じ蛍光帯域幅を有する Yb:CaF₂ 単結晶を用いた thin-disk レーザーの報告はわずか 2 件 [5] [6] であり、短パルス化かつ高出力化が期待できるカーレンズモード同期 (KLM) を用いた thin-disk レーザーはまだ報告されていない。

そこで本研究は Yb:CaF₂ 単結晶 thin-disk レーザーの高出力化及び KLM での超短パルス発生を目標とした。

2. Yb:CaF₂ 単結晶 thin-disk レーザー

2.1 Yb:CaF₂ 単結晶ディスク

Yb:CaF₂ 単結晶は、蛍光帯域幅の広さと高い熱伝導率から高出力、超短パルス動作に適した材料である。吸収・蛍光スペクトルを図 1 に示す。

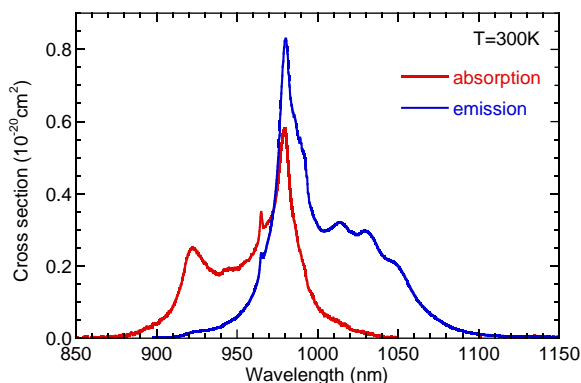


図 1 Yb:CaF₂ 単結晶の吸収・蛍光スペクトル

図 1 に示す通り Yb:CaF₂ 単結晶の蛍光帯域幅は約 70nm と広く超短パルス生成に向いている利得媒質である。このようにアクティブイオンの蛍光帯域幅が広がっている原因は、Yb:CaF₂ 単結晶のクラスター構造に関係しているといわれている。Yb:CaF₂ 単結晶のクラスター構造を図 2 に示す。

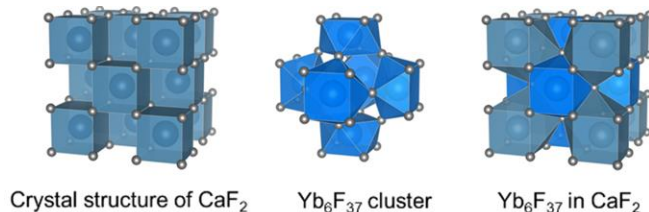


図 2 Yb hexameric クラスター

母岩の CaF₂ は Ca²⁺ と F⁻ からなるイオン結晶である。ここにアクティブイオンとして Yb³⁺ を添加すると、電荷補償の関係から特殊な 6 量体のクラスター構造を生じることが知られている [7]。尚、これは Yb³⁺ の添加濃度によって変化することが知られている [8]。このクラスター構造は複雑な結晶場を形成するため Yb³⁺ は外部の複雑な結晶場の影響によって個々の Yb³⁺ で異なるシュタルク分裂が生じる。結果として、個々の Yb³⁺ が異なるエネルギー準位を生じることにより蛍光スペクトルが広帯域化する。

一般に固体レーザー材料は結晶構造の歪みにより、アクティブイオンの添加濃度を高めると、熱伝導率が低下する。Yb:CaF₂ 単結晶の Yb 添加濃度と熱伝導率を表 1 に示す。

表 1 Yb:CaF₂の熱伝導率 [9]

Yb 添加濃度 / %	熱伝導率 / Wm ⁻¹ K ⁻¹
0	11.3
0.88	9.8
2.88	4.4

この熱伝導率の低下は、クラスター構造によって結晶場中のフォノンの平均自由行程が低下するためであると考えられている。

次に Yb: CaF₂ 単結晶ディスクについて説明する。

Yb: CaF₂ 単結晶ディスクは図 3 に示す構造である。

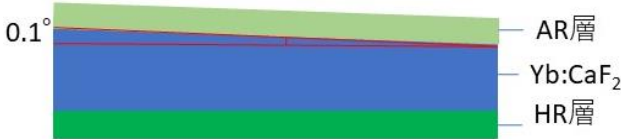


図 3 Yb: CaF₂ 単結晶ディスク

Yb: CaF₂ 単結晶ディスクの研磨とコーティングはオカモトオプティクスにて行われた。吸収効率から厚さ 300μm のディスクを作成した。研磨後の Yb: CaF₂ 単結晶は、AR コーティングと HR コーティングが施している。コーティングの仕様は AR 層で透過率 960-1010 nm > 98% および 1010-1100 nm > 99.9% である。また裏面の HR コーティングには反射率 960-1010 < 98% 及び 1010-1060 nm < 99.7% となっている。このとき、励起光は入射角が 30~40 度、レーザーモードは 0~10 度で 仮定されて設計が施されている。

2.2 熱解析

Yb: CaF₂ ディスクの熱抵抗を表 2 に示し、図 4 に用いた熱解析モデルを示す。

表 2 ディスク各層の熱抵抗

層	熱抵抗 / mm ² KW ⁻¹
利得媒質層(Yb:CaF ₂)	68.2
HR 層	3.75
接着層	11.9
ヒートシンク層(Cu)	2.51

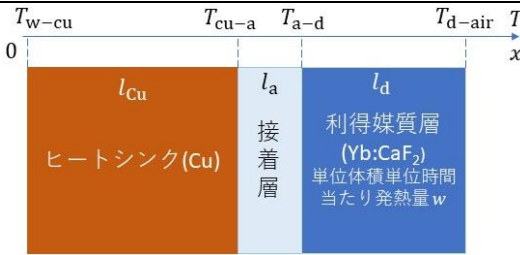


図 4 簡略化したディスクモジュール

本研究で用いた Yb: CaF₂ ディスクの場合、熱通過は熱抵抗の値から利得媒質層において律速となるため、ディスクの AR 層と HR 層を無視してディスクを利得媒質層のみと捉え、接着層、ヒートシンク層の 3 層を連続させたディスクの厚み方向のみの一次元構造として解析を行った(図 4)。

このとき厚み方向の一次元温度分布 $T(x)$ は、(1) で与えられる。

$$T(x) = \begin{cases} \frac{T_{Cu-a} - T_{w-Cu}}{l_{Cu}} x + T_{w-Cu} & (0 \leq x \leq l_{Cu}) \\ \frac{T_{a-d} - T_{Cu-a}}{l_a} (x - l_{Cu}) + T_{Cu-a} & (l_{Cu} \leq x \leq l_{Cu} + l_a) \\ -\frac{w}{2K_d} [x - (l_{Cu} + l_a)]^2 + \left[\frac{w}{2K_d} l_d + \frac{T_{d-air} - T_{a-d}}{l_d} \right] [x - (l_{Cu} + l_a)] + T_{a-d} & (l_{Cu} + l_a \leq x \leq l_{Cu} + l_a + l_d) \end{cases} \quad (1)$$

尚、各境界層の温度 (T_{w-Cu} 、 T_{Cu-a} 、 T_{a-d} 、 T_{d-air}) は (2) で与えられる。

$$T_{a-d} = \frac{\frac{wl_d}{2} \left(1 + \frac{K_d}{l_d h + K_d} \right) + \frac{K_d h}{l_d h + K_d} T_{air} + \frac{K_a K_{Cu}}{l_a l_{Cu}} T_{water}}{\frac{K_a}{l_a} + \frac{K_d}{l_d} - \frac{\left(\frac{K_a}{l_a} \right)^2}{\frac{K_{Cu}}{l_{Cu}} + \frac{K_a}{l_a}} - \frac{K_d^2}{l_d (l_d h + K_d)}}$$

$$T_{w-Cu} = T_{water} \quad (2)$$

$$T_{d-air} = \frac{\frac{wl_d}{2h} + \frac{K_d}{l_d h} T_{a-d} + T_{air}}{1 + \frac{K_d}{l_d h}}$$

$$T_{Cu-a} = T_{water} + \frac{\frac{K_a}{l_a}}{\frac{K_{Cu}}{l_{Cu}} + \frac{K_a}{l_a}} (T_{a-d} - T_{water})$$

尚、この理論は境界条件を変えて考えることが可能である。更に、熱伝導層に発熱項を含む形にして計算することや層構造を増やし計算することも可能であり、扱いやすい理論となっている。

レーザー動作中の発熱量 w は量子効率 η_Q 、ストークス効率 η_s 、励起光の吸収パワー P_{abs} 、ディスクの励起部分の体積 V 、励起パワー P_p 、励起光のパス数 n 、励起中心波長における吸収係数 α_c 、励起半径 r_p とすると (3) で与えられる。

$$w = \frac{(1 - \eta_Q \eta_s) P_p [1 - \exp(-n \alpha_c l_d)]}{\pi r_p^2 l_d} \quad (3)$$

レーザー動作中の発熱量は励起光からレーザー光への波長変換による発熱が支配的であり、レーザー発振中の発熱量を試算する際には、レーザー発振中の発熱のみを考えることが多い [10] [11]。

ここで今回用いたディスク (Yb:CaF₂) において励起パワーと単位体積当たりの発熱量を図 5 に図示する。

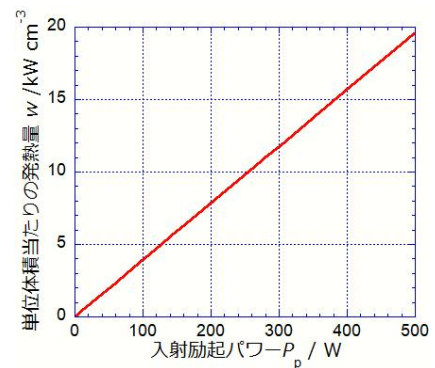


図 5 発熱量-励起パワー特性

ここで用いたパラメータは表 3 にまとめている。

パラメータ	値
量子効率 η_Q	1
励起波長 λ_p	976 nm
レーザー波長 λ_l	1030 nm
ストークス効率 η_s	0.948
励起光のパス数 n	24
吸収係数 $\alpha_c(976\text{nm})$	3.77 cm^{-1}
ディスクの厚み l_d	$300 \mu\text{m}$
励起半径 r_p	1.15 mm

ここで発熱量を変化させたときの 3 層連続した層構造(図 5)の温度分布を図 6 に図示する。ここで用いる基本的なパラメータと値は表 4 にまとめている。

パラメータ	値
ヒートシンクの熱伝導率 K_{Cu}	398 W/mK
ヒートシンクの厚み l_{Cu}	$1000 \mu\text{m}$
接着層の熱伝導率 K_a	0.21 W/mK
接着層の厚み l_a	$2.5 \mu\text{m}$
ディスクの熱伝導率 K_d [9]	4.4 W/mK
ディスクの厚み l_d	$300 \mu\text{m}$
冷却水の温度 T_{water}	$20 \text{ }^\circ\text{C}$
実験室内の雰囲気温度 T_{air}	$20 \text{ }^\circ\text{C}$
熱伝達率 h	$5 \text{ W/m}^2\text{K}$

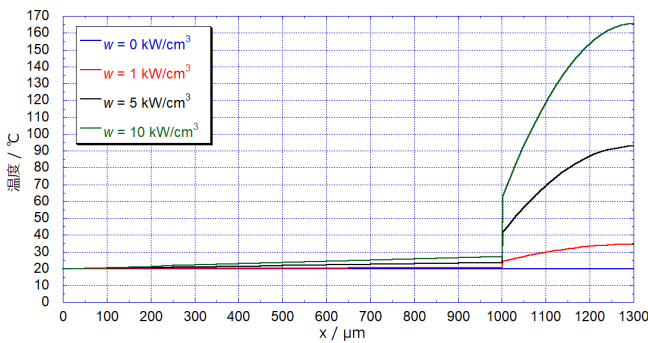


図 6 ヒートシンク～ディスクの温度分布

図 6 の横軸は(1)に示した通りであり、 $0 \leq x \leq l_{Cu}$ がヒートシンク層、 $l_{Cu} \leq x \leq l_{Cu} + l_a$ が接着層、 $l_{Cu} + l_a \leq x \leq l_{Cu} + l_a + l_d$ がディスク層である。現実のレーザー動作環境でも、ヒートシンク側は水冷され、ディスク側は空気との自然対流熱伝達が生じている。このとき、熱流束は圧倒的にヒートシンク(冷却水)側へ流れやすい。これはヒートシンク側の境界条件を水の強制対流熱伝達とすると熱伝達率が $10^3 \sim 10^4$ であるのに対して、空気の自然対流熱伝

達の熱伝達率は $10^0 \sim 10^1$ 程度である。そのためディスクから実験室中の空気への熱伝達は無視できる程度になっている。ゆえに現在の実験環境のモデルでは、ディスク側の境界条件は断熱条件としても差し支えないこともわかる。これは(3.26)を簡略化($h = 0 \text{ W/m}^2\text{K}$)とすることができ、物理的にわかりやすいモデルとすることが可能である。

ディスクモジュールの冷却効率を高めるためには、冷却を律速している層の熱抵抗を低減する必要がある。現在、表 2 からわかるように冷却はディスク層によって律速されている。そのため、ディスクの最適化が必要である。ディスク層は Yb 添加濃度を高め、ディスク厚を薄くすることで熱抵抗を小さくすることができる。但し、Yb 添加濃度を増加させると熱伝導率は低下する。ゆえに熱的な最適値が存在する可能性も視野に入れ最適化を検討した。

線形吸収かつ吸収効率一定の条件下でディスクの厚さを表し、熱伝導率を Gaume のモデル [12] を用いて熱抵抗を求めると、Yb 添加濃度 X 、CaF₂単結晶の熱伝導率 $K_{d, \text{non doped}}$ 、物質固有の定数 β を用いると(4)となる。

$$R_d(X) \equiv \frac{l_d}{K_d} = \frac{Z}{\sqrt{X} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{K_{d, \text{non doped}} X}}{\beta} \right)} \quad (4)$$

但し、 Z は(5)で定義されており、吸収効率 η_a 、吸収断面積 σ_a 、Yb:CaF₂の原子数密度 $N_{Yb:CaF_2}$ である。

$$Z \equiv \frac{-\ln[1 - \eta_a]}{n \sigma_a N_{Yb:CaF_2} \beta \sqrt{K_{d, \text{non doped}}}} \quad (5)$$

(4)を Yb 添加濃度で微分すると、 $0 < X < 1$ の範囲において $dR_d(X)/dX < 0$ となる。これは Yb 添加濃度を高めると、常に熱抵抗は小さくなる方向に変化することを示し、熱抵抗の最適値は $X \sim 1$ のときとなる。ここで Yb 添加濃度依存性を図 7 に示し、用いたパラメータを表 5 にまとめた。

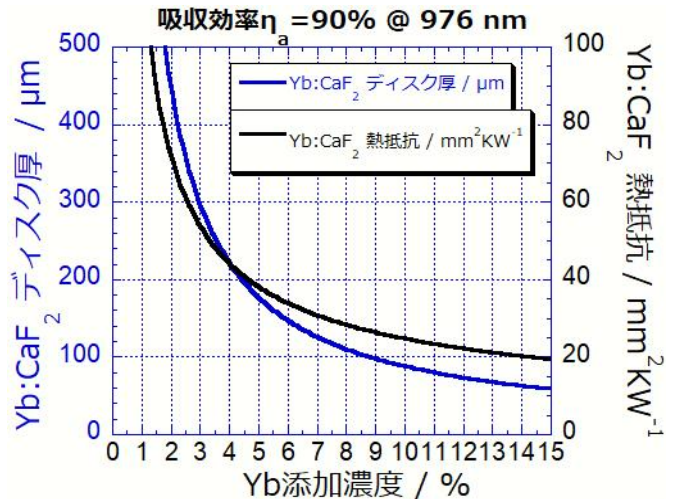


図 7 ディスク厚と熱抵抗の Yb 添加濃度依存性

表 5 Yb 添加濃度依存性の使用パラメータ

パラメータ	値
パス数 n	24
吸収効率 η_a	0.9
吸収断面積 σ_a	$0.45068 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
Yb:CaF ₂ の原子数密度	$2.4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
β [12]	$0.28 \sqrt{\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}}$
CaF ₂ の熱伝導率 [12]	$9.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

図 7 から Yb 添加濃度を増やせば増やすだけ熱抵抗を小さくすることができる。Yb 添加濃度増加に伴いディスク厚も指数関数的に減少している。但し、Yb:CaF₂単結晶のへき開性のため、現在の研磨技術では 100 μm 以下の研磨は難しく Yb 添加濃度は 8%程度が限界と考えられる。またディスク厚が薄くなることで接合難易度が増すことや高濃度添加に伴う濃度消光にも留意が必要である。

ここで、(2)を用いて熱抵抗減少に伴うディスクモジュールの接着層と利得媒質層の最大温度を図 8 に示す。ここで励起強度は 10 kW/cm²、ディスクの熱伝導率と厚さ以外のパラメータは表 4 の値を用いている。

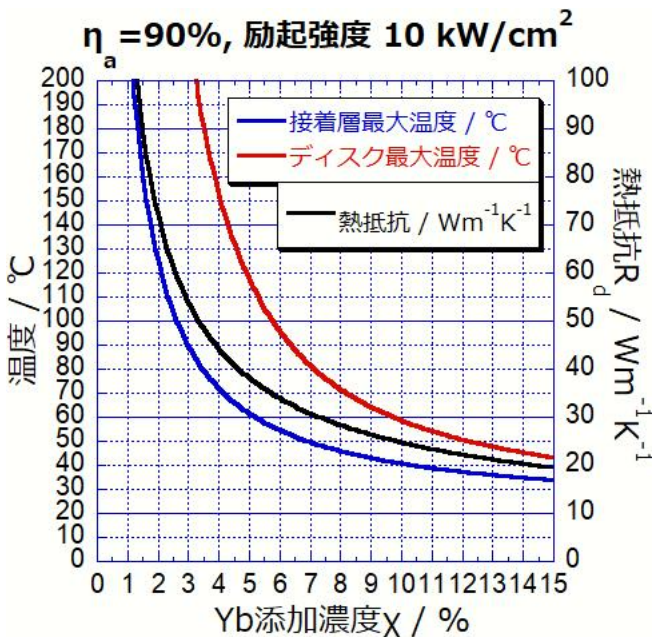


図 8 各層の最大温度 Yb 添加濃度依存性

図 8 からわかるように利得媒質層の熱抵抗を小さくすることでディスクモジュールの温度上昇を大幅に低減することができる。これにより熱レンズ効果の低減、Yb:CaF₂単結晶においてもマルチモード CW 発振において 100W を超える高出力動作が可能となるはずである。

2.3 ディスクの接合

ディスクの接合は thin-disk レーザーの中でも極めて重要な工程である。UV 硬化樹脂を用いた場合、ディスクの接合に必要な接着剤量は硬化前 UV 硬化樹脂体積 $V_{\text{non cured}}$ 、硬化後 UV 硬化樹脂体積 V_{cured} 、UV 硬化樹脂の効果収縮率 y 、ディスク半径 r 、ヒートシンクの算術平均粗さ $R_{a-\text{heat sink}}$ 、ディスクの HR 面の算術平均粗さ $R_{a-\text{disk}}$ 、接着層の厚み l_a とすると (6) で表される

$$V_{\text{non cured}} = \left(1 + \frac{y}{100}\right) [\pi r^2 \times (R_{a-\text{heat sink}} + l_a + R_{a-\text{disk}})] \quad (6)$$

接着剤量はヒートシンクとディスクの粗さの残った部分と単純な円柱形の接着層の部分の和によって計算される。尚、 $R_{a-\text{heat sink}} + l_a + R_{a-\text{disk}}$ は接着層の正味の厚さとして考えられ、実際の接着層の厚さはこの値を用いて評価をしている。そのため、ヒートシンクとディスクの算術平均粗さは重要となる。図 9 に硬化前の UV 硬化樹脂量と接着層の厚みと熱抵抗の関係を示す。

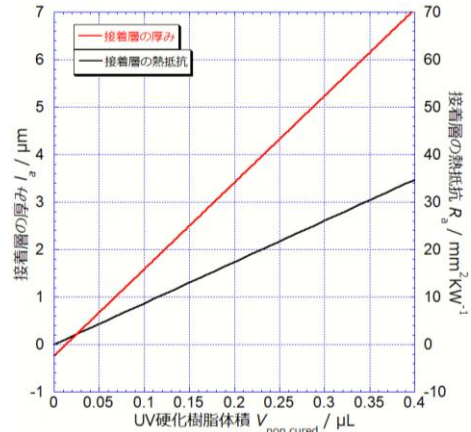


図 9 厚み・熱抵抗硬化前 UV 硬化樹脂体積依存性

ここで重要なことは、接着層の厚みは出来る限り小さくすべきことである。但し、接合を行った際に接着剤の量が少なすぎるとかえって接触熱抵抗や面形状の悪化を招く。そのため本研究では実験的に接着剤量を最適化しながら接合を行った。

私たちの研究室では thin-disk レーザーの接合方法について検討及び研究が行われてきた [13] [14] [3] [15]。それを踏まえ本研究では、UV 硬化接着剤を使用した。次の表 6 に実際に使用した UV 硬化接着剤のパラメータを示す。

表 6 接合に使用した UV 硬化接着剤の特性

評価パラメータ	UT20V
低粘性	8 ± 3 cps
小さい硬化収縮率	9~10
熱伝導率	0.21 W/mK
適切な熱膨張係数	$8.5 \times 10^{-5} / \text{K}$
高いガラス転移温度	112 °C
高い透過率	98.7~100%

次に実際の接合方法を示す。まずディスクの接合装置を図 10 に示す。

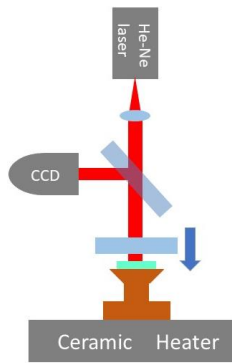


図 10 ディスク接合装置

接合装置はディスクを加熱するヒーターとフィゾー干渉計から構成される。フィゾー干渉計の基準面は $\lambda/20$ の光学基盤を使用した。マイクロピペットを用いて、UV 硬化接着剤を 0.14 μL ヒートシンク上に滴下し、ディスクを乗せた。UV 硬化樹脂がディスク全面に均一に広がることを確認した場合、その時点で一度 HR 面形状の測定を行った。面形状測定は図 11 に示すマイケルソン干渉計を用いて行った。

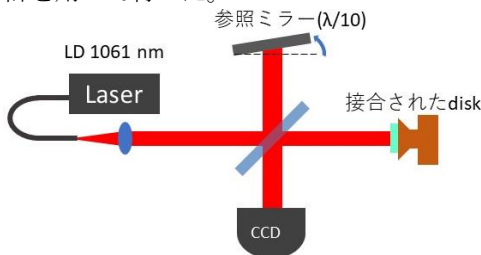


図 11 マイケルソン干渉計による面形状測定系

接合前の波面が良好な場合、顕微鏡を用いて気泡有無の確認をした。次にレーザー発振中の応力を低減するために、ディスクを 60 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱し UV 光を 10 分程度照射することでディスクを接合した。このときフィゾー干渉計を用いて、UV 光照射中に干渉縞が大きく変化しないことを確認した。

図 12 は左側の 4 枚が接合前の過程、右側の 4 枚が接合後の過程である。(a) が取得した干渉縞、(b) がフーリエ変換後の折り畳み位相、(c) が折り畳み位相を展開した後の位相、(d) がフィッティング後の光路差である。ディスク 3 は良好な接合状態が得られた。この時、接合後のディスクの HR 面の曲率半径は 4m の凹面形状であった。

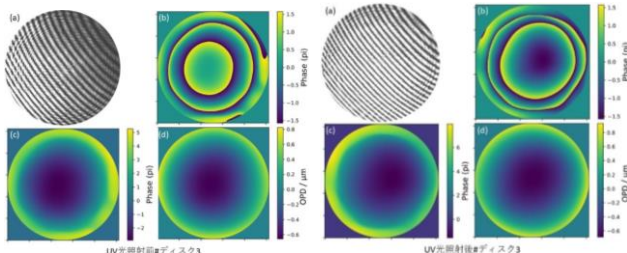


図 12 接合前後の HR 面形状#ディスク 3

2.4 マルチモード CW レーザー発振

接合品質の良かったディスク 3 を用いて図 13 に示す I 型キャビティを用いて CW 発振実験を行った。

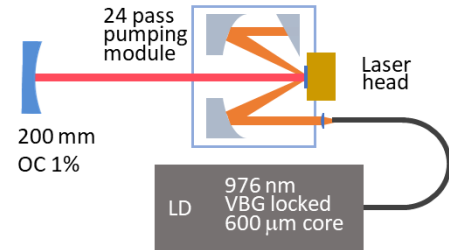


図 13 マルチモード CW 発振実験系

ヒートシンクに接合されたディスクを 24 パスの励起モジュールに設置した。励起には VBG ロックされた波長 976nm、コア径 600 μm のファイバー結合 LD を使用した。励起直径は 2.3mm のコリメートレンズを使用した。出力結合鏡(OC)は曲率半径 200mm、透過率 1%のものを使用した。また、レーザー発振中のディスクの最大温度は FL-IR 社製のサーモカメラ (A325sc)で校正した放射率 0.6 を用いて測定を行った。図 15 に示すように UV 硬化樹脂による励起上限は 11kW/cm²程度と考えられるが、研究計画の都合上ディスクの破壊を防ぐためディスクの最大温度が 100 $^{\circ}\text{C}$ を大きく超えないようにして実験を行った。レーザー発振特性を図 14 に示す。

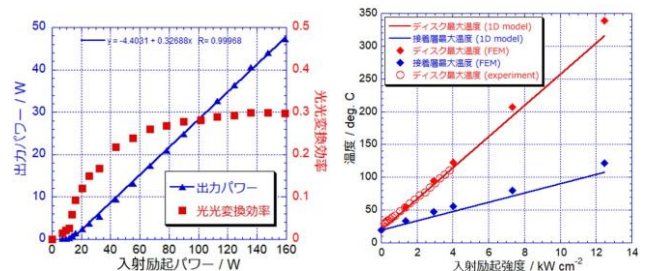


図 14 レーザー発振特性とディスク温度

このとき最大出力 47.2W(158W 励起)、スロープ効率 32.7%、光光変換効率 29.9%、最大励起強度 3.8kW/cm²であった。このとき、ディスクの各層の最大温度は (2)を用いて理論計算を行った。用いたディスクのパラメータは表 3.3 のものである。更に fusion360 を用いて有限要素解析の結果を合わせて図 15 にまとめた。1次元モデルと有限要素解析の結果は近いので1次元的な近似モデルも十分妥当性のある結果を与えることがわかる。実験と理論の誤差要因としては今回 HR 層を無視している。これによりヒートシンクの温度差と同程度の温度差がこのモデルでは省かれていることとなる。その影響で数度程度の差が生じていると考えられる。これは層構造を追加することで更に精度を上げることができると考えられる。

またディスクの最大温度は 110.6 $^{\circ}\text{C}$ に上昇したが、UV 硬化樹脂のガラス転移温度(112 $^{\circ}\text{C}$)から考えられる実際の励起上限には達していないと考えられる。

3. モード同期 Yb:CaF₂ 単結晶 thin-disk レーザー

3.1 カーレンズモード同期

カーレンズモード同期とは、光カー効果による屈折率変化を利用したモード同期手法である。光カー効果は屈折率 $n(x, y)$ 、線形屈折率 n_0 、非線形屈折率 n_2 、入射する光強度 $I(x, y)$ とすると次式にて表される。

$$n(x, y) = n_0 + n_2 I(x, y)$$

そのため、共振器内の光を凹面鏡(CM)でカー媒質(KM)に集光させると、屈折率変調によって光の強度の高い部分はカー媒質内で集光する。そのため発振するモードによってビーム径が異なり、モード間に異なる利得あるいは損失を与えることで発振モードを選択することができる。図 15 に非線形 ABCD 行列による各モードの収縮率を示す。

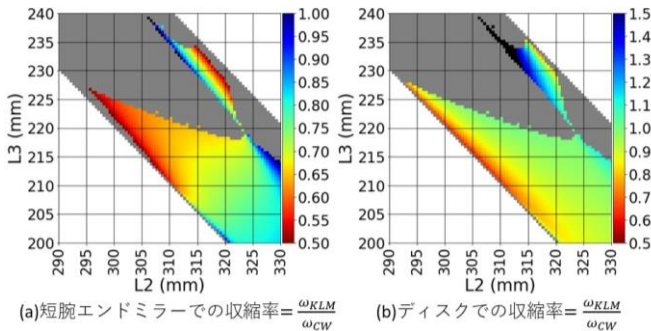


図 15 各モードの収縮率

実際にはカー媒質と二枚の凹面鏡間の距離(L_2, L_3)の距離を調整することでモードの分離を行っている。

3.2 共振器設計

図 16 にカーレンズモード同期実験系を示す。ディスクは CW 発振実験と同じものを用いた。励起波長 976nm の半導体レーザー(LD)を用い、24 パスの励起モジュールで励起直径 2.3mm とした。出力結合鏡(OC)は透過率 1% を使用し、カー媒質は厚さ 2mm の YAG を用いた。高負分散鏡(HD)は 1 反射当たり-1000fs² であり、共振器 1 周当たり-4000fs² の負分散を与えた。共振器中の初期パルスは定盤を叩いて与えられた。

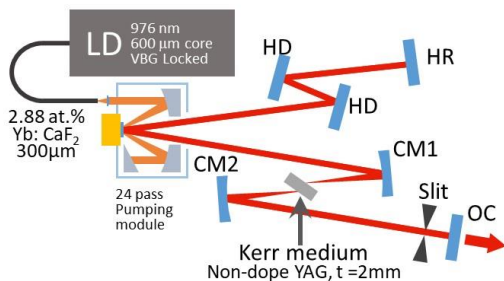


図 16 カーレンズモード同期実験配置図

3.3 カーレンズモード同期実験結果

カーレンズモード同期は得られなかった。作成した共振器は TEM₀₀ の発振モードで 1W 程度の出力(共振器内パワー199W)となった。但し、スリット挿入状態で緩和発振化した。

3.4 カーレンズモード同期実験考察

緩和発振のためにモードが同期されない可能性がある。そのため共振器の利得を高めるためにダブルパス化するか低透過率のアウトプットカップラを使用し、共振器内の損失を小さくする必要がある。

今後はダブルパス化も含めた更なる共振器の改善を行い、カーレンズモード同期を行う必要がある。

4. まとめ

3 連続の層構造を用いた熱解析を行い、理論と比較的良好一致を見せた。これより励起量に応じたディスクの厚み方向の温度分布を求めることができるようになった。更に吸収効率一定下におけるディスクの Yb 添加濃度最適化を検討し、吸収効率一定を保った場合、Yb 添加濃度を高めれば高めるほど熱抵抗を小さくでき、冷却効率を高めることができる結論を得た。

Yb:CaF₂ 単結晶を用いた thin-disk の接合と面形状測定を行い、CW レーザー発振に成功した。最大出力 47.2W、スロープ効率 32.7%、光変換効率 29.9% であった。カーレンズモード同期レーザー発振のために共振器設計及び作成を行ったが、モード同期は確認できていない。ダブルパス化も含めた共振器の最適化を行うことによって、カーレンズモード同期を目指す。

参考文献

- [1] A. Giesen, *et. al.*, Appl. Phys. B **58**, 365-372(1994).
- [2] J. Aus der Au, *et. al.*, Opt. Lett. **25**, 11, 859-861(2000).
- [3] 北島将太郎, 電気通信大学大学院, 平成 30 年度 博士論文
- [4] A. Diebold, *et. al.*, Opt. Lett. **38**, 19, 3842-3845(2013).
- [5] B. Dannecker, *et. al.*, Opt. Express **22**, 19, 22278-22284(2014).
- [6] B. Dannecker, *et. al.*, Laser Phys. Lett. **13**, 5, (2016).
- [7] M. Siebold, *et. al.*, Appl. Phys. B **97**, 327-338, (2009).
- [8] A. Lyberis, *et. al.*, Laser Phys. Lett. **13**, 5, (2016).
- [9] 北島将太郎, 電気通信大学大学院, 平成 27 年度 修士論文.
- [10] J. Shang, *et. al.*, Appl. Opt. Lett. **50**, 32, 6103-6120(2011).
- [11] K. Contag, *et. al.*, IEEE J. Quantum Electron, **29**, 697, (1999).
- [12] F. Druon, *et. al.*, Opt. Mater. Express **1**, 3, 489-502(2011).
- [13] 稲垣達也, 電気通信大学大学院, 平成 25 年度 修士論文.
- [14] 中尾博明, 電気通信大学大学院, 平成 27 年度 博士論文.
- [15] 小林祐樹, 電気通信大学大学院, 令和元年度 修士論文.