

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 先進理工学専攻 博士前期課程		
氏名	稲垣達也	学籍番号	1233009
論文題目	Yb ³⁺ 添加 Lu ₂ O ₃ セラミック thin-disk レーザーの開発		
<p>本論文では高出力、超短パルスレーザー用光源として Yb³⁺添加 Lu₂O₃セラミック thin-disk レーザーの開発を行った。</p> <p>我々は今までに Yb³⁺イオンを添加した Y₃Al₅O₁₂(以下、YAG)セラミック、Y₂O₃セラミックを利得媒質に利用したセラミックレーザーを開発してきた。しかし、これらの利得媒質は Yb³⁺イオンを添加した際に、置換される Y³⁺イオンとの原子量の違いが大きいことが原因で熱伝導率の低下が顕著であった。そのため高出力化の際に熱の影響が大きな問題となってくる。しかし、Lu₂O₃は、置換される Lu³⁺イオンと Yb³⁺イオンとの原子量の差が小さいため熱伝導率の低下が小さい。本研究に用いた 3 at. %Yb³⁺添加 Lu₂O₃の熱伝導率を測定したところ 14 W/m·K と Yb³⁺イオン添加しても高い値を維持していた。</p> <p>さらに、Lu₂O₃は利得帯域幅が YAG よりも広いため、より超短パルス動作が可能である。よって Lu₂O₃は高出力、超短パルスレーザーに有望な利得媒質である。</p> <p>熱伝導率の高い利得媒質に加え、レーザーの形状として thin-disk レーザーを利用した。thin-disk レーザーは、厚さの非常に薄い利得媒質を用い、ヒートシンクに接合し背面冷却することで、高い冷却効率を得ることができ、レーザー動作時に発生する熱の影響も小さくできる。</p> <p>利得媒質の接合は、ハンダ付け接合と接着剤接合の 2 種類の接合方法で行った。様々な検証を行い、それぞれの接合方法について、我々独自の方法を確立することができた。利得媒質接合後は、CW レーザー発振実験を行った。</p> <p>自作のマルチパス励起モジュールを用いた光学系を構成し、ハンダ付け接合した thin-disk セラミックでの CW レーザー発振実験では、100 W 励起時に出力 45.1W、スロープ効率 58.6%、光・光変換効率 45.1%、M²=7.6 を達成した。</p> <p>接着剤接合した thin-disk セラミックでの CW レーザー発振実験では、82 W 励起で出力 34.5 W、スロープ効率 57.1%、光・光変換効率 42.1%、M²=8.7 を達成した。</p> <p>いずれの接合法でのレーザー発振においても、thin-disk セラミックの破壊や、出力の不安定性は一切確認されなかった。よって、我々独自の接合方法は十分に有効な方法であると考えられる。</p> <p>このように、本論文では Yb³⁺添加 Lu₂O₃セラミック thin-disk レーザーに関して、利得媒質の熱伝導率測定、接合方法の確立、CW レーザー発振までを行った。</p>			

平成25年度 修士論文

Yb³⁺添加 Lu₂O₃ セラミック thin-disk レーザーの開発

電気通信大学大学院

情報理工学研究科 先進理工学専攻

学籍番号：1233009

氏名：稲垣達也

主任指導教官 白川晃 准教授

指導教官 西岡一 准教授

提出日 平成26年1月24日

概要

本論文では高出力、超短パルスレーザー用光源として Yb^{3+} 添加 Lu_2O_3 セラミック thin-disk レーザーの開発を行った。

我々は今までに Yb^{3+} イオンを添加した $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (以下、YAG) セラミック、 Y_2O_3 セラミックを利得媒質に利用したセラミックレーザーを開発してきた。しかし、これらの利得媒質は Yb^{3+} イオンを添加した際に、置換される Y^{3+} イオンとの原子量の違いが大きいことが原因で熱伝導率の低下が顕著であった。そのため高出力動作の際に熱の影響が大きな問題となってくる。しかし、 Lu_2O_3 は置換される Lu^{3+} イオンと Yb^{3+} イオンとの原子量の差が小さいため熱伝導率の低下が小さい。本研究に用いた 3 at.% Yb^{3+} 添加 Lu_2O_3 の熱伝導率を測定したところ $14 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ と Yb^{3+} イオン添加しても高い値を維持していた。

さらに、 Lu_2O_3 は利得帯域幅が YAG よりも広いため、100 fs よりも短い超短パルス動作が可能である。よって Lu_2O_3 は高出力、超短パルスレーザーに有望な利得媒質である。

熱伝導率の高い利得媒質に加え、レーザーの形状として thin-disk レーザーを利用した。thin-disk レーザーは、厚さの非常に薄い利得媒質を用い、ヒートシンクに接合し背面冷却することで、高い冷却効率を得ることができ、レーザー動作時に発生する熱の影響も小さくできる。

利得媒質の接合は、ハンダ付け接合と接着剤接合の 2 種類の接合方法で行った。様々な実験、検証を行い、それぞれの接合方法について、我々独自の方法を確立することができた。利得媒質接合後は、CW レーザー発振実験を行った。

ハンダ付け接合した CW レーザー発振実験では、100 W 励起時に出力 45.1 W、スロープ効率 58.6%、光・光変換効率 45.1%、 $M^2=7.6$ を達成した。100 W 励起の時でも、thin-disk の破壊や出力の不安定性などは一切確認されなかった。

接着剤接合した CW レーザー発振実験では、82 W 励起で出力 34.5 W、スロープ効率 57.1%、光・光変換効率 42%、 $M^2=8.7$ を達成した。82 W 励起の時でも、thin-disk の破壊や出力の不安定性などは一切確認されなかった。

このように、 Yb^{3+} 添加 Lu_2O_3 セラミック thin-disk レーザーに関して、 Lu_2O_3 の熱伝導率測定、2 種類の接合方法の確立、CW レーザー発振までを行った。出力の不安定性などは一切確認されていないため、これらの接合方法は有効なものであると考えられる。

目次

概要	2
1. 序論	5
1.1. はじめに	5
1.2. 本研究の背景、目的	5
1.3. 本論文の構成	6
2. 基礎原理	7
2.1. 光の吸収、自然放出、誘導放出	7
2.2. 準3準位レーザー	8
2.3. 吸収、放出断面積	8
2.4. 熱伝導率	9
2.4.1. 熱拡散率	10
2.4.2. 比熱容量	11
2.5. マイケルソン干渉計	12
2.6. ニュートンリング	13
2.7. 自己無撞着法による共振器設計	14
3. Yb ³⁺ 添加 Lu ₂ O ₃ セラミックの特徴	16
3.1. セラミックの定義	16
3.2. Yb ³⁺ イオンの特徴	18
3.3. 分光特性	19
3.4. 熱伝導率	20
4. 光学系の構成	21
4.1. thin-disk レーザー	21
4.2. 自作マルチパス励起モジュール	22
5. 接合方法	25
5.1. 接合の評価方法	25
5.2. ハンダ付け接合方法	29
5.2.1. thin-disk セラミックへのコーティング	29
5.2.2. 接合方法	30
5.2.3. 接合結果	33
5.2.4. thin-disk セラミックへの応用	34
5.3. 接着剤接合方法	37
5.3.1. 接着剤の選定	37
5.3.2. 接合方法	38
5.3.3. 接合結果	40
5.3.4. thin-disk セラミックへの応用	42

6. CW レーザー発振.....	45
6.1. ハンダ付け接合レーザー発振実験.....	45
6.1.1. 実験方法.....	45
6.1.2. 結果.....	46
6.1.3. LD の変更.....	48
6.1.4. LD 変更後の結果.....	51
6.2. 接着剤接合レーザー発振実験.....	55
6.2.1. 実験方法.....	55
6.2.2. VBG ロック LD の出力低下.....	56
6.2.3. 結果.....	58
6.3. thin-disk セラミックの温度上昇評価.....	60
7. まとめ.....	63
参考文献.....	64
表目次.....	67
謝辞.....	68

1. 序論

1.1. はじめに

レーザーとは“ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ”の頭字語であり、誘導放出による光増幅である。1954年に Townes らによってアンモニア分子を利用して波長 $1.25 \mu\text{m}$ の位相の揃ったマイクロ波を発振させることに成功した。当時は “ 誘導放出によるマイクロ波増幅: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation ” の頭字語の Maser と呼ばれていた [1]。これが世界で最初となる誘導放出による発振である。その後、1960年に T. H. Maiman によるルビーレーザー($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)のパルス発振が報告されて Laser と呼ばれるようになった [2]。それ以来、気体レーザー、エキシマレーザー、半導体レーザーなど多くのレーザー発振が報告されてきた [3] [4] [5]。

固体レーザーの特徴の一つに利得媒質の種類豊富さが挙げられる。利得媒質はレーザー発振に寄与する希土類イオンと、その添加先であり、レーザーの性質に寄与する母材に大別される。レーザー発振する希土類イオンの数は限られているが、母材の種類は単結晶だけでも 300 種類以上も存在する [6]。したがって新たな母材の探求はレーザーの発展に大変重要である。

我々は 1998 年に神島化学工業㈱との共同研究により $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ セラミックレーザーの開発に成功した [7]。その後、2004 年に単結晶を上回る性能を示すことが確認され、現在は様々なセラミック材料について研究を進めている。

1.2. 本研究の背景、目的

我々の研究室では今までに、企業との共同研究により、希土類イオン添加セラミック材料を利得媒質に用いた固体レーザーの研究を行ってきた。いくつか例を挙げると、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 、 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 、 $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAG}$ セラミックモード同期レーザー、希土類酸化物 $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ セラミックモード同期レーザー [8] [9] [10]、 $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ セラミック thin-disk レーザーである [11]。

本研究では、希土類酸化物セラミック thin-disk レーザーの研究として、利得媒質に Yb^{3+} 添加 Lu_2O_3 セラミックを用いた thin-disk レーザーの開発を行う。 Yb^{3+} 添加 Lu_2O_3 は利得帯域幅が YAG よりも広いため、より超短パルスが可能である。また、 Yb^{3+} イオンを添加した場合でも高い熱伝導率を維持できる。そのため高出力、超短パルスレーザー動作が期待される利得媒質である。

1.3. 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

1. 序論
本研究を行うにあたっての背景や目的について述べる。
2. 基礎原理
レーザーの基礎、熱特性、接合方法の評価方法について説明する。
3. Yb³⁺添加 Lu₂O₃ セラミックの特徴
本研究におけるセラミックの定義、利得媒質に用いた Yb³⁺添加 Lu₂O₃ セラミックの特徴について説明する。
4. 光学系の構成
thin-disk レーザーの概念、自作マルチパス励起モジュールについて説明する。
5. 接合方法
ハンダ付け接合、接着剤接合の 2 種類の接合方法について記す。
6. CW レーザー発振
2 種類の接合方法で接合した CW レーザー発振の実験方法、結果について記す。
7. まとめ
2 種類の接合方法の結果、**thin-disk** セラミックを接合し自作 **thin-disk** モジュールで行った CW レーザー発振のまとめ、今後の課題について述べる。

2. 基礎原理

2.1. 光の吸収、自然放出、誘導放出

2つのエネルギー準位、 E_0 と E_1 を考える。 E_0 を下準位(基底状態)、 E_1 を上準位(励起状態)とする。

物質に光子が入射した場合、電子はその光子の持つエネルギーを吸収してよりエネルギー状態の高い状態 E_1 に励起される。この現象を光の吸収という(図2.1-1,A)。

E_1 に遷移した電子は、ある緩和時間を経過後 E_0 に落ちる。その時、電子は励起していた準位と遷移した先の準位のエネルギー差に等しいエネルギーの光($h\nu = E_1 - E_0$)を放出する。これを自然放出(図2.1-1,B)という。自然放出する確率は A_{10} と表され、自然放出寿命を用いて $A_{10} = 1/\tau_{10}$ となる。

E_1 に電子が存在し、その時に外部から $E_1 - E_0$ に相当するエネルギーの光が入射した場合、この電子は、入射してきた光とエネルギー、位相、進行方向の同じ光を放出する。つまり、入射時に一つだった光子が出射時には二つの光子になっている。これを誘導放出という(図2.1-1,C)。誘導放出を利用して光の増幅を行ったものがレーザーである。誘導放出する確率は B_{10} と表され、自然放出確率 A_{10} と合わせてアインシュタインのA係数、B係数と呼ばれる。

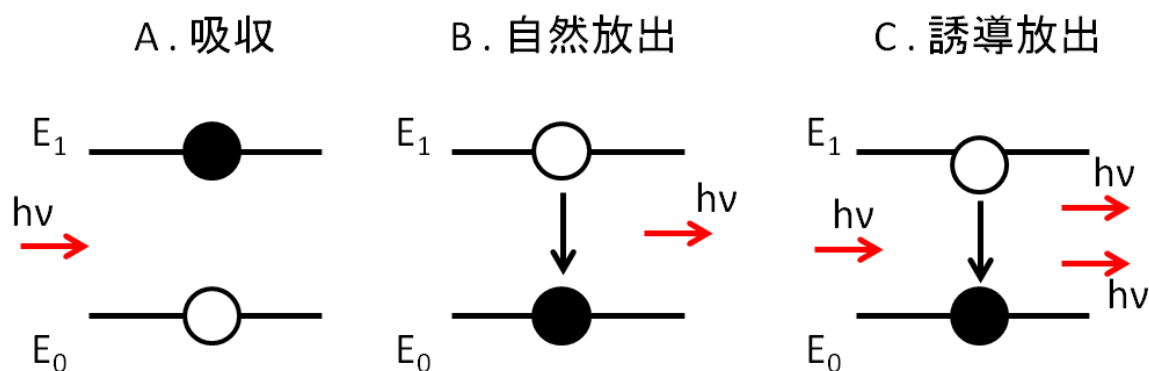


図 2.1-1 吸収、自然放出、誘導放出

2.2. 準3準位レーザー

図 2.2-1 に準3準位レーザーのエネルギー図を示す。 E_0 から E_2 に励起された電子は非放射遷移によりすぐに E_1 へと緩和する。 E_1 から E_0 への間でレーザー遷移が起こる。準3準位レーザーは量子効率が高く、非常に効率よく発振できるといった特徴がある。しかし、下準位と基底準位が非常に近いため、しきい値が高いといった問題もある。そのため反転分布を作るためには強励起が必要となってくる [12]。

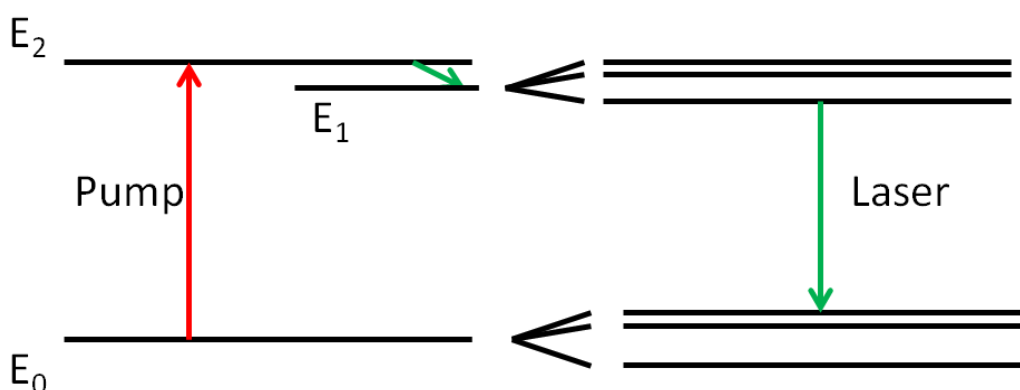


図 2.2-1 準3準位レーザーエネルギー準位図

2.3. 吸収、放出断面積

強度 I の光が長さ l 、吸収係数 $\alpha(\nu)$ [cm^{-1}] の試料に入射した場合を考える。このとき試料を出てきた光の強度を I' とすると、

$$I' = I \exp(-\alpha l) \quad \dots (2-1)$$

となる。透過率 T を $T = \frac{I'}{I}$ とする。試料の吸収係数は

$$\alpha(\nu) = -\frac{1}{l} \ln(T) \quad \dots (2-2)$$

と表すことができる。単位体積あたりの添加イオン数を N とすると、吸収断面積 $\sigma_{\text{abs}}(\nu)$ は

$$\sigma_{\text{abs}}(\nu) = \frac{\alpha(\nu)}{N} \quad \dots (2-3)$$

となる。 N は添加濃度 C [at. %]、分子量 M [g]、密度 ρ [g/cm^3]、アボガドロ数 N_A 、置換比 r から

$$N = \frac{\rho}{M} \cdot \frac{C}{100} \cdot N_A \cdot r \quad \dots (2-4)$$

で求められる。希土類酸化物のように正確な添加濃度が求められない場合は

$$\sigma_{\text{emi}}(\omega) = \sigma_{\text{abs}}(\omega) \exp\left(\hbar \frac{\omega_z - \omega}{k_B T}\right) \quad \dots (2-5)$$

ω_z : 吸収と放出の等しいゼロライン

から間接的に $\sigma_{\text{abs}}(\nu)$ を求める事が可能である [13]。

次に放出断面積 $\sigma_{\text{emi}}(\nu)$ の導出について考える。

本研究では Füchtbauer-Ladenburg 法を用いた [14]。上準位からの非輻射過程による緩和はないと仮定すると、上準位 I からの緩和確率の総数は

$$\frac{1}{\tau} = \sum_K A(I, K) \quad \dots (2-6)$$

となる。放出の遷移分岐比を β として

$$\beta(I, K) = \tau A(I, K) \quad \dots (2-7)$$

と表すことができる。Yb は 2 準位であるため $\beta = 1$ である。放出断面積は

$$\sigma_{\text{emi}}(I, K; \nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi c n^2} A(I, K) g(\nu) \quad \dots (2-8)$$

$$g(\nu) = \frac{I(\nu)}{\int_{IK} I(\nu) d\nu} : \text{ラインシェイプ関数} \quad \dots (2-9)$$

と表すことができる。式(2-8)に式(2-7)、式(2-9)を代入すると

$$\sigma_{\text{emi}}(I, K; \nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi c n^2} \cdot \frac{\beta(I, K)}{\tau} \cdot \frac{I(\nu)}{\int_{IK} I(\nu) d\nu} \quad \dots (2-10)$$

となる。

2.4. 熱伝導率

熱伝導率とは熱の伝わりやすさを表す量である。高出力動作を目指す際、非線形光学効果や材料の破壊を防ぐために、レーザー動作時に発生する熱を素早く排出することが重要となってくる。そのため、高い熱伝導率を有する材料を選択していくことが必要である。

熱伝導率は式(2-11)で求められる。

$$K = \alpha C_p \rho \quad \dots (2-11)$$

α [m²/s]は熱拡散率、 C_p [J/g·K]は比熱容量、 ρ [g/m³]は密度である。熱伝導率を求めるために、本研究では熱拡散率と比熱容量を測定し、式(2-11)から計算した。

2.4.1. 熱拡散率

熱拡散率とは物質内に温度分布が生じた時に、その分布が緩和して熱的な平衡状態になるまでの速さを表す量である。この値が高いということは、熱の移動速度が速いということである。

本研究では、熱拡散率をフラッシュ法にて測定した [15]。使用した装置は光源にキセノンランプを用いた熱拡散率測定装置 LFA447 NanoFlash®(NETZSCH 社) である。

フラッシュ法は、図 2.4-1 に示すように平板状の試料の表面をキセノンフラッシュで均一に加熱し、熱が表面から裏面へ拡散する際の裏面の温度変化から熱拡散率を算出する手法である。

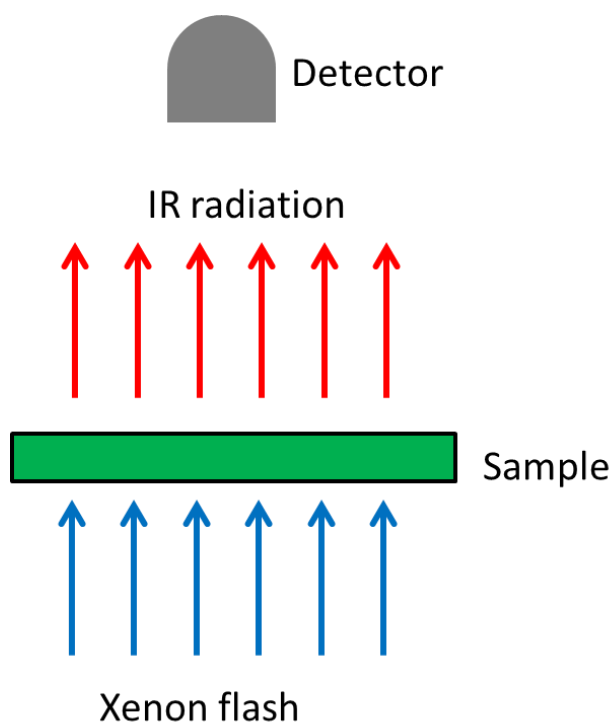


図 2.4-1 フラッシュ法の概念図

図 2.4-2 に測定時に観測される温度上昇曲線を示す。得られた温度上昇曲線において、最大の温度 T_{\max} の半分の温度 $T_{\max}/2$ に達するまでの時間を $t_{1/2}$ [s]、また試料の厚みを l [cm]とすると、熱拡散率 α は以下の式で定義される。

$$\alpha = 0.1388 \cdot \frac{l^2}{t_{1/2}} \quad \dots (2-12)$$

なお、式(2-12)は試料からの熱損失を無視した断熱モデルである。

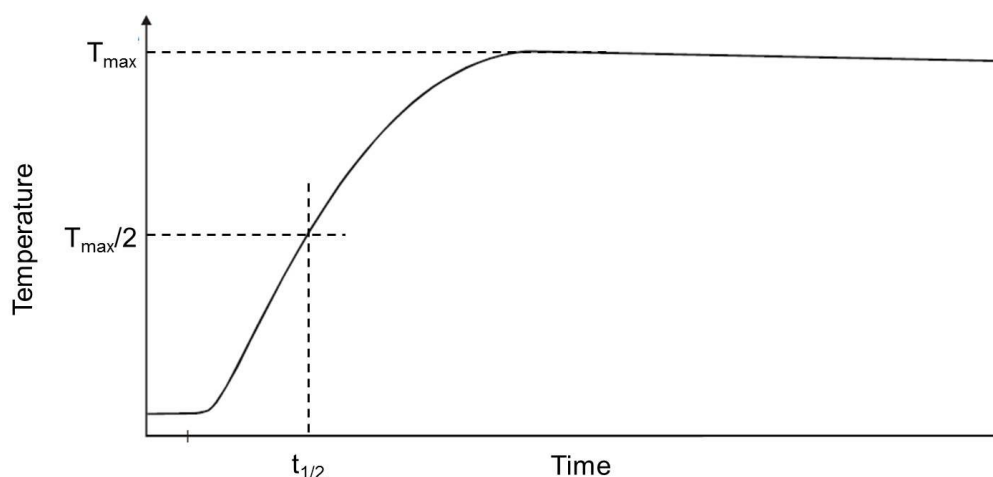


図 2.4-2 温度上昇曲線

2.4.2. 比熱容量

比熱容量とは、単位質量辺り温度を 1 K 上昇させるのに必要なエネルギーを表す。比熱容量が小さければ温度変化しやすく、大きければ温度変化しにくいと言い換えることができる。熱伝導率、熱拡散率とともに物質の熱特性を表す重要なパラメータである。

比熱容量は式(2-13)から比較法で求めた。測定試料と参照試料を用意し、あらかじめフラッシュ法で測定試料の熱拡散率を求めておく。熱拡散率、比熱容量、熱伝導率の判明している参照試料と測定試料の値を式(2-13)に代入することで求めている。

$$C_p^{\text{sample}} = \frac{T_{\infty}^{\text{ref.}}}{T_{\infty}^{\text{sample}}} \cdot \frac{Q^{\text{sample}}}{Q^{\text{ref.}}} \cdot \frac{v^{\text{sample}}}{v^{\text{ref.}}} \cdot \frac{\rho^{\text{ref.}} \cdot D^{\text{ref.}}}{\rho^{\text{sample}} \cdot D^{\text{sample}}} \cdot \frac{d_{\text{orifice}}^{2,\text{sample}}}{d_{\text{orifice}}^{2,\text{ref.}}} \cdot C_p^{\text{ref.}} \quad \dots (2-13)$$

$T_{\infty}^{\text{ref.}}$: 参照試料における検出器信号の増分 [rel./V]

$T_{\infty}^{\text{sample}}$: 測定試料における検出器信号の増分 [rel./V]

$Q^{\text{ref.}}$: 参照試料上に与えられたパルスのエネルギー [rel./V]

Q^{sample} : 測定試料上に与えられたパルスのエネルギー [rel./V]

$v^{\text{ref.}}$: 参照試料測定時の増幅因子

V^{sample} : 測定試料測定時の増幅因子

$\rho^{ref.}$: 参照試料の密度 [g/cm³]

ρ^{sample} : 測定試料の密度 [g/cm³]

$D^{ref.}$: 参照試料の厚さ [mm]

D^{sample} : 測定試料の厚さ [mm]

$d_{orifice}^{2,ref.}$: 参照試料の照射面積 [mm²]

$d_{orifice}^{2,sample}$: 測定試料の照射面積 [mm²]

$C_p^{ref.}$: 参照試料の比熱容量 [J/g · K]

2.5. マイケルソン干渉計

本研究では接合面の面形状を調べるためにマイケルソン干渉計を用いた。

図 2.5-1 にマイケルソン干渉計の模式図を示す。光源から出た単一周波数のレーザー光をビームスプリッタで 2 つの光路に分離し、それぞれ高反射鏡 M_1 , M_2 で反射させて再び重ね合わせる。2 つの光が重なり合うときの位相差により、重ね合わせた光の強め合いや弱め合いで干渉縞ができる。

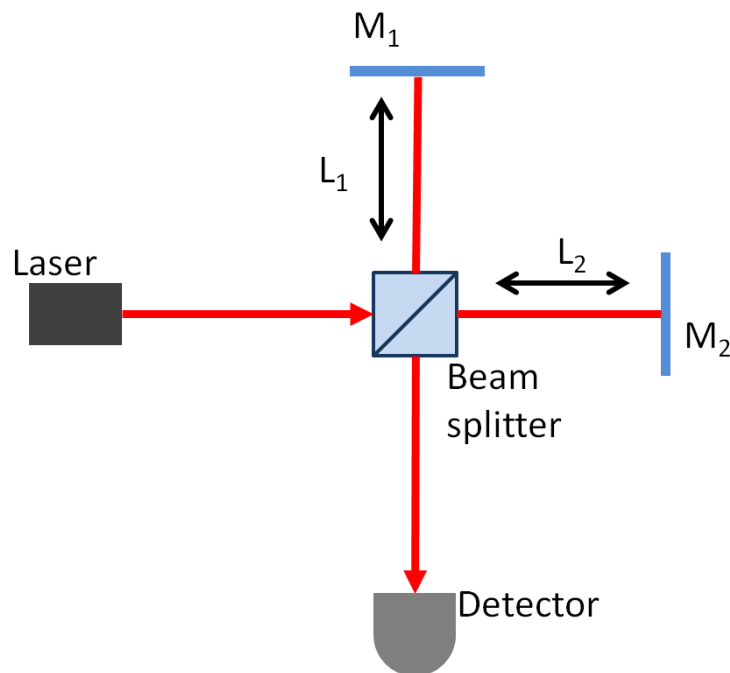


図 2.5-1 マイケルソン干渉計の概念図

M_1 、 M_2 までの距離をそれぞれ L_1 、 L_2 とすると、検出器に入る 2 つの光の光路差 d は

$$d = 2(L_1 - L_2) \quad \dots (2-14)$$

となる。2 つに分けたレーザー光の振幅をそれぞれ A_1 、 A_2 、波数を k とおくと、検出器に入る光の強さは

$$I = \frac{1}{2}(A_1^2 + A_2^2) + A_1 A_2 \cos 2k(L_1 - L_2) \quad \dots (2-15)$$

と表される [16]。

2.6. ニュートンリング

マイケルソン干渉計は 2 つの光路差によって干渉縞が生じるが、光路差が同じ場合でも干渉縞が生じる事がある。使用する高反射鏡が曲率半径を持っている場合、レーザー光を入射して反射させる場所によって位相差が生じる。このような位相差で干渉縞ができる現象を、ニュートンが発見したことからニュートンリングという。

図 2.6-1 に平凸レンズと平面鏡とのニュートンリングの模式図を示す。波長 λ [nm] のレーザーを入射したとする。平凸レンズの曲率半径を R [mm]、平面鏡の中心からの距離を r [mm]、平面鏡と平凸レンズの任意の点までの距離を d [mm] とすると、2 つの反射光の光路差は近似的に

$$d = \frac{r^2}{2R} \quad \dots (2-16)$$

と表される。この時、ニュートンリングの明条件は

$$\frac{r^2}{R} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots (2-17)$$

であり、暗条件は

$$\frac{r^2}{R} = m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots (2-18)$$

である。

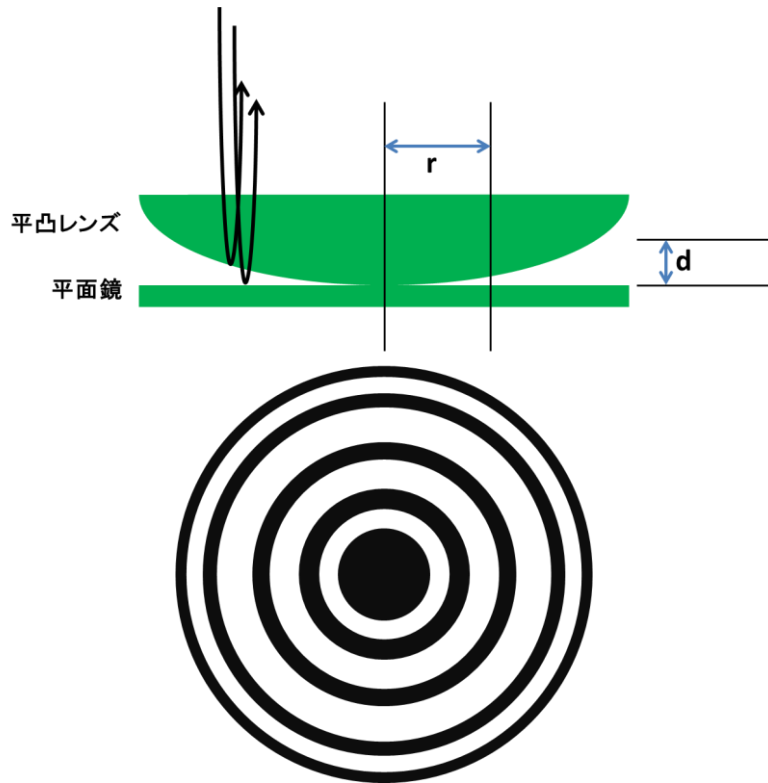


図 2.6-1 ニュートンリングの概念図

2.7. 自己無撞着法による共振器設計

共振器の設計を行うために、自己無撞着法を用いた [17]。自己無撞着法とは共振器内の任意の面でのビームのスポット径や波面の曲率半径を求める手法である。

共振器の安定な固有モードは、ビームが共振器内を 1 周回った時にもとの分布と同じでなければならない。従って、共振器内の任意の位置に参照面を定め、その地点に対するガウシアンビームの定常複素ビームパラメータを q_s と表すと、

$$q_s = \frac{Aq_s + B}{Cq_s + D} \quad \dots (2-19)$$

となるべきである。ここで、 A 、 B 、 C 、 D は共振器を 1 周する時の光線行列の要素である。この式を $AD - BC = 1$ という条件のもと、 $1/q_s$ について解くと

$$\frac{1}{q_s} = \frac{D - A}{2B} \pm i \frac{\sqrt{1 - [(D + A)/2]^2}}{B} = \frac{D - A}{2B} + i \frac{\sin \theta}{B} \quad \dots (2-20)$$

と表すことができる。ただし、

$$\cos\theta = \frac{D+A}{2} \quad \dots (2-21)$$

$$\theta = \pm \left| \cos^{-1} \left(\frac{D+A}{2} \right) \right| \quad \dots (2-22)$$

である。

ガウシアンビームが閉じ込められるための条件は、ビームスポットサイズの平方 ω^2 が有限の整数であることである。 q 、ビームスポット径 ω 、曲率半径 R の関係が

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi\omega^2 n} \quad \dots (2-23)$$

で表され、式(2-20)と式(2-23)を比べることにより、ビームが閉じ込められる条件は θ に関して $\sin\theta/B < 0$ となり、

$$\left| \frac{D+A}{2} \right| < 1 \quad \dots (2-24)$$

でなければならない。これにより定常状態のビームパラメータは

$$\frac{1}{q_s} = \frac{D-A}{2B} + i \frac{\sin\theta}{|B|} \quad \dots (2-25)$$

となる。式(2-23)と式(2-25)から参照面における R と ω は

$$R = \frac{2B}{D-A} \quad \dots (2-26)$$

$$\omega = \left(\frac{\lambda}{\pi n} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(|B|)^{\frac{1}{2}}}{\left[1 - \left[\frac{D+A}{2} \right]^2 \right]^{\frac{1}{4}}} \quad \dots (2-27)$$

と求められる。共振器内の任意の面におけるビームスポット径を求めるためには式(2-27)に共振器を構成する光線行列を適用すれば良い。

3. Yb³⁺添加 Lu₂O₃ セラミックの特徴

3.1. セラミックの定義

はじめに、本論文で扱うセラミックの定義を明確にしておく [18]。セラミックの定義は以下の 3 種類(図 3.1-1)がある。

1. 無機物・無機材料 (図 3.1-1-A)
2. 無機物かつ非金属 (図 3.1-1-B)
3. 無機物かつ非金属であり、焼結によって焼き固められた多結晶体 (図 3.1-1-C)

我々は単結晶やガラスと区別するために 3 番目の定義を用いている。

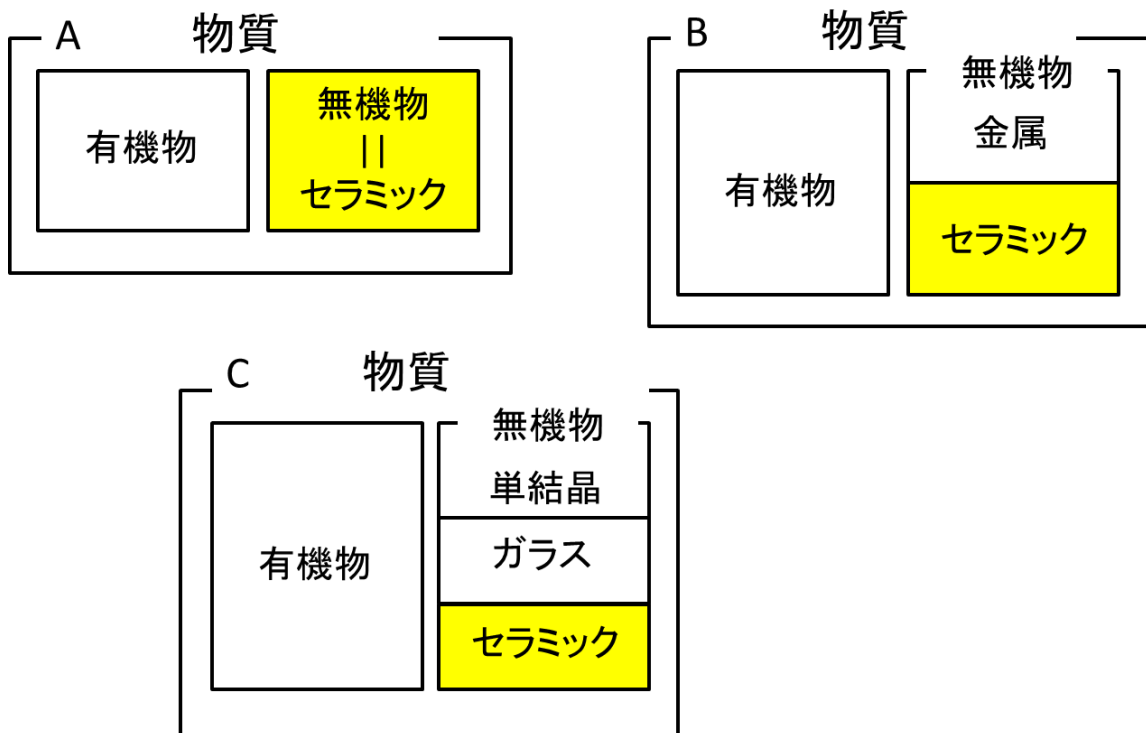


図 3.1-1 セラミックの定義

利得媒質はレーザー発振させるために添加する希土類イオンと、添加先の母材によって構成されている。レーザーの出力限界は、光に変換されなかったエネルギーによって発生する熱による熱光学効果や、熱応力による結晶の破壊に支配される。非線形光学効果は光学系の設計によりある程度補償する事が可能

だが、熱応力による結晶の破壊は材料の特性に支配されてしまう [19] [20]。そのため、より優れた母材を選択していくことが重要である。

単結晶は結晶軸がどの位置であっても変わらないものを指す。Czochralski (CZ) 法や Floating Zone (FZ) 法が製法として有名である。CZ 法の場合での結晶成長速度は mm/1 hour 程度であり、更にファセット(切子面)により結晶の中心部分は使用できない。作製可能な試料サイズは数 cm 程度であり、製造期間も数ヶ月程度になることもあって、大口径材料の作製や大量生産ができない。また、溶液の濃度変化による成長方向への濃度変化、るつぼの融点以上の高融点試料の作製が困難等の欠点もある。

ガラスは結晶構造を持たない無機物である。安価に大口径材料が大量生産可能であり、不均一広がりによる広利得帯域幅が得られる利点がある。しかし、熱特性や機械特性が単結晶に比べ悪いという欠点がある

セラミックは焼結によって焼き固められた多結晶体である。焼結体であるため、m×m×cm 程度の試料が数週間程度で作製可能である。また、熔融させる必要がないことから、融点以上に加熱する必要がなくなり、単結晶で作製困難である高融点材料の作製も可能である [21] [22]。単結晶と同じ組成比を持ちマイクロな構造は同じであり、蛍光スペクトルや吸収スペクトルもほぼ同じである。単結晶との性質の違いとして、セラミックは結晶軸がランダムで、粒界を有している事が挙げられる。しかしマクロにみると多結晶体では、粒界の厚さが熱特性、電気特性、機械的特性などの物性に大きな影響を及ぼす事が知られており、その事からセラミックのそれは単結晶の場合と異なり、悪いのではないかと考えられた。しかし我々のナノサイズ微結晶作製技術と真空焼結法を用いて造られたセラミックは 10 μm 程度の粒子と厚さ数 Å の粒界からなっているため、それが与える影響はマクロなものとは大きく異なり、常温において熱伝導率や屈折率などの値は単結晶の値と変わらないものであった。

3.2. Yb³⁺イオンの特徴

図 3.2-1 に Yb³⁺イオンのエネルギー準位図を示す。Yb³⁺には F_{5/2} と F_{7/2} の 2 つの準位しか存在しない。吸収と放出が等しいゼロラインでは 3 準位であり、その他では準 3 準位である。シュタルク分裂した準位を利用するため励起波長と発振波長が近く、量子効率が高く発熱が小さい。励起状態吸収等は存在しないが、Yb³⁺-Yb³⁺ 対による共同アップコンバージョン [23] や、高濃度添加材料において非線形吸収や白色光の発生が確認されている [24]。また、Yb³⁺イオン添加材料は電子とフォノンの相互作用による振動電子遷移により、吸収・放出スペクトルの帯域幅は広い [25]。以上より、Yb³⁺イオン添加材料はレーザー発振しきい値が高い欠点が存在するものの、高い量子効率、低発熱、広い帯域幅と言った特性から、高出力、高効率、超短パルスレーザー発振が期待される。

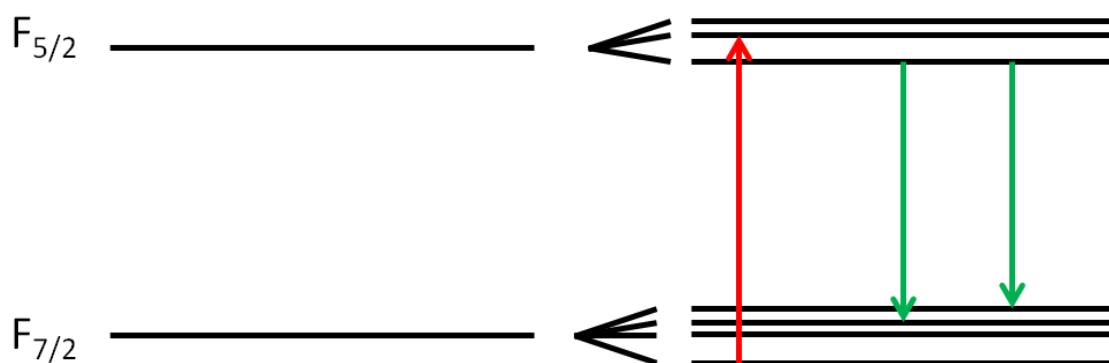


図 3.2-1 Yb³⁺のエネルギー準位図

3.3. 分光特性

図 3.3-1 に Yb³⁺添加 Lu₂O₃ の分光特性を示す。吸収に関して見ると、波長 976 nm に線幅が非常に狭い強いピークがある。波長 903、949 nm には吸収は弱い線幅の広いピークがある。本研究では、マルチパス励起を行うため高い吸収断面積を示す波長を使用したい。そのため、励起にはレーザーダイオードを用い波長 976 nm のゼロラインを使用する。

発光に関して見ると、波長 976 nm の強いピークがあり、波長 1032 nm に線幅の広いピークがある。波長 976 nm は吸収と重なっていて利用できないため、レーザー発振には波長 1032 nm を使用する。

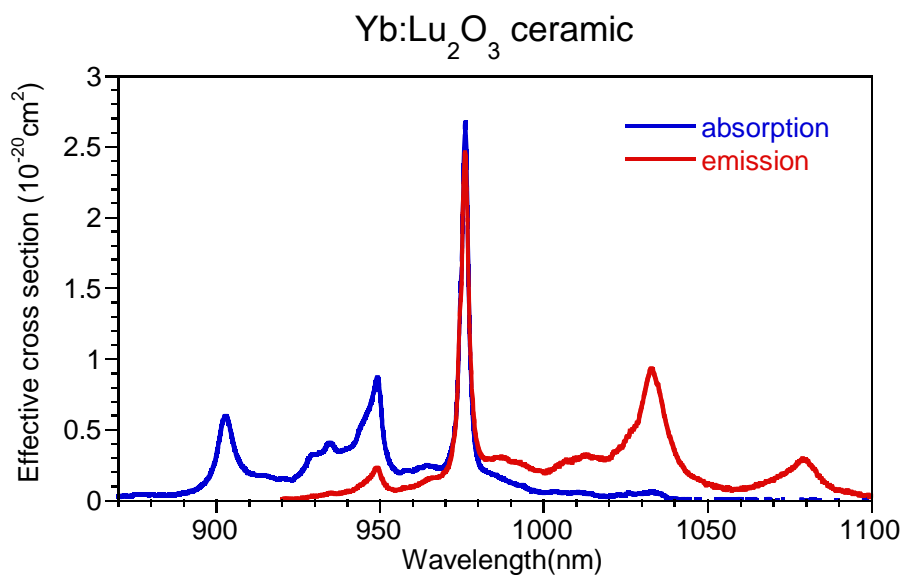


図 3.3-1 Yb³⁺:Lu₂O₃ の吸収、放出断面積

3.4. 熱伝導率

我々の研究室では、これまでに YAG セラミックや Y_2O_3 セラミックを利得媒質に使用したレーザーを開発してきたが、これらの媒質は Yb^{3+} イオンを添加した時の熱伝導率の低下が大きく、高出力動作時の熱の影響が大きい。しかし、LuAG や Lu_2O_3 は添加する Yb^{3+} イオンと置換される Lu^{3+} イオンとの原子量の差が小さいため、イオン添加しても熱伝導率の低下が小さい。そのため、高出力動作を目指す際に適している材料である。

$Yb^{3+}:Lu_2O_3$ の熱伝導率は、フラッシュ法を用いて熱拡散率を求め、比較法で比熱容量を計算し導出した。比較法の際に使用した参照試料は Pyrocera9606 である。

表 3.4-1 に熱伝導率測定結果を示す。5 回測定した平均値を示している。本研究に用いた Lu_2O_3 セラミックは約 14 W/mK と高い熱伝導率を示している事がわかる。

表 3.4-2 に各種利得媒質の熱伝導率を示す。赤字はセラミック、黒字は単結晶の熱伝導率を示している。単結晶に関して、 Yb^{3+} イオン無添加時はいずれの材料も高い熱伝導率を有しているが、3%添加すると Lu_2O_3 以外は熱伝導率が大きく下がっている事がわかる。セラミックに関しても、 Yb^{3+} イオン添加により熱伝導率の低下が起こっている。 Lu_2O_3 セラミックについては、 Yb^{3+} イオン添加時の方が高い熱伝導率を示している。 Yb^{3+} イオン無添加 Lu_2O_3 セラミックの熱伝導率は、以前に我々の研究室で測定されていた値であり、3% Yb^{3+} イオン添加 Lu_2O_3 セラミックは、今回新たに測定した値である。この 2 つのセラミックは測定法や測定装置が異なるため、 Yb^{3+} イオン添加時に熱伝導率が高くなったと考えられる。しかし、 Yb^{3+} イオン添加しても Lu_2O_3 は高い熱伝導率を有している事から、高出力動作が可能な材料であると言える。

表 3.4-1 $Yb^{3+}:Lu_2O_3$ の熱特性

	Density [g/cm ³]	Thermal diffusivity [mm ² /s]	Specific heat capacity [J/gK]	Thermal conductivity [W/mK]
3 at.% $Yb^{3+}:Lu_2O_3$	9.25	4.77	0.32	13.9

表 3.4-2 希土類酸化物、YAG の熱伝導率

	Sc ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	YAG
Thermal conductivity non-doped [W/mK]	12.5 16.5 ^[26]	12.6 13.6 ^[26]	10.9 12.5 ^[26]	9.9 11.0 ^[26]
Thermal conductivity 3% Yb ³⁺ doped [W/mK]	6.6 ^[26]	7.9 (2%) 7.7 ^[26]	13.9 11.0 ^[26]	6.8 ^[26]

4. 光学系の構成

4.1. thin-disk レーザー

固体レーザーで昔からよく使用されていた利得媒質の形状は、一般的にロッド状であった。ロッド状の利得媒質を利用した固体レーザーでは、利得媒質内部の温度勾配による熱レンズ効果などの熱光学効果はどうしても避けられない問題であった。そこで考えられたのが厚さの薄い利得媒質を利用したレーザーである [26]。このレーザーを thin-disk レーザーと言う。thin-disk レーザーでは、厚さ数百 μm 以下の利得媒質をヒートシンクに接合し背面冷却することで高い冷却効率を得ることができる。また、レーザー発振の方向と、熱の伝わる方向を同軸にすることにより、固体レーザーの問題であった熱レンズ効果などを抑制している。そのため高効率、高出力、高ビーム品質を同時に達成するレーザーが実現可能である。

thin-disk レーザーは利得媒質の厚さを薄くしたため、励起光を 1 回通過させただけでは十分な吸収量が得られない。この問題を解決するためには、利得媒質に Yb³⁺イオンを高濃度添加する方法が考えられるが、それに従い熱伝導率の低下を招いてしまう。

熱伝導率低下の問題があるため、別の解決法としてマルチパス励起を行う [27]。図 4.1-1 にマルチパス励起 thin-disk レーザーの概念図を示す。はじめに、励起光を放物面鏡で反射させ thin-disk に照射する。次に、thin-disk を通過し裏面で反射した光を、再び放物面鏡で反射させ 2 組のプリズムミラーで光路を反転させる。反転した光は再び放物面鏡で反射し、thin-disk で吸収させる。このような光路を複数回経由することで励起光の吸収量を確保する。

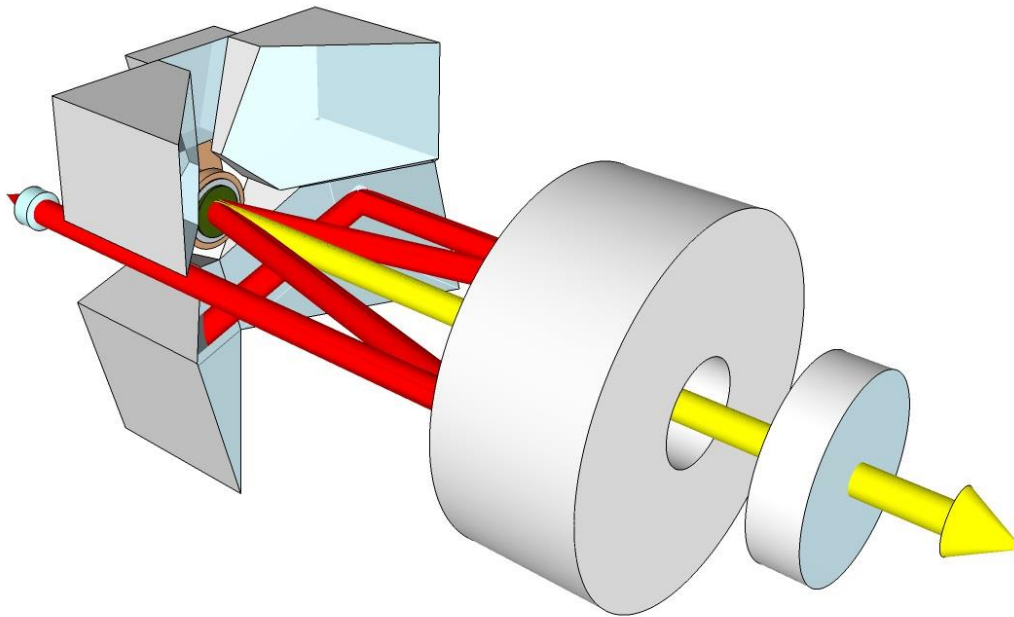


図 4.1-1 マルチパス励起 thin-disk レーザーの概念図

4.2. 自作マルチパス励起モジュール

マルチパス励起を行うために、我々はマルチパス励起モジュールの設計を行った。一般的に、マルチパス励起モジュールのパス数は 16~24 パスが用いられている [28] [29]。

はじめに、パス数の定義を明確にしておく。ここでは、励起光が利得媒質で 1 回吸収されることを 1 パスと定義している。thin-disk レーザーでは励起光を裏面で反射させるため、往復 2 回の吸収があり 2 パスと計算する。

本研究に用いるモジュールは 16 パスの設計で構成することにした。Yb³⁺:Lu₂O₃ の吸収係数から、励起光の吸収を計算すると 16 パスで十分な吸収量を確保することが可能であり、また、光学系の構成が容易といった理由もある。

図 4.2-1 に我々のマルチパス励起モジュールの設計を示す。励起光を中心に集めるための放物面鏡と、光路を反転させるための 2 枚 1 組のプロズムミラー 4 組で構成し、片道で 8 パスの励起光吸収をさせる。折返しミラーで反射し、合計 16 パスの励起光吸収をさせる構成となっている。

光路を詳しく見てみる。水色部分が thin-disk である。赤線が 1 回目の照射、黄線が 2 回目の照射、緑線が 3 回目の照射、青線が 4 回目の照射となっている。灰色の折り返しミラーで反射し、進んできた光路を遡り合計 8 回 thin-disk に照射させ、正味 16 パスとなっている。

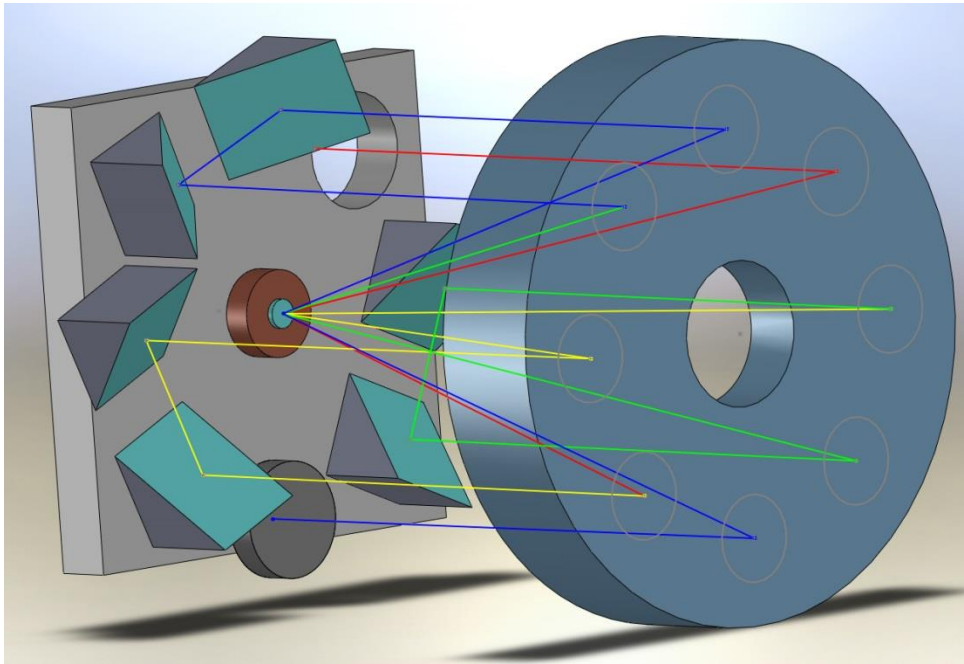


図 4.2-1 自作マルチパス励起モジュールの設計

図 4.2-2 は thin-disk 取付け後のマルチパス励起モジュールの写真である。モジュール中心部に利得媒質がある。図 4.2-1 で設計した光路を通るように、励起光を入射し、4組のプリズムミラーと放物面鏡、折返しミラーを使った16パスのマルチパス励起の構成となっている。

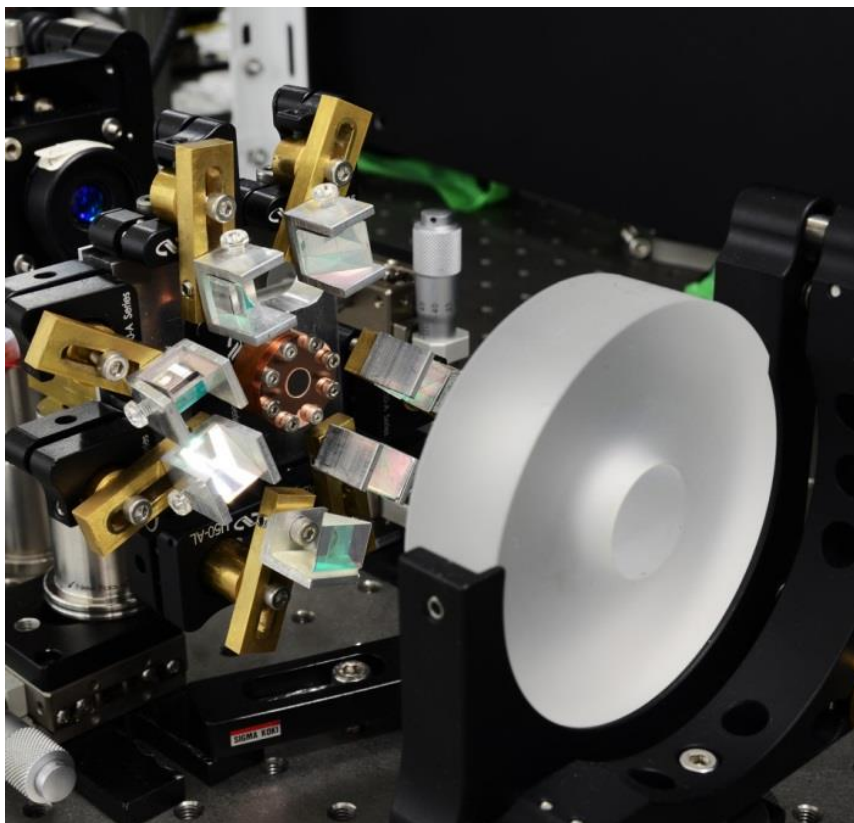


図 4.2-2 自作マルチパス励起モジュールの写真

5. 接合方法

thin-disk レーザーではヒートシンクと利得媒質を接合する必要があり、一般的には、ハンダや接着剤を使用して接合する方法が用いられてきている [30] [31]。しかし、その詳細な方法は公開されていないため、我々は独自の接合方法の確立を目指した。ここでは、ハンダ付け接合方法と、接着剤接合方法の 2 種類に関して述べる。

5.1. 接合の評価方法

接合後の thin-disk セラミックの面形状の評価方法について説明する。接合の評価は接合面の面形状と接合層の厚さで評価を行う。thin-disk セラミックを接合した時にその接合面の面形状によって、共振器の設計を行う必要がある。また、接合層が厚いと冷却効率の低下、熱による破壊につながるため、これらの評価が重要である。

本研究ではマイケルソン干渉計で干渉縞を観測することで面形状の評価を行った。

図 5.1-1 にマイケルソン干渉計を示す。光源から出た波長 1064 nm の単一周波数のレーザー光を thin-disk セラミック全体に照射するため直径約 7 mm にコリメートし、干渉縞観測の光源とする。コリメートされた光はビームスプリッタ(BS)で 2 つの光路に分離し、片方の光路には高反射鏡(HR)、もう片方の光路には thin-disk セラミックを設置する。それぞれの光路からの反射光は再び半透鏡を通り、検出器に入り、その干渉縞を観測する。

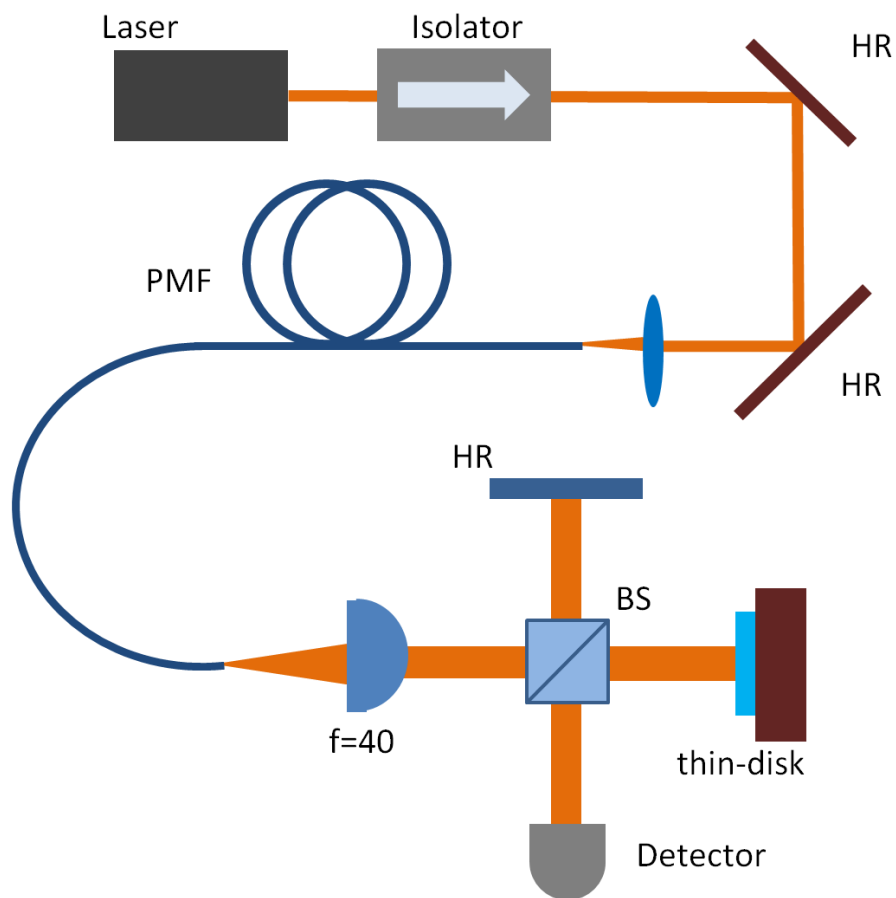


図 5.1-1 マイケルソン干渉計構成図

例として、図 5.1-2 にマイケルソン干渉計で平面高反射鏡からの反射光を重ね合わせたときの干渉縞を示す。ニュートンリングの暗条件になっているため干渉縞が見えなくなっている。ただし、曲線状に見える干渉縞は **HR** とビームスプリッタとの干渉縞または、検出器のフィルターの表面と裏面との干渉縞などと考えられる。これらの干渉縞を取り除くのは困難であり、以降の観測にも写り込んでしまっているが、面形状の観測には影響はないと思われる。

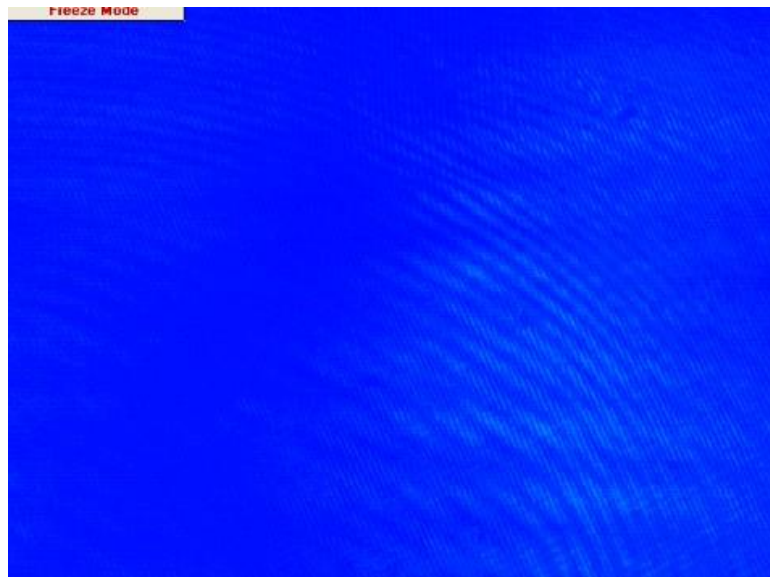


図 5.1-2 HR の干渉縞

図 5.1-3 は図 5.1-2 の平面高反射鏡の重ね合わせの状態から、片方の高反射鏡にあおりをつけて、反射光の重なりを僅かにずらした時の干渉縞である。位相差が生じるため縦方向の干渉縞がはっきりと観測できる。したがって、面形状が平面であれば、このような干渉縞が観測できると考えられる。



図 5.1-3 HR の干渉縞(あおり付き)

図 5.1-4 は片方の平面高反射鏡を曲率半径 $R=200$ mm の凹面鏡に変えた時の干渉縞である。図中心部に同心円状の干渉縞が確認できる。中心から 1 つ目の暗条件の円までの距離 r を測ると $r=467$ μm であり、式(2-17)から曲率半径を計算すると $R=204.9$ mm となった。正確な距離を測れないため誤差が生じている。

thin-disk セラミックをヒートシンクに接合したことで曲率半径を持ったならば、このような干渉縞を観測することになると考えられる。また、そこからおよその曲率半径を計算することが可能であると考えられる。

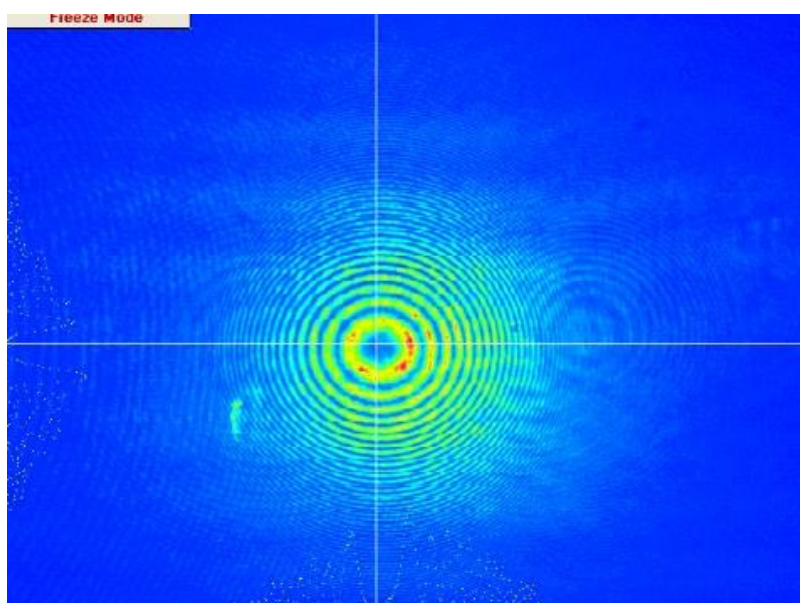


図 5.1-4 曲率 200 mm 凹面鏡の干渉縞

接合層の厚さ D [μm] はマイクロメータで接合前のヒートシンクの厚さ D_{HS} [μm]、thin-disk セラミックの厚さ D_{td} [μm]、接合後の全体の厚さ D_{all} [μm] を測り式 (5-1) で求めた。

$$D = D_{\text{all}} - (D_{\text{HS}} + D_{\text{td}}) \quad \dots (5-1)$$

5.2. ハンダ付け接合方法

thin-disk セラミックとヒートシンクとの接合方法は、熱伝導率の高さからハンダ付け接合する方法が用いられている [30]。ここでは本研究で行った接合方法について述べる。

5.2.1. thin-disk セラミックへのコーティング

本研究で接合する thin-disk セラミックには図 5.2-1 のようなコーティングを施してある。励起光入射面には誘電体多層膜による無反射コーティング (AR coat) が施されており、ヒートシンクとの接合面側には、励起光を反射させるための高反射コーティング (HR coat) が施されている。いくつかの文献から推測し、HR coat の下面には、chromel を厚さ 400 nm、Au を厚さ 300 nm で蒸着した。chromel はヒートシンクとの接合の際にハンダから HR coat を保護し、Au の蒸着を容易にする。Au は In と合金になりやすく、接着剤の役割も果たす [32] [33]。

接合には直径 6.3 mm、厚さ 300 μm の 3 at.%Yb³⁺:Lu₂O₃ セラミックに AR coat, HR coat, Chromel, Au を蒸着して使用している。

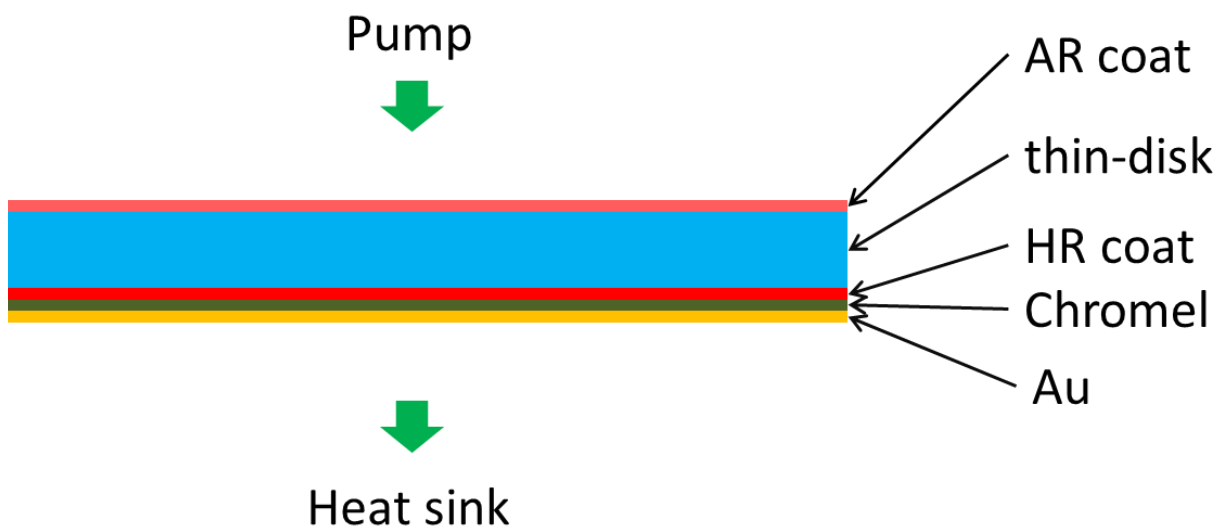


図 5.2-1 thin-disk セラミックのコーティング

それぞれの金属の熱伝導率を表 5.2-1 に示す。In-Sn ハンダの熱伝導率は他の金属と比べて低い値となっている。したがってハンダ層の厚さは可能な限り薄くすることが冷却効率を低下させないために必要である。

表 5.2-1 各金属の熱伝導率 [34] [35]

	chromel	Au	In-Sn	Cu
Thermal conductivity [W/mK]	94	319	34	403

5.2.2. 接合方法

ハンダ付け接合方法について述べる。ここでは、最適と考えられる接合方法のみ記述し、その他に試行した接合方法や結果は、私の卒業論文に掲載されている [36]。なお、ここで行ったハンダ付け接合は thin-disk セラミックが高価で、条件出しのために多数用いることができなかつたため、厚さ $150\ \mu\text{m} \pm 10\ \mu\text{m}$ 、一辺 $5\ \text{mm} \pm 1\ \text{mm}$ のカバーガラスに AR coat, HR coat, Chromel, Au を蒸着して代用した。

先に、ハンダ付けに使用するハンダとフラックスについて説明する。

ハンダは In:Sn=50:50、融点約 120°C 、厚さ約 $50\ \mu\text{m}$ のフィルム状ハンダを使用した。誘電体多層膜コーティングを保護するために低融点ハンダを選んでいる。これを一辺 $5\ \text{mm}$ の正方形に切り出して使用する。

フラックスは、大洋電機産業株式会社 BS-65B である。詳細な成分については企業秘密であり調べられなかつた。フラックスとは、ハンダ付けの際にハンダの基板への広がりをもよくする薬品である。同時に基板を化学的に洗浄し、ハンダの酸化を防ぐといった 3 つの役割がある。

ヒートシンクには無酸素銅を使用し、板状($20\ \text{mm} \times 20\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$)に切り出し、表面を $10\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, $3\ \mu\text{m}$ のラッピングシートで順番に研磨する。研磨後にヒートシンク表面をアセトン洗浄した。

表面の面形状を干渉計で観測すると図 5.2-2 となった。暗条件になっているため、干渉縞が見えない。したがって、研磨後のヒートシンクの面形状は平面になっていると考えられる。

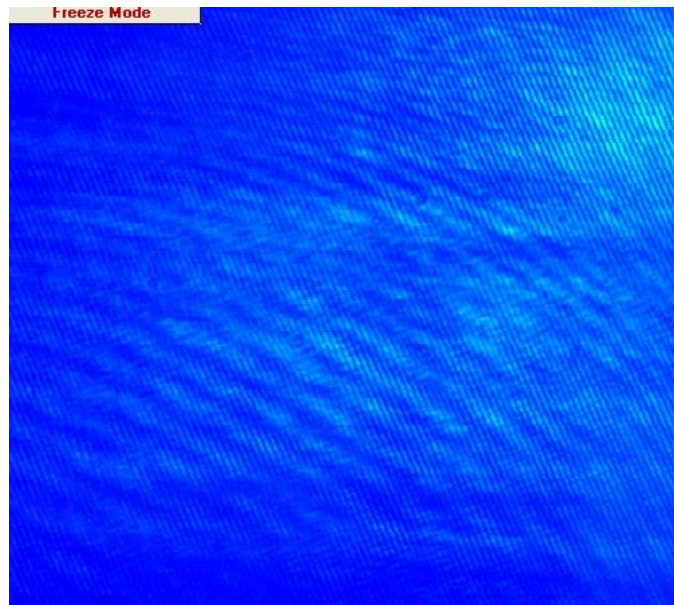


図 5.2-2 ヒートシンクの干渉縞

以上をまとめると、ハンダ付けを行う前は図 5.2-3 のような状態になっている。

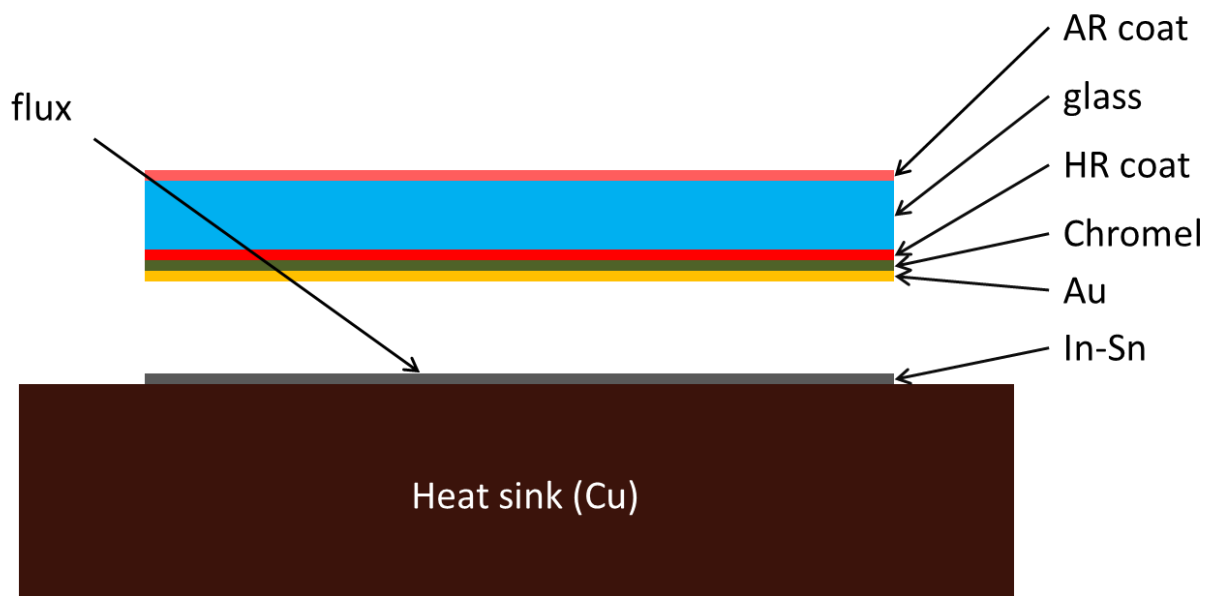


図 5.2-3 ハンダ付け接合前のカバーガラスの状態

接合を行う前に、マイケルソン干渉計で平面高反射鏡とカバーガラスの干渉縞を観測すると図 5.2-4 になった。同心円上の干渉縞が観測できたことから、曲率半径を持っていることがわかった。カバーガラスは市販品で表面研磨を行っていない、適当なサイズへカットをしている。また、カバーガラスの薄さなど様々な要因が重なり、曲率半径を持っていると考えられる。接合はカバーガラスが曲率半径を持っていることを承知のうえで、干渉縞が接合後に変化しないように接合することを目標として行った。

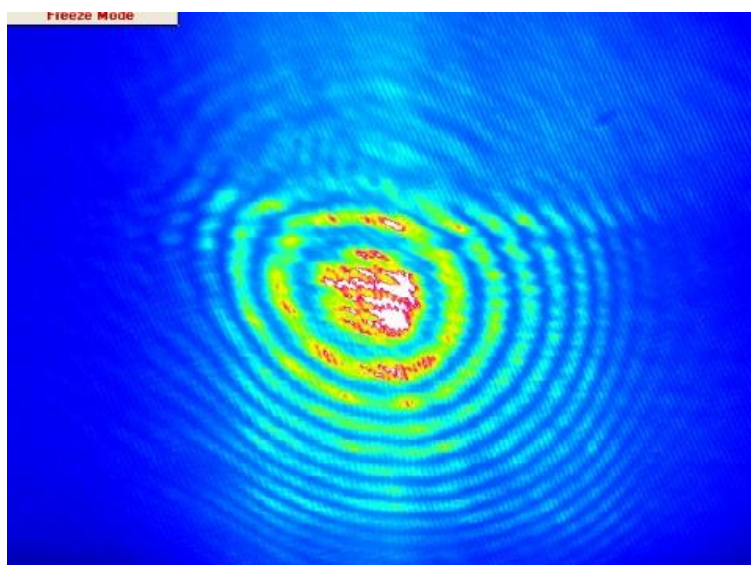


図 5.2-4 ハンダ付け接合前のカバーガラスの干渉縞

そして、以下の方法で接合を行った。

- ① ハンダを溶かすヒーターには温度 On/Off 式のセラミックヒーターを使用する。In-Sn ハンダの融点 120 °C より高めの約 150 °C に設定し、全体が温まるまで時間をおく。
- ② ヒーターにヒートシンクのみを乗せ加熱し、十分に温まったらフラックスを塗り、In-Sn ハンダを薄く広げる。thin-disk が収まる大きさまで広がったらヒーターから降ろし冷却する。
- ③ 一度アセトンで表面を洗浄し、再びヒーターに乗せる。十分に温まったらフラックスを塗る。thin-disk セラミックを乗せ、ヒートシンクとの間に気泡が残らないようにピンセットで thin-disk セラミックを少し動かす。
- ④ ヒーターから静かに降ろし自然冷却する。

以上の手順をフローチャートにまとめると図 5.2-5 となる。

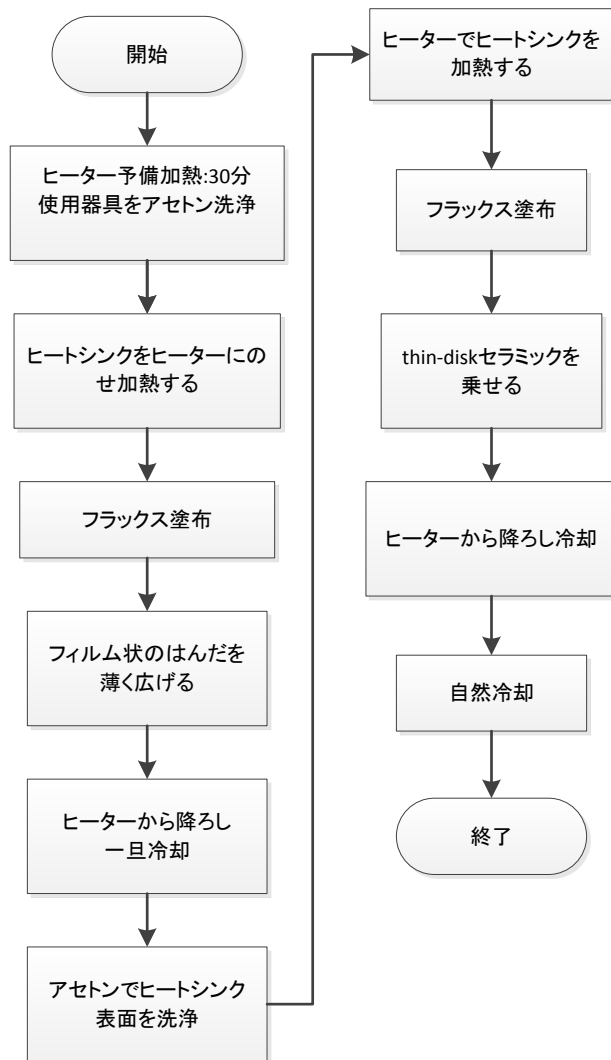


図 5.2-5 接合手順フローチャート

5.2.3. 接合結果

接合後の平面高反射鏡とカバーガラスの干渉縞を観測したところ図 5.2-6 のようになった。マイクロメータで測った接合層の厚さは約 $40\ \mu\text{m}$ であった。接合前後で、干渉縞の間隔がほぼ変化していないことから、曲率半径がほぼ変化していないと考えられる。よって、ヒートシンクと接合したことによる曲率変化は小さいと考えられる。接合に使用したカバーガラスは厚さ $150\ \mu\text{m}$ と薄い、曲率変化をほぼ与えずに接合することができた。ハンダ付け接合に用意した thin-disk セラミックは厚さ $300\ \mu\text{m}$ と厚いため、カバーガラスよりも強度があ

ると考えられる。よって、はじめから thin-disk セラミックの面形状が平面であれば、ハンダ付け接合後も面形状に変化のない接合が可能であると考えられる。

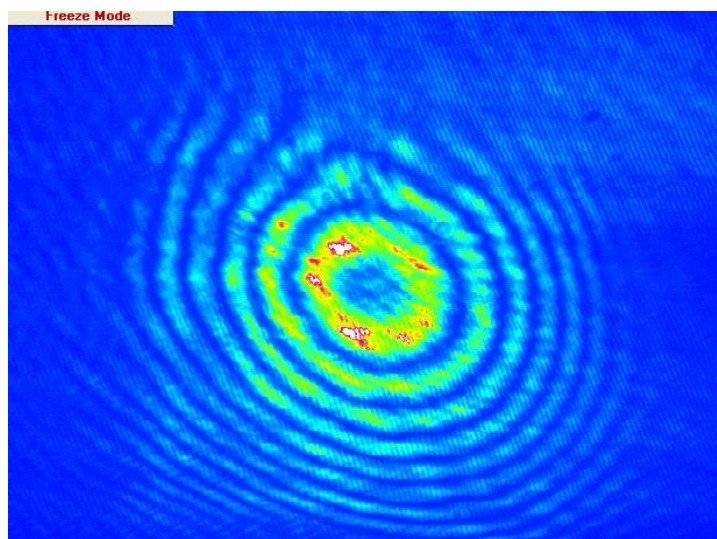


図 5.2-6 ハンダ付け接合後のカバーガラスの干渉縞

5.2.4. thin-disk セラミックへの応用

カバーガラスで行った接合方法を thin-disk セラミックに応用し、ハンダ付け接合を行う。接合方法はカバーガラスのときと全く同じであるため、ここでは省略する。

接合は直径 $6.3\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、厚さ $300\text{ }\mu\text{m} \pm 10\text{ }\mu\text{m}$ の 3 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックで行った。

図 5.2-7 は接合前に干渉縞を観測したものである。わずかにあおりをつけた画像になっているが、面形状は平面であることが確認できる。このセラミックをハンダ付け接合する。

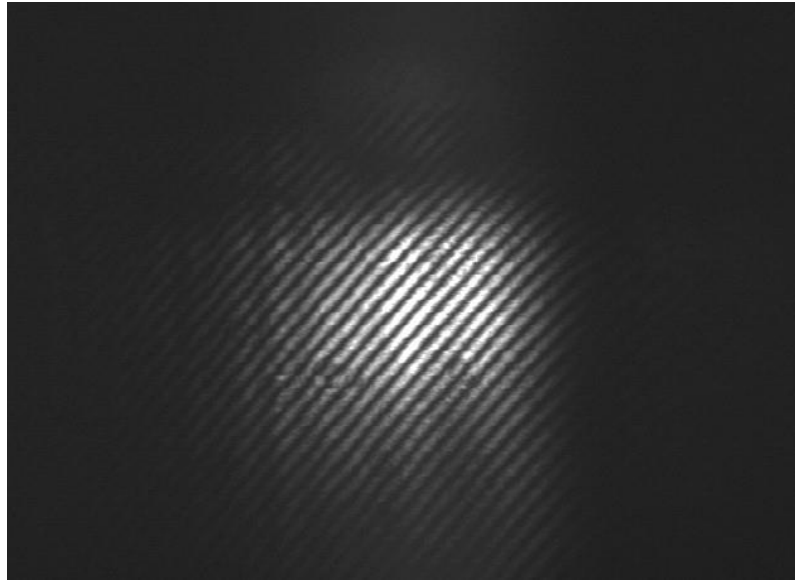


図 5.2-7 ハンダ付け接合前の thin-disk セラミックの干渉縞

ハンダ付け接合後の干渉縞が図 5.2-8 である。干渉縞の変化がほぼないことから面形状の変化も小さいと考えられる。マイクロメータで測った接合層の厚さは約 30 μm であった。

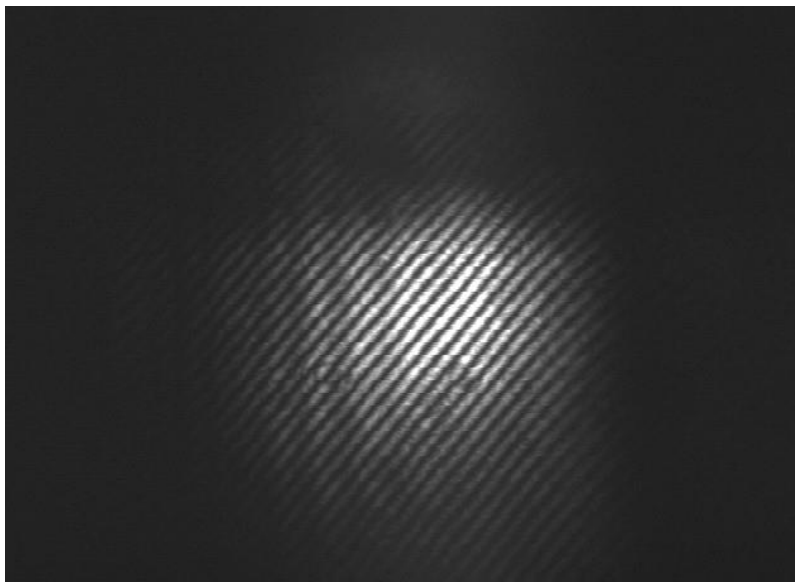


図 5.2-8 ハンダ付け接合後の thin-disk セラミックの干渉縞

図 5.2-9 はハンダ付け接合した thin-disk セラミックの写真である。ヒートシンク中央に接合されている様子が分かる。この thin-disk セラミックを自作マルチパス励起モジュールに組み込み、CW レーザー発振を行った。

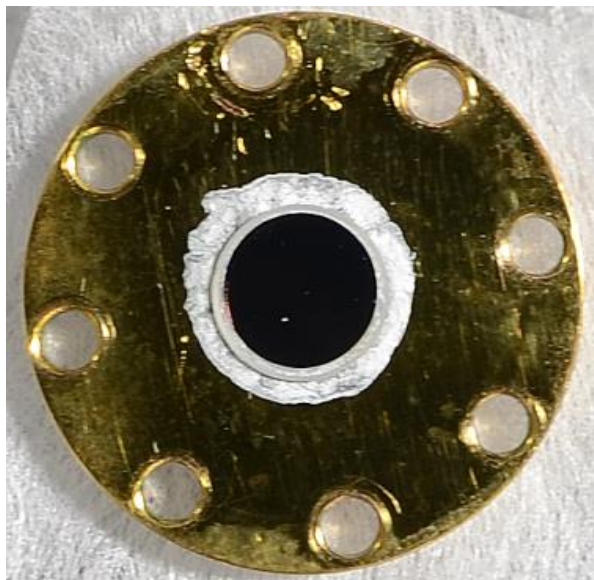


図 5.2-9 ハンダ付け接合後の thin-disk セラミック写真

5.3. 接着剤接合方法

5.2 ではハンダ付け接合について述べたが、ここでは接着剤を用いた接合方法について述べる。接着剤接合は **chromel**、**Au** の蒸着の必要がなく、穏やかに硬化させることで、**thin-disk** セラミックへの影響が小さいといった利点がある。

5.3.1. 接着剤の選定

本研究では 2 組の接着剤について接合を行った。

使用した接着剤は以下の 2 組である。接着剤を選ぶにあたり

- 粘性の大きさ
- 使用波長で吸収がない
- 硬化条件

の 3 つの項目に注目した。

粘性の大きさはヒートシンクに滴下した時の接着剤の広がりに影響を与える。粘性が大きいと接着剤が薄く広がらず、接合層が厚くなり冷却効率の低下、不均一な接合につながってしまう。

接着剤は励起波長、レーザー波長での吸収がないことが求められる。**thin-disk** セラミック裏面には高反射コーティングをしてあるが、わずかに光が透過してくる。その光を吸収してしまうと、発熱し冷却効率の低下、材料の破壊につながってしまうためである。

硬化条件は低温で時間をかけて硬化することが求められる。**thin-disk** セラミックに施したコーティング層に影響を与えないようにするためと、硬化するときに残留応力を逃がすためにゆっくりと硬化することが重要である。

以上の条件を考慮し、本研究では表 5.3-1 に示す接着剤を選択した。

表 5.3-1 使用した接着剤

	接着剤1	接着剤2
種類	2液混合	2液混合
粘性 [cPs]	350～550	225～425
透過率	>97% @700～1600 nm	>99% @400～1200 nm
硬化条件	100°C 10分	80°C 3時間

どちらの接着剤も2液混合タイプであり、本研究ではA液、B液と呼称して使用した。粘性はどちらの接着剤も数百 cPs となっている。透過率は使用波長では97%以上と高い透過率を有している。接着剤1は100°Cで10分間加熱すると硬化する。接着剤2は80°Cで3時間加熱すると硬化する。

5.3.2. 接合方法

接着剤はハンダに比べると粘性が大きくヒートシンクに乗せた時に薄く広がらない。そのため、上から均一に thin-disk セラミックに圧力をかけて接着させる装置を使用した。

図 5.3-1 に使用した装置を示す。セラミックヒーターに乗せた thin-disk セラミックを、面精度 $\lambda/20$ のオプティカルフラットで上から押さえる。押さえるときの圧力は、バネ定数のわかっているバネの長さの変化から計算する。それと同時に上面からレーザー光を照射し、オプティカルフラットと thin-disk セラミックの干渉縞を観測する。上から押さえた時の干渉縞変化がないようにあおりを調整、均一に圧力をかける。

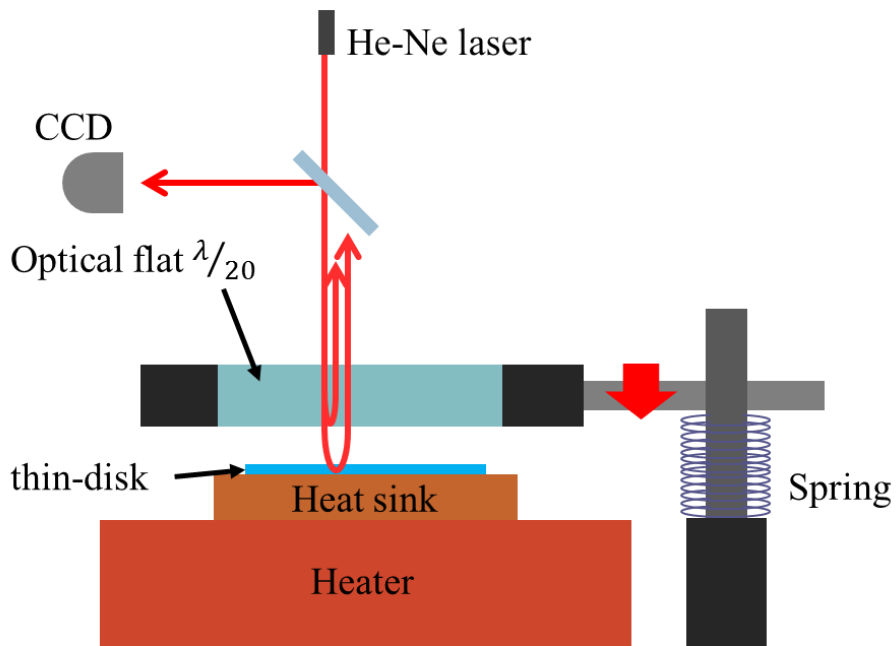


図 5.3-1 接合装置

接着剤接合の場合も thin-disk セラミックを多数用いることができないため、カバーガラスで代用して、条件出しの実験を行った。

接合方法について以下に述べる。

- ① 接着剤 A 液を電子天秤で重さを計り、一定重量シャーレに滴下する。
- ② 接着剤 B 液を定められた混合重量比になるように重さを計り、それらを混ぜ合わせる。この時に気泡が入らないように注意する。
- ③ マイクロピペットを使用して滴下する混合液の容量を測り、ヒートシンクに滴下する。
- ④ 気泡が入らないように注意し、混合液の上からカバーガラスを静かに乗せる。
- ⑤ ヒーターに乗せ、オプティカルフラットで押しながら、硬化条件の温度で加熱する。

5.3.3. 接合結果

用意した2つの接着剤のうち、接着剤2は実験中に保存期限を過ぎてしまったため、硬化して使用できなくなりました。そのため、ここからは接着剤1について接合を行った結果である。

混合液の滴下量を5~2 μl に設定した試料を作成したが、接合時に thin-disk セラミックから混合液がはみ出してしまい接合ができなかった。マイクロピペットの最小容量が2 μl であり、それより少ない滴下量は誤差が大きくなっていることを承知のうえで実験を行っていった。

図 5.3-2 は滴下量をおおよそ1 μl に設定して接合した試料の接合後の顕微鏡写真である。接合時に加えた圧力は約60000 N/m^2 であった。接着剤の滴下量が多いと、ヒートシンクとカバーガラスの間に気泡が残ってしまっている。この原因として、2液混合時に空気が混入し、それが抜けずに残っていたこと、カバーガラスを乗せた時に混入した、などいくつか考えられる。この対策として真空条件下で接合を行うことが考えられるが、接合装置の大きさや接合精度の問題で現段階ではできなかった。

気泡が残留

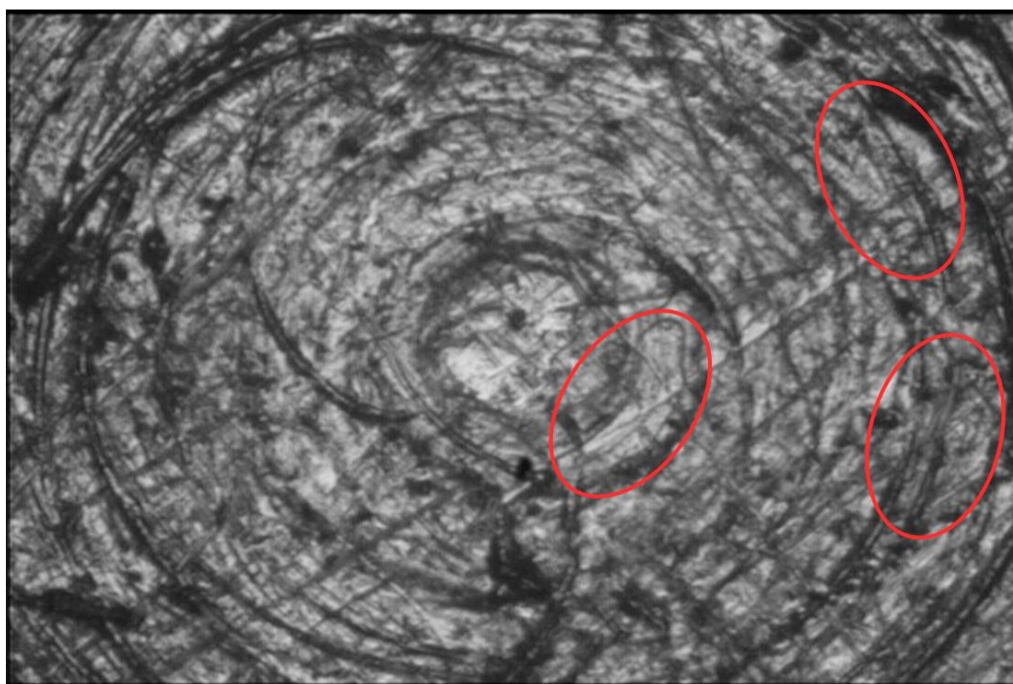


図 5.3-2 接着剤接合後カバーガラスの顕微鏡写真

図 5.3-3 は接着剤の滴下量をおおよそ $0.1 \mu\text{l}$ に設定した試料の接合前の顕微鏡写真である。ヒートシンクとカバーガラスの間に気泡が入っていないことが確認できる。その後接合を行った。

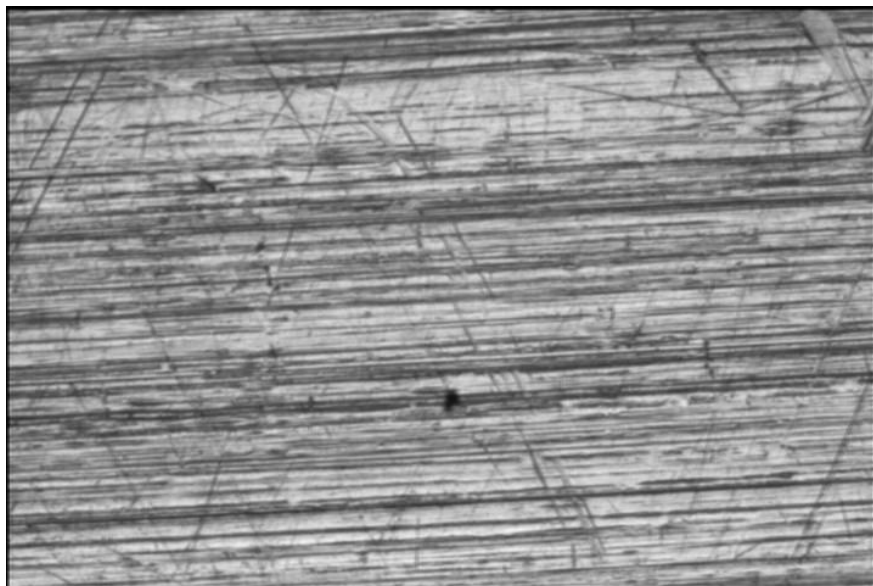


図 5.3-3 接着剤接合前カバーガラスの顕微鏡写真

図 5.3-4 は接合後の試料の顕微鏡写真である。接合時に加えた圧力は約 60000 N/m^2 である。図 5.3-2 とは違い、接合後であっても気泡が存在しない事が確認できる。カバーガラスの乗せ方やその他の条件は同じであるため、滴下量を少なくしたことが良い接合につながったのではないかと考えられる。

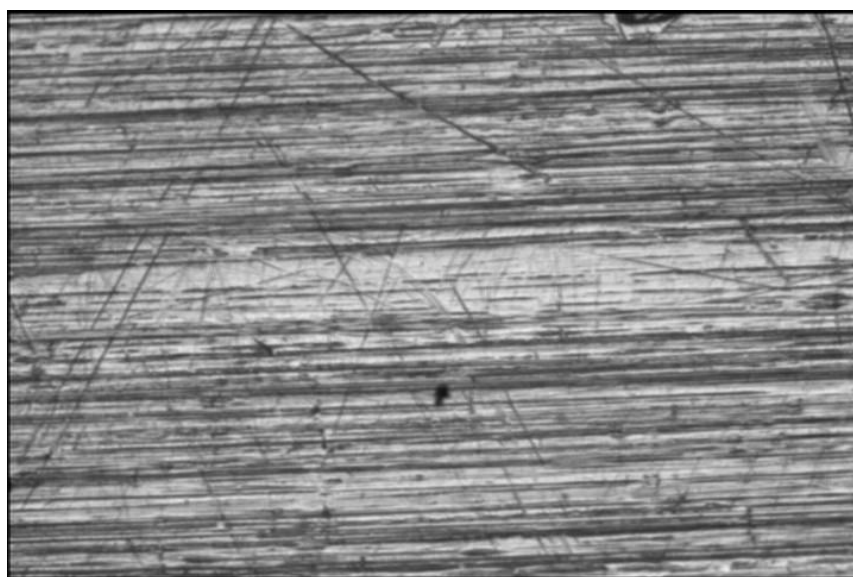


図 5.3-4 接着剤接合後カバーガラスの顕微鏡写真

5.3.4. thin-disk セラミックへの応用

カバーガラスで行った接合方法を thin-disk セラミックに応用し、接着剤接合を行う。接合方法はカバーガラスのときと同じであるため、ここでは省略する。接合は直径 $6.3\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、厚さ $250\text{ }\mu\text{m} \pm 10\text{ }\mu\text{m}$ の 3 at. %Yb³⁺:Lu₂O₃ セラミックで行った。接合前に thin-disk セラミックの面形状を確認するため、干渉縞観測を行った。

図 5.3-5 にマイケルソン干渉計での、接合前の thin-disk セラミックと高反射鏡の干渉縞を示す。干渉縞は赤線枠内に生じている。マイケルソン干渉計の暗条件になっているため画像ではほとんど確認することが難しい。干渉縞から、thin-disk セラミックの面形状はほぼ平面であると考えられる。中心部には同心円上の干渉縞が観測された。この干渉縞は高反射鏡を無くし、thin-disk セラミックのみを見た場合でも観測された。

同心円上の干渉縞について考える。式(2-17)から曲率半径を計算すると約 30 mm となった。この曲率半径を検証するため、thin-disk セラミックにレーザー光を照射し反射光の広がりを観測した。面形状が凹面であれば反射光に集光点があると考えられるが、それは確認できなかった。凸面であればビームの広がりが起こると考えられるが、それも確認できなかった。そのため thin-disk セラミックの面形状はほぼ平面ではないかと考えられる。この干渉縞については現在のところ原因が判明していない。

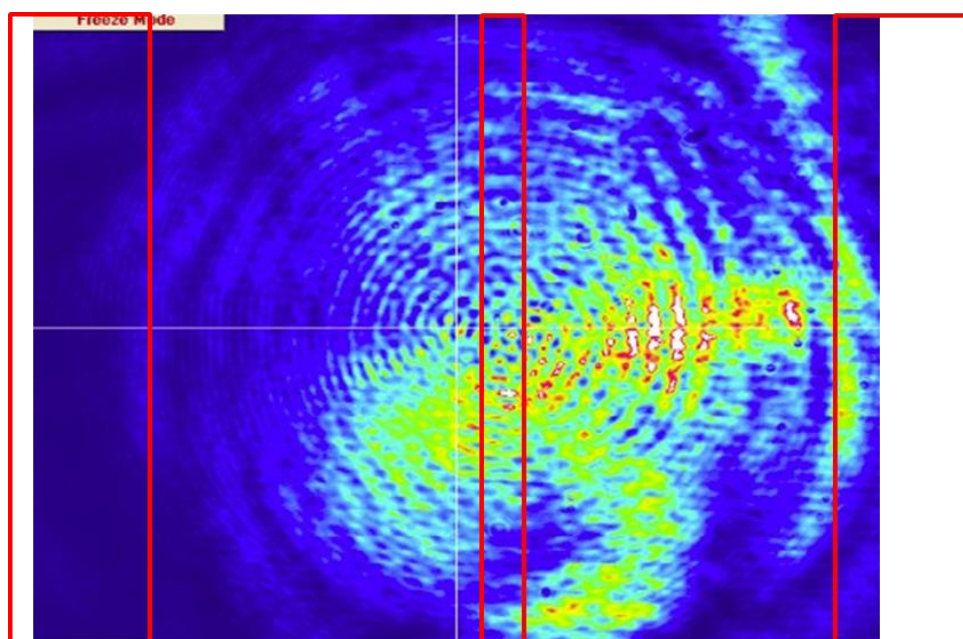


図 5.3-5 接着剤接合前の thin-disk セラミックの干渉縞

図 5.3-6 に接着剤接合後のオプティカルフラットと thin-disk セラミックの干渉縞を示す。接合時に加えた圧力は約 60000 N/m^2 である。オプティカルフラットとの干渉縞は赤線内に生じている。接合前と比べて、同様の干渉縞が観測されたことから接合後も thin-disk セラミックの面形状は変化せず、平面であると考えられる。

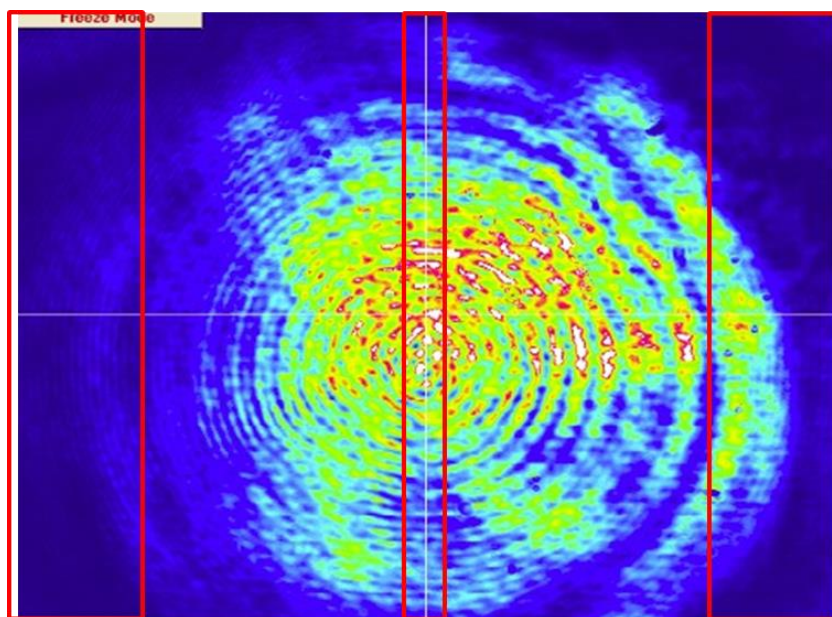


図 5.3-6 接着剤接合後の thin-disk セラミックの干渉縞

接合層の厚さについて検証する。マイクロメータで接合層の厚さを求めようとしたが、測定限界を超えていたため測れなかった。そこで、接着剤の滴下量から接着後の接合層の厚さを計算する。

ここでは、接着剤は thin-disk セラミック全体に均一に広がっていると仮定する。マイクロピペットから接着剤の滴下量を $0.1 \mu\text{l}$ とすると、体積では $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ である。そこから thin-disk セラミックの面積で割り、厚さを求めると、約 300 nm となる。接着剤の滴下量が正確に求められないため誤差は大きいですが、ハンダ付け接合よりも非常に接合層が薄く接合されていると考えられる。接着剤はハンダに比べ熱伝導率が低いですが、接合層の厚さが薄いため、その影響は小さいと考えられる。

図 5.3-7 は接着剤接合した thin-disk セラミックの写真である。ヒートシンク中央に接合されている様子が分かる。接着剤が thin-disk セラミックの直径からはみ出している様子は確認されていない。

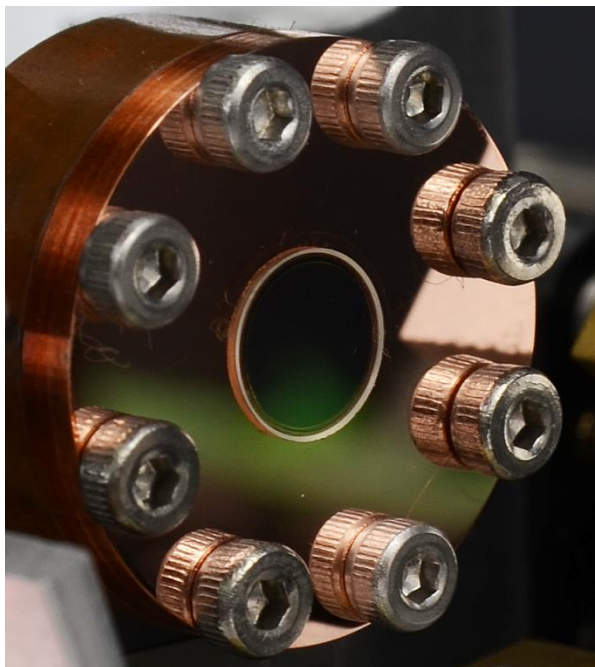


図 5.3-7 接着剤接合後の thin-disk セラミック写真

接着剤を用いた接合の場合でも、thin-disk セラミックの面形状をほぼ変化させることなく接合することができた。また、仮定の多い計算ではあるが、接合層の厚さも $1\ \mu\text{m}$ 以下とハンダ付け接合よりも非常に薄い接合ができているため、接合層による冷却効率の低下は抑えられている。

これを自作マルチパス励起モジュールに取り付け、レーザー発振を行った。

6. CW レーザー発振

前章で行った 2 種類の接合方法で thin-disk セラミックを接合し、レーザー発振実験を行った。

6.1. ハンダ付け接合レーザー発振実験

6.1.1. 実験方法

5.2 のハンダ付け接合方法で接合した thin-disk セラミックを使用し、レーザー発振を行った。

図 6.1-1 に実験配置図を示す。利得媒質に直径 $6.3 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 、厚さ $300 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ 、3 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックを使用した。In-Sn ハンダで無酸素銅製ヒートシンクに接合し、自作の 16 パスのマルチパス励起モジュールに取り付けた。励起光源には、波長 974 nm 、コア径 $200 \mu\text{m}$ 、 $\text{NA}=0.22$ のファイバー結合型のレーザーダイオード(以下、LD)を用い、 $f=10 \text{ mm}$ のレンズと $f=75 \text{ mm}$ の放物面鏡で、ディスク上においてビーム径 1.7 mm (実測値)に集光した。曲率半径 500 mm 、透過率 3%の凹面の出力透過鏡(OC)を用いて、共振器長 300 mm の直線共振器を構築した。

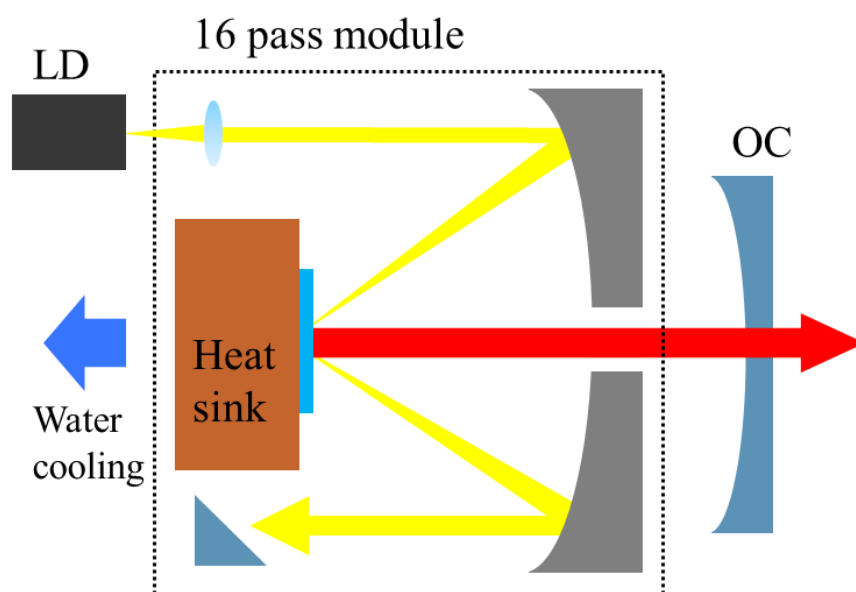


図 6.1-1 実験配置図

6.1.2. 結果

図 6.1-2 に入出力特性を示す。35 W 励起時に最大出力 10.1 W、スロープ効率 50%、最大光-光変換効率 28.5%が得られた。発振波長は約 1034 nm であった。

thin-disk セラミックを LD の出力 P_{in} で励起した時に、折返しミラーでの励起光の出力を P_{med} とする。折り返した時に同じ割合で thin-disk セラミックが励起光を吸収したと仮定すると 16 パスで励起光を吸収させた時の、吸収できなかった LD 出力 P_{res} は

$$P_{res} = P_{in} \times \left(\frac{P_{med}}{P_{in}} \right)^2 \quad \dots (6-1)$$

と表すことができる。そこから励起光吸収効率 P_{abs} を

$$P_{abs} = \frac{P_{in} - P_{res}}{P_{in}} \times 100 \quad \dots (6-2)$$

で計算する。式(6-2)から P_{abs} を見積もると約 70%であった。これが光-光変換効率の低い原因と考えられる。光-光変換効率の飽和が見られないため出力はまだ上がると考えられるが、吸収効率が低く戻り光による LD の破壊を防ぐため、これ以上の励起は止めておいた。

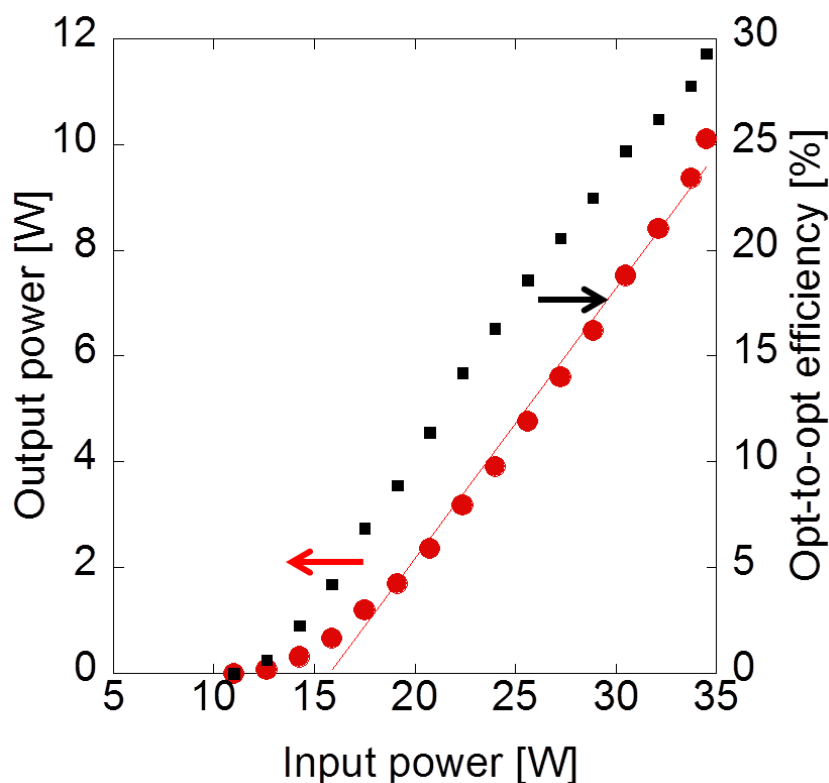


図 6.1-2 入出力特性

図 6.1-3 にレーザー発振スペクトルを示す。波長 1034 nm を中心にマルチ縦モード発振となっている。このスペクトルの原因は thin-disk セラミックにあると考え、検証を行った。

距離 d の間隔で構成したエタロンを仮定すると、その縦モード間隔 $\Delta\lambda$ は

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nd} \dots (6-3)$$

で表される。発振波長 $\lambda=1034$ nm、屈折率 $n=1.92$ 、エタロン間隔 $d=300$ μm と仮定し、式(6-3)からエタロンの縦モード間隔を計算すると 0.9 nm となる。この計算結果は、3つのスペクトルピークの縦モード間隔と合致している。さらに、thin-disk セラミックの厚さと同じであることから、セラミック表面と裏面でのエタロンと考えられる。

マルチ縦モード発振を解消するために thin-disk セラミックにわずかに角度 (0.5° 以下)をつける必要がある。今後、超短パルス動作を目指した thin-disk セラミックには、その角度をつけて使用する予定である。

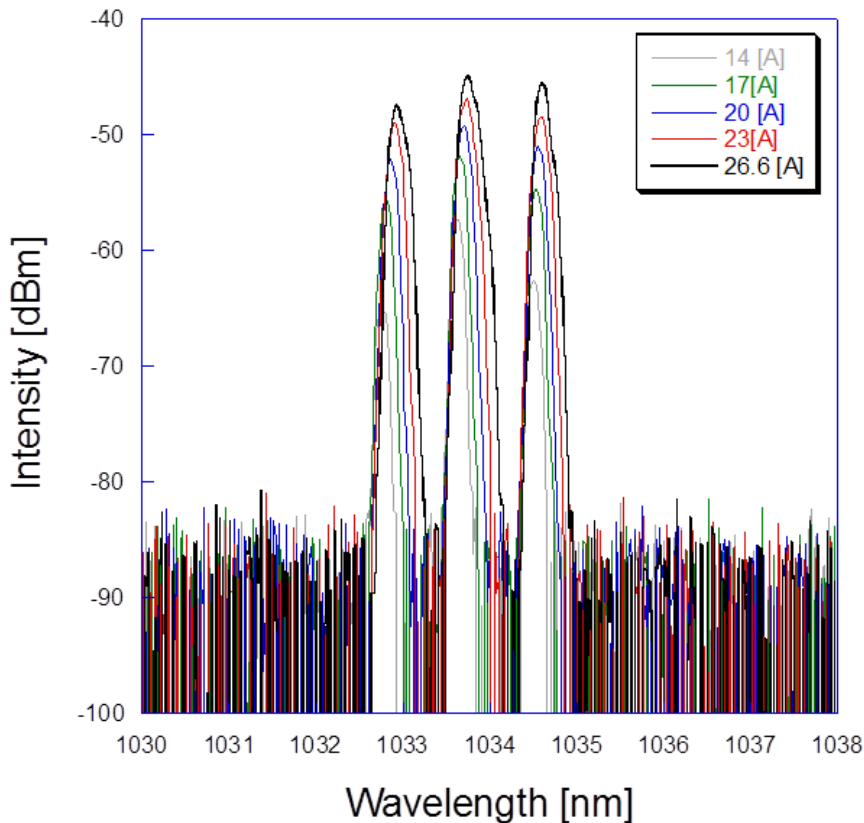


図 6.1-3 発振スペクトル

励起光吸収効率が低かった原因として、LD の発振波長が $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の吸収スペクトルと合っていないことが考えられる。

図 6.1-4 に LD の発振波長と $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の吸収スペクトルを示す。 $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ は波長 976 nm に非常に狭い吸収スペクトルを持っている。励起に使用した LD は中心波長約 974 nm である。よって、LD の発振波長が $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の 976 nm の吸収スペクトルと重なっていないため、吸収効率が悪かったと考えられる。そのため、励起に使用する LD の変更を行った。

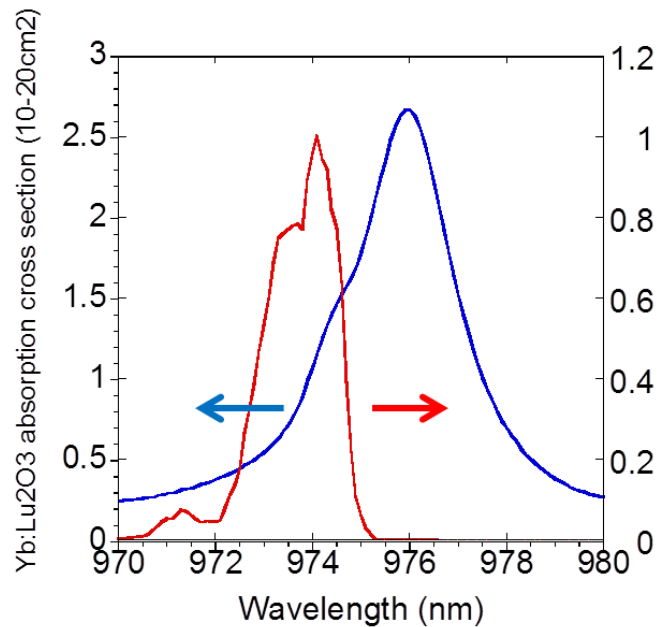


図 6.1-4 $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の吸収断面積と LD の発振波長

6.1.3. LD の変更

新たな光源には発振波長 976 nm、コア径 200 μm 、 $\text{NA}=0.22$ のファイバー結合型 VBG ロックレーザーダイオード(以下、VBG ロック LD)を用いた。図 6.1-5 に入出力特性を示す。入力 60 A のとき最大出力 120 W を得ることができる。

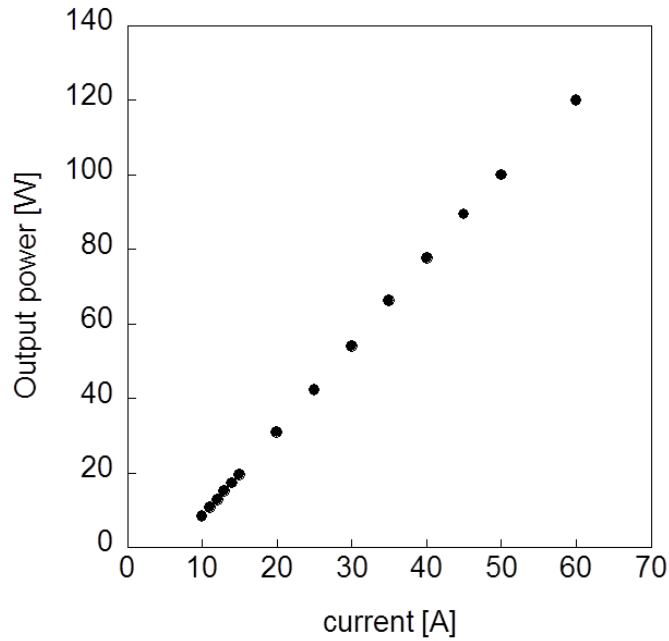


図 6.1-5 VBG ロック LD の入出力特性

図 6.1-6 に VBG ロック LD の発振スペクトルを示す。入力電流が小さい時は、波長 976 nm よりも短波長側にわずかに波長成分が残っている。入力電流を大きくすると完全に VBG ロックがかかり、波長 976 nm の単一ピークを持つレーザとなっている。

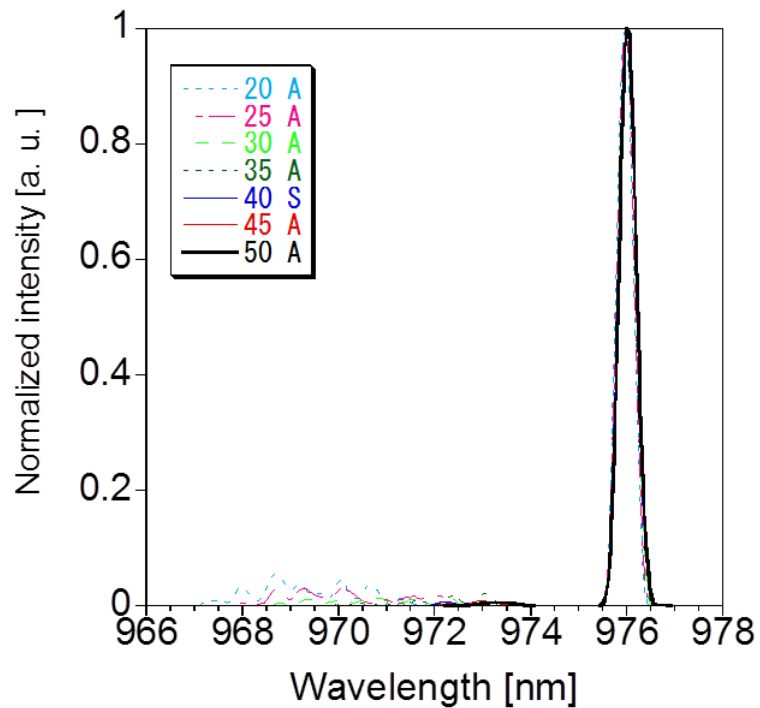


図 6.1-6 VBG ロック LD の発振スペクトル

図 6.1-7 に 50 A 入力時の VBG ロック LD の発振波長と $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の吸収スペクトルを示す。VBG ロック LD の発振波長は 976 nm に鋭いピークを持つ。 $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の吸収スペクトルと比べると、その中に十分に重なるような線幅である。そのため、以前励起に使用していた LD よりも効率的な励起が可能であると考えられる。

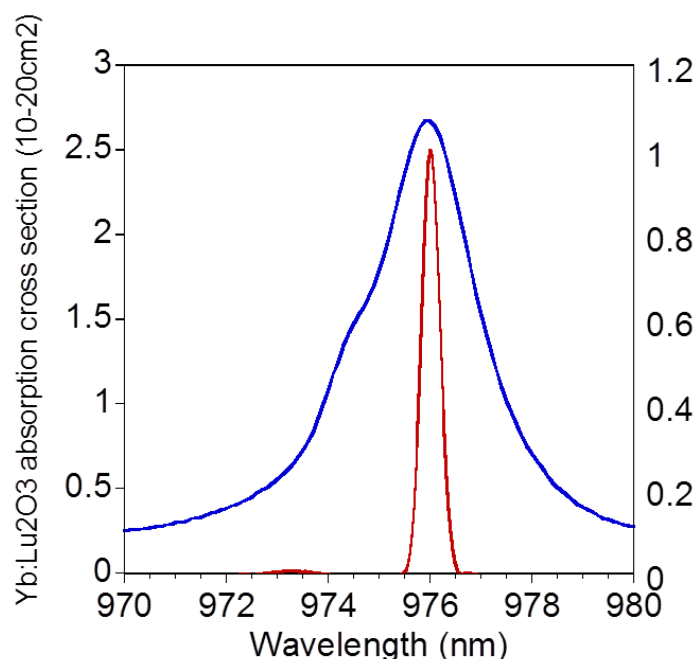


図 6.1-7 $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の吸収断面積と VBG ロック LD の発振波長

VBG ロック LD 波長で、励起光吸収効率を以前と同様に見積もると図 6.1-8 になる。入力 30 W 以上のレーザー発振が起こってからは、励起光吸収効率は >98% となっている。入力 40 W のときに多少吸収効率が下がっているが、測定誤差であると思われる。VBG ロック LD で励起光吸収効率の改善が達成されたため再度レーザー発振を行った。

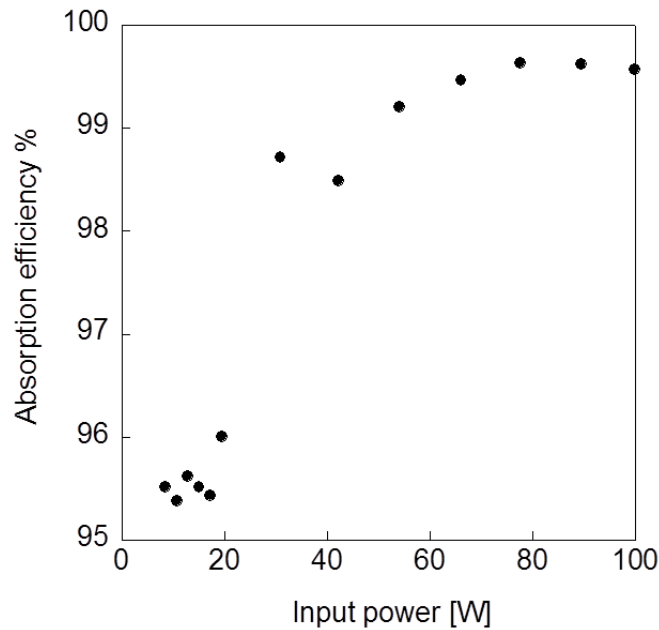


図 6.1-8 励起光吸収効率

6.1.4. LD 変更後の結果

LD 変更後のマルチパス励起モジュールは図 6.1-1 と同じである。共振器長のみ 350 mm としてレーザー発振を行った。

図 6.1-9 は VBG ロック LD に変更後の入出力特性である。出力透過鏡の透過率 3%、5% の 2 つについて示している。

出力透過鏡の透過率 3% のとき、最大出力 45.1 W、スロープ効率 53%、光-光変換効率 45.1%、 $M^2=6.2$ である。

出力透過鏡の透過率 5% のとき、最大出力 42.3 W、スロープ効率 49%、光-光変換効率 42.3%、 $M^2=4.3$ である。

2 つの出力透過鏡を比べて透過率 3% のときの方が高出力であった要因として M^2 の違いが考えられる。 M^2 が大きいほうがマルチモード発振となり、励起しているスポットを十分に使えたため、出力も大きかったと考えられる。励起密度は 4.4 kW/cm^2 であるが、thin-disk の破壊は起こっていない。

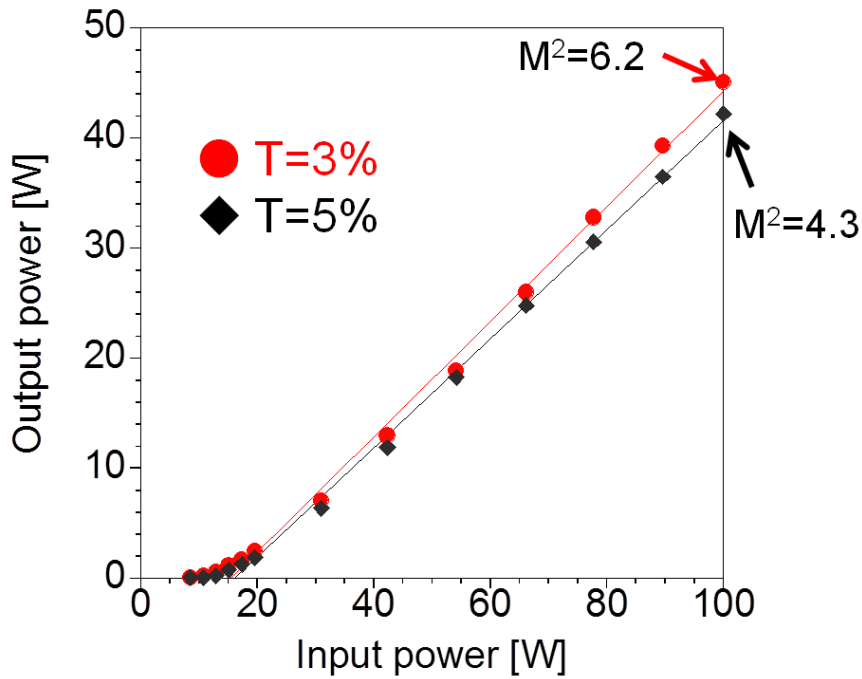


図 6.1-9 入出力特性

図 6.1-10 にレーザーの発振スペクトルを示す。波長 1034 nm 付近を中心にマルチ縦モード発振となっている。これは、図 6.1-3 での考察と同様、thin-disk セラミックの表面と裏面でエタロンが構成されてしまったことが原因と考えられる。

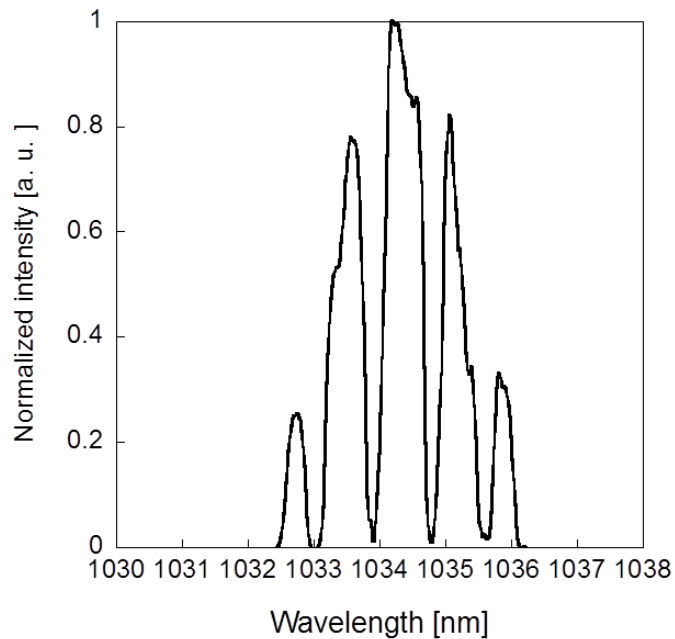


図 6.1-10 発振スペクトル

透過率 3%、5%の出力透過鏡を比べて、3%のときの方が高出力であった。そのため出力透過鏡の透過率は 3%とし、共振器長の最適化を行う。

共振器の最適化を行う前に、自己無撞着法で、thin-disk セラミックの TEM₀₀ モードのビーム径の計算を行った。

図 6.1-11 は曲率半径 500 mm の凹型出力透過鏡で直線型共振器を構成した時の TEM₀₀ モードのビーム径の共振器長依存性である。共振器長 250 mm の時に一番ビーム径が大きくなる。TEM₀₀ モードのビーム径が最大ということは、シングルモード発振に一番近いということである。そのため、M²が小さくなると予想される。この結果を考慮し、共振器長 250、350、450 mm の共振器を構成した。

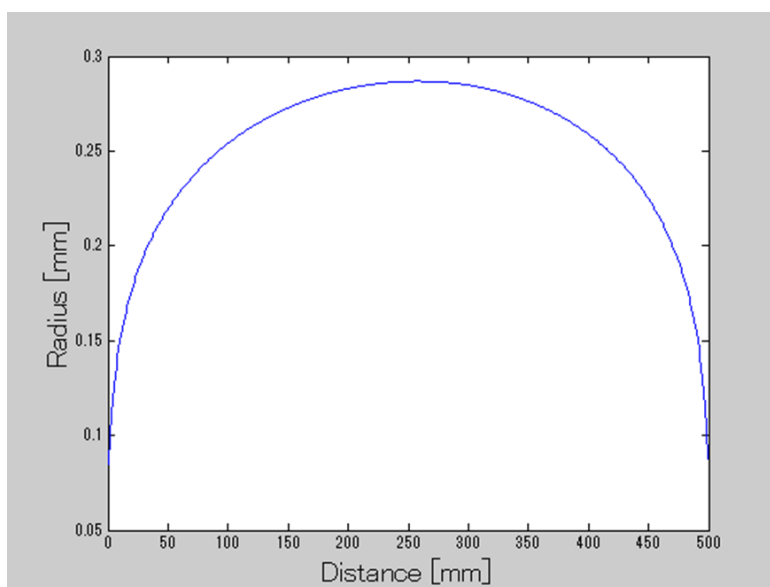


図 6.1-11 TEM₀₀モードの thin-disk セラミックの上でのビーム径の共振器長依存性

図 6.1-12 は出力透過鏡の透過率 3%の時の、共振器長依存性である。

共振器長 250 mm のとき、最大出力 34.3 W、M²=3.2

共振器長 350 mm のとき、最大出力 45.1 W、M²=7.6

共振器長 450 mm のとき、最大出力 44.4 W、M²=6.2

である。このときの M²を比べると、共振器長 250 mm の時が最小で、共振器長 350 mm のときが最大である。M²が大きいということは、最も多くのモードが発振しているため共振器長 350 mm が出力最大であったと考えられる。

図 6.1-13 に共振器長 350 mm の時の、レーザー光のビームプロファイルを示す。M²が大きいため、多くのモードが重なり合っていると考えられる。周りの

青枠は検出素子によるものである。

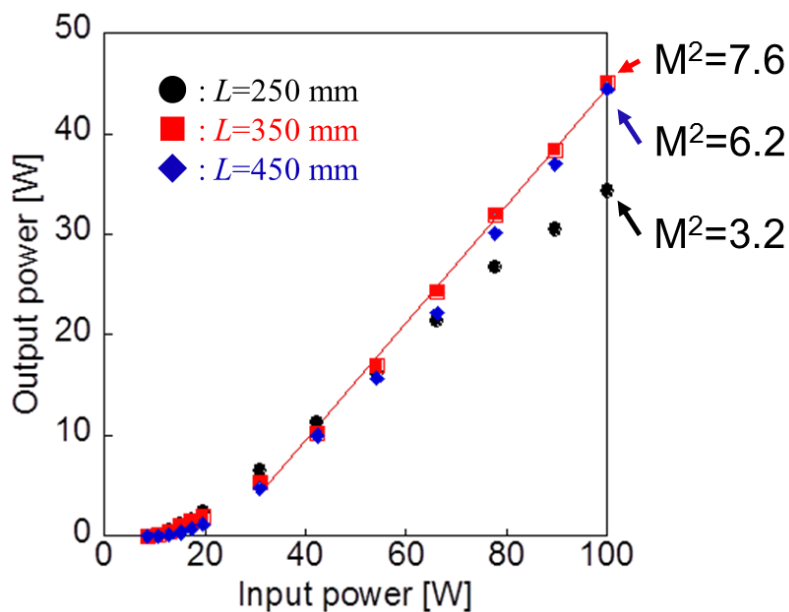


図 6.1-12 入出力特性

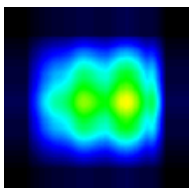


図 6.1-13 共振器長 350 mm の時のレーザー光のビームプロファイル

図 6.1-14 に光・光変換効率の共振器長依存性を示す。共振器長 250 mm の時は変換効率の飽和が見られるが、共振器長 350、450 mm の時は 100 W 励起でも変換効率の飽和は見られない。現在のところ、励起に用いた LD の出力にレーザー出力が制限されている。よって、より高出力な励起を行えばさらなる高出力動作が可能であると考えられる。

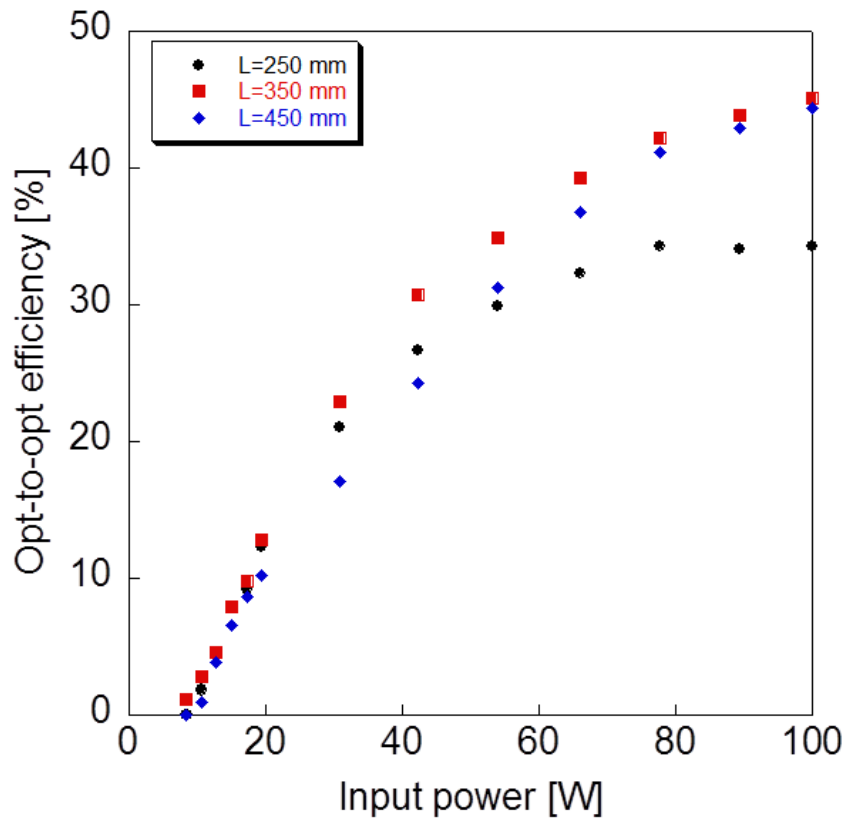


図 6.1-14 光-光変換効率

6.2. 接着剤接合レーザー発振実験

6.2.1. 実験方法

5.3 の接合方法で thin-disk セラミックを接合し、マルチパス励起モジュールに組み込みレーザー発振を行った。

図 6.2-1 に実験配置図を示す。光学系の構成は 6.1 の時と同じである。利得媒質に直径 $6.3 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 、厚さ $250 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ 、3 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックを使用した。接着剤でヒートシンクに接合し、自作の 16 パスマルチパス励起モジュールに取り付けた。励起光源には、波長 976 nm の VBG ロック LD を用い、ディスク上でビーム径 1.7 mm (実測値)に集光した。曲率半径 500 mm 、透過率 3%の凹面の出力透過鏡(OC)を用いて、共振器長 350 mm の直線共振器を構築した。

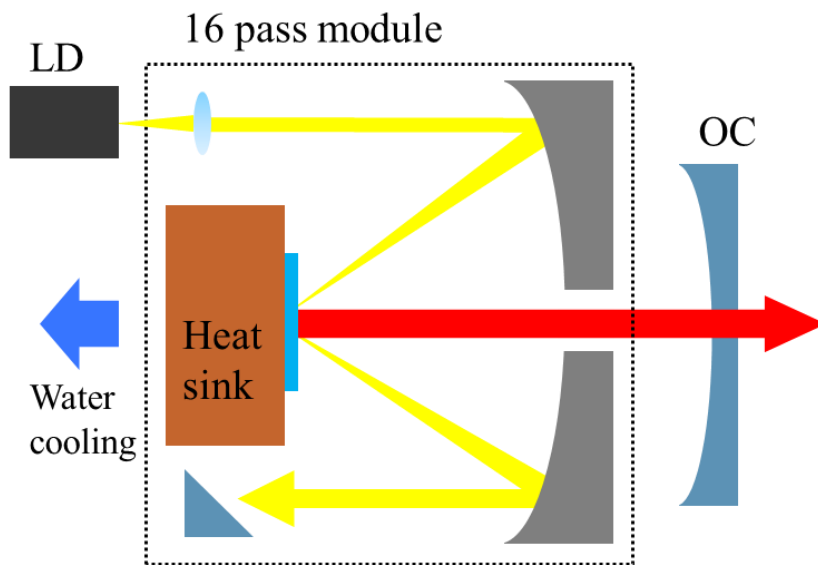


図 6.2-1 実験配置図

6.2.2. VBG ロック LD の出力低下

接着剤接合した thin-disk セラミックで CW レーザー発振を行う際に、励起光源とした VBG ロック LD の出力が低下する問題が発生した。

図 6.2-2 に出力の変化を示す。以前は最大出力 120 W であったのに対し、出力低下後は最大 80 W にまで落ちている。レーザー発振しきい値は出力低下前後で差がなく、スロープ効率のみ下がっている。LD 素子自体の劣化が原因であれば、レーザー発振しきい値も高くなってしまふと考えられる。しかし、そのような傾向は見られないためこの出力低下の原因として、VBG ロック LD 内部のオプティクス調整が悪くなってしまったことが考えられる。実験中、諸事情により、LD を設置している光学定盤を移動させる必要があった。その際の振動で LD 内部のオプティクスがずれてしまったのではないかとと思われる。

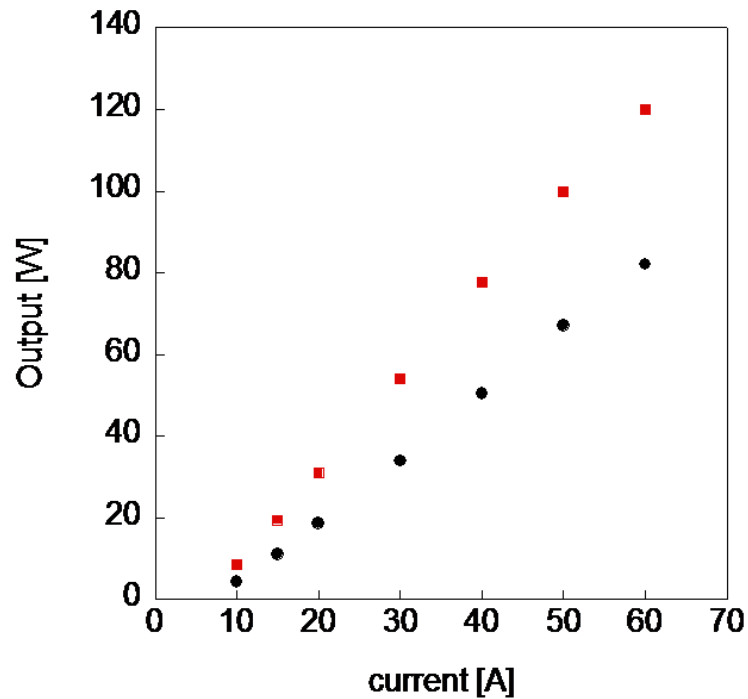


図 6.2-2 VBG ロック LD の出力低下

図 6.2-3 に入力電流 60 A の時の VBG ロック LD の発振スペクトルを再度測定した結果を示す。図 6.1-6 と比べて、波長 976 nm よりも短波長側にスペクトル成分が増加している。長波長側にも多少成分が表れている。LD の仕様上、分解して内部オプティクスを再調整することは不可能であったが、代替りの LD が用意できなかったため LD は変更せずに使用した。

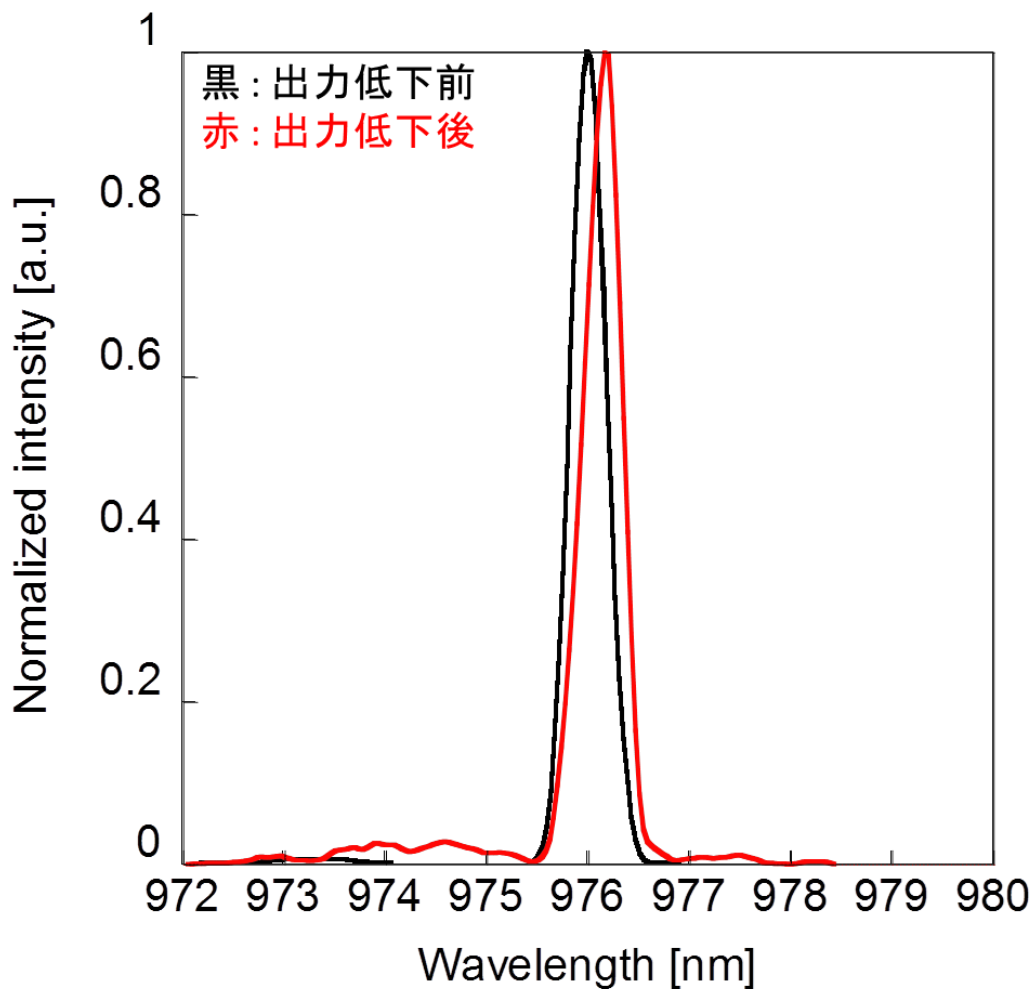


図 6.2-3 VBG ロック LD の発振スペクトルの変化

6.2.3. 結果

図 6.2-4 に入出力特性を示す。共振器長を変えて測定したが、出力はほぼ同じであった。共振器長 250 mm の時、最大出力 34.5 W、スロープ効率 57.1%、光-光変換効率 42.1%、 $M^2=8.7$ を達成した。励起密度は 3.6 kW/cm^2 にもなるが、出力の不安定性は見られないため、現在は励起光の出力でレーザー出力が制限されている。この時のレーザー光のビームプロファイルが図 6.2-5 である。 M^2 が大きいと多くのモードが重なり合っている。周りの青枠は検出器素子の影響で見えている。図 6.2-6 に共振器長の時の光-光変換効率を示す。最大励起時には変換効率の飽和が見られるため、最大効率でレーザー発振が起きていると考えられる。

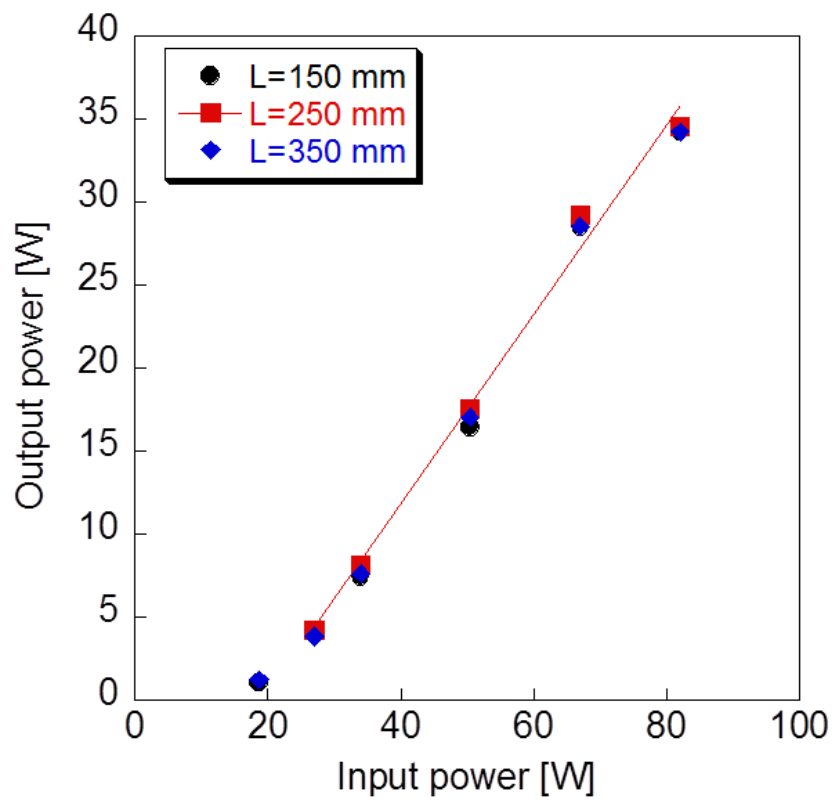


図 6.2-4 入出力特性

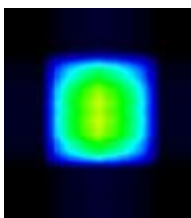


図 6.2-5 共振器長 250 mm でのレーザー光のビームプロファイル

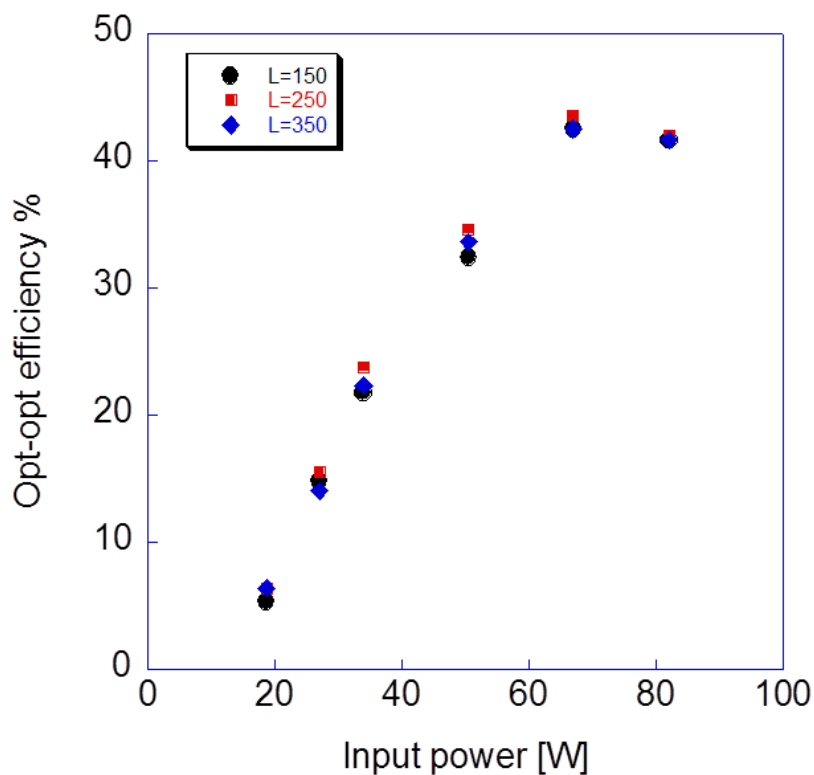


図 6.2-6 光-光変換効率

6.3. thin-disk セラミックの温度上昇評価

ハンダ付け接合、接着剤接合した thin-disk セラミックを励起した時の、励起スポットの温度変化をサーモグラフィカメラで測定した。使用したサーモグラフィカメラは FLIR SC655® (FLIR 社)である。実験配置図を図 6.3-1 に示す。マルチパス励起モジュールの斜め方向約 20 cm の距離にサーモグラフィカメラを設置して測定した。図 6.3-2 にサーモグラフィカメラで取得した、励起中の thin-disk セラミックの画像である。thin-disk セラミック中心部が温度上昇している様子がわかる。

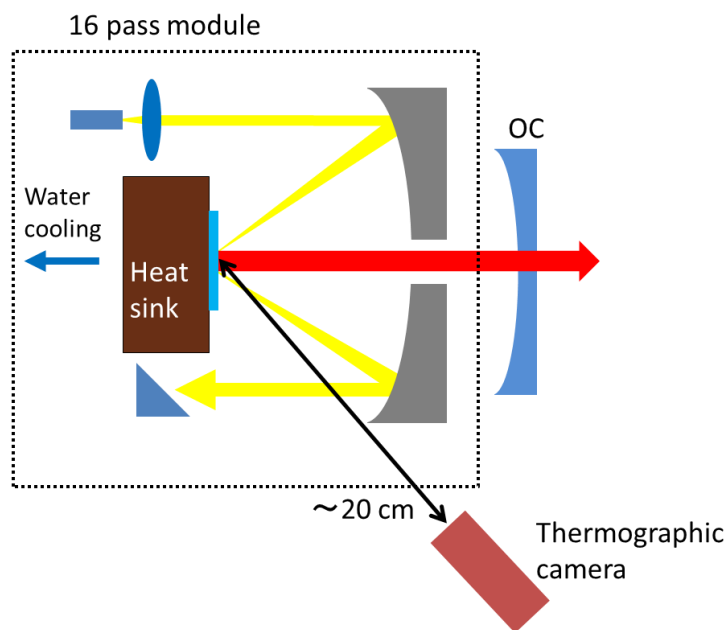


図 6.3-1 実験配置図

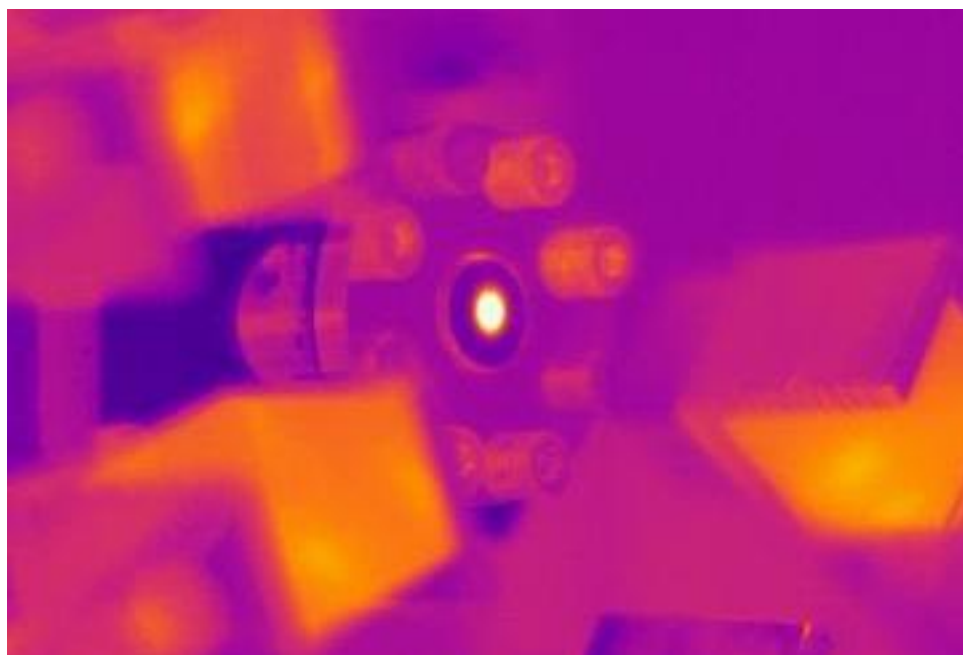


図 6.3-2 thin-disk セラミックのサーモグラフィ画像

図 6.3-3 に VBG ロック LD の出力に対する温度変化を示す。ただし、VBG ロック LD の出力がさらに低下したため、最大 64 W 励起となっている。ハンダ付け接合した thin-disk セラミックは 64 W 励起時に 62.3°C まで温度が上昇した。接着剤接合した thin-disk セラミックは 54.8°C まで温度が上昇した。

thin-disk セラミックの厚さや接合層の厚さが違うため、それぞれの熱抵抗で考えることにする。熱抵抗 R は材料の厚み d [m] と熱伝導率 κ [W/mK] から、 $R = d/\kappa$ [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] で求めることができる。

ハンダ付け接合の場合、thin-disk セラミックと In-Sn ハンダの熱伝導率から熱抵抗を求めると、 2.2×10^{-5} [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] となる。

接着剤接合の場合、接着剤の熱伝導率はわからなかったが、熱伝導接着剤の熱伝導率を参考に、それらよりも小さいと仮定し 1 W/mK とする。そこから thin-disk セラミックと接着剤の熱抵抗を求めると、 1.8×10^{-5} [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] となる。

よって、接着剤接合した thin-disk セラミックは、ハンダ付け接合した thin-disk セラミックに比べて熱抵抗が小さいため、温度上昇が緩やかであったと考えられる。

この測定に関してはまだ検証を始めたばかりであるため、これから詳細な評価を行っていく。

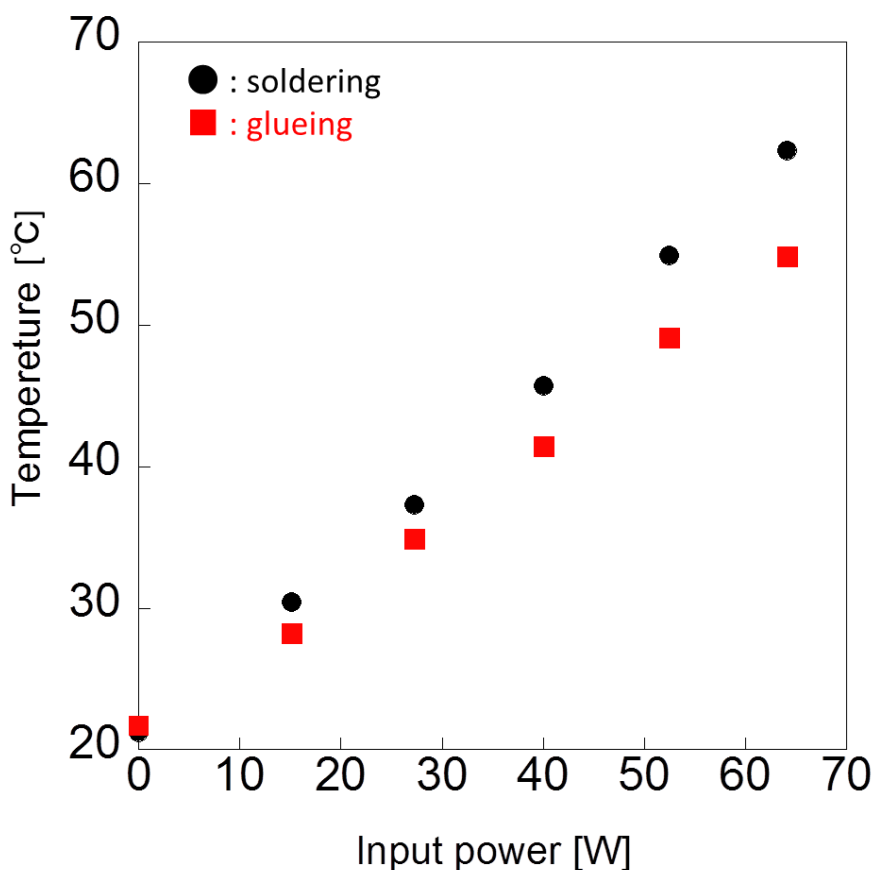


図 6.3-3 励起スポット上での thin-disk セラミックの温度変化

7. まとめ

本研究では、利得媒質に Yb^{3+} 添加 Lu_2O_3 セラミックを用い、熱伝導率測定、接合方法の確立、CW レーザー発振を行った。

フラッシュ法を用いて、 $3 \text{ at.}\% \text{Yb}^{3+} \cdot \text{Lu}_2\text{O}_3$ thin-disk セラミックの熱伝導率を測定した。熱伝導率 14 W/mK と Yb^{3+} イオン添加時にも高い値を維持していた。これは単結晶のそれよりも高い値となっている。

thin-disk の接合に関して、我々独自の 2 種類の接合方法の確立を行った。ハンダ付け接合では接合層の厚さ約 $30 \mu\text{m}$ の薄さで thin-disk セラミックの接合を行うことができた。接着剤接合では接合層の厚さ約 $1 \mu\text{m}$ 以下の薄さで接合することができた。

CW レーザー発振では 2 種類の接合方法で接合した試料について行った。

ハンダ付け接合の場合、出力透過鏡の透過率 3%、 100 W 励起で出力 45.1 W 、スロープ効率 58.6%、光・光変換効率 45.1%、 $M^2=7.6$ のレーザー発振を得た。

接着剤接合の場合、出力透過率 3%、 82 W 励起で出力 34.5 W 、スロープ効率 57.1%、光・光変換効率 42.1%、 $M^2=8.7$ のレーザー発振を得た。

どちらの接合法の場合でも thin-disk の破壊や、出力の不安定性などは一切確認されなかった。そのため、この独自の接合法は十分に有効な方法であると考えられる。

今後は、新たな高出力 LD を使用し、CW レーザー発振を行う予定である。また、thin-disk セラミックにエタロン防止の角度をつけて、超短パルス発振を行っていく。

本研究では $300 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m}$ の thin-disk セラミックを用いたが、より薄い厚さ $200 \mu\text{m}$ 以下のセラミックもいくつか準備している。これらのセラミックに関しては、16 パスの自作モジュールでは十分な吸収が得られないため、24 パスの励起モジュールの光学系を設計、開発を行う予定である。

参考文献

- [1] J. P. Gdrddn, H. J. Zeiger , C. H. Townes, Phys. Rev., **95**, 282 (1954).
- [2] T. H. Maiman, Nature, **187**, 494 (1960).
- [3] Y. Uehara, W. Sasaki, S. Saito E. Fujiwara, Y. Kato, M. Yamanaka, K. Tsuchida, and J. Fujita, Opt. Lett., **9**, 12 (1984).
- [4] T. Shoji, et. al., JJAP, **43**, L496 (2004).
- [5] R. H. Page, et. al. , Opt. Lett., **31**, 3 (2006).
- [6] A. A. Kaminskii, "Crystalline Lasers: Physical Processes and Operating", published from CRC-Press Inc., (1996).
- [7] J. Lu, M. Prabhu, J. Song, C. Li, J. Xu, K. Ueda, A. A. Kaminskii, H. Yagi, Appl. Phys. B, **71**, 469 (2009).
- [8] M. Tokurakawa, K. Takaichi, A. Shirakawa, K. Ueda, Opt. Exp., **14**, 12832 (2006).
- [9] M. Tokurakawa, K. Takaichi, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, A. A. Kaminskii, Phys. Lett., **90**, 071101 (2007).
- [10] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, A. A. Kaminskii, Opt. Lett., **32**, 3382 (2007).
- [11] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, A. A. Kaminskii, K. Beil, C. Kränkel, G. Huber, Opt. Exp., **20**, 10847 (2012).
- [12] O. Svelt, "Principles of Lasers", published by Springer Science+Business Mdeia, LLC, (2010).
- [13] D. E. Mccumber, Phys. Rev., **136**, A954 (1964).
- [14] W. F. Krupke, M. D. Chinn, J. E. Marion, J. A. Caird, S. E. Stokowski, J. Opt. Soc. Am. B, **3**, 102 (1986).
- [15] W. J. Parker, R. J. Jenkinsm, C. P. Butler, G. L. Abbott, J. Appl. Phys., **32**, 1679 (1961).
- [16] 霜田光一, "レーザー物理入門", 岩波書店, 25 (1983).
- [17] ヤリーヴーイェー, "光エレクトロニクス基礎編", 丸善株式会社 (2010).
- [18] 高市和則, 電気通信大学大学院 修士論文 (2002).
- [19] D. C. Brown, IEEE J. Q. Electron., **33**, 861.
- [20] A. J. Ramponi, J. A. Caird, J. Appl. Phys., **63**, 5476.

- [21] T. Yanagitani, H. Yagi, Y. Yamasaki, Japanese Patent, **10**, 101411 (1998).
- [22] M. Sekita, H. Haneda, S. Shirasaki, T. Yanagitani, J. Appl. Phys., **69**, 3709 (1991).
- [23] E. Nakazawa, S. Shionoya, Phys. Rev. Lett., **25**, 1710 (1970).
- [24] W. strek, L. Marciniak, A. Bednarkiewicz, A. Lukowiak, R. Wiglusz, D. Hreniak, Opt. Lett., **19**, 14083 (2011).
- [25] A. Lupei, V. Enaki, V. Lupei, C. Presura, A. Petraru., J. of Alloys Comp., **275-277**, 196 (1998).
- [26] A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, H. Opower, Appl. Phys. B, Photophys. Laser Chem., **58**, 365 (1994).
- [27] S. Erhard, A. Giesen, M. Karszewski, T. Rupp, C. Stewen, I. Johannsen, K. Contag, OSA Trends in Optical and Photonics, **34**,.
- [28] A. Giesen, J. Speiser, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, **13** (2007).
- [29] T. Südmeyer, C. Kränkel, C.R.E. Baer, O.H. Heckl, C.J. Saraceno, M. Golling, R. Peters, K. Petermann, G. Huber, U. Keller, Appl. Phys. B, **97**, 281 (2009).
- [30] S. V. Marchese, C. R. E. Baer, A. G. Engqvist, S. Hashimoto, D. J. H. C. Maas, M. Golling, T. Südmeyer, U. Keller, Opt. Lett. , **16**, 6397 (2008).
- [31] S. Ricaud, A. Jaffres, K. Wentsch, A. Sukanuma, B. Viana, P. Loiseau, B. Weichelt, M. Abdou-Ahmed, A. Voss, T. Graf, D. Rytz, C. Hönninger, E. Mottay, P. Georges, F. Druon, Opt. Lett., **37**, 3984 (2012).
- [32] C. C. Lee, S. Choe, Materials Science and Engineering, **A333**, 45 (2002).
- [33] C. C. Lee, C. Y. Wang, G. S. Matijasevic, Manufacturing Technology, **14**, 407 (1991).
- [34] 国立天文台, "理科年表", 丸善株式会社, 479, (2000).
- [35] E. Fawcett, Rev. of Mordern Phys., **60** (1988).
- [36] 稲垣達也, 電気通信大学 卒業論文 (2012).
- [37] V. Peters, A. Bolz, K. Petermann, G. Huber, J. Crystal Growth, **237-239**, 879 (2002).
- [38] R. Peters, C. Kränkel, S.T. Fredrich-Thornton, K. Beil, K. Petermann, G. Huber, O.H. Heckl, C.R.E. Baer, C.J. Saraceno, T. Südmeyer, U. Keller, Appl. Phys. B, **102**, 509 (2011).

図目次

図 2.1-1	吸収、自然放出、誘導放出	7
図 2.2-1	準 3 準位レーザーエネルギー準位図	8
図 2.4-1	フラッシュ法の概念図	10
図 2.4-2	温度上昇曲線	11
図 2.5-1	マイケルソン干渉計の概念図	12
図 2.6-1	ニュートンリングの概念図	14
図 3.1-1	セラミックの定義	16
図 3.2-1	Yb ³⁺ のエネルギー準位図	18
図 3.3-1	Yb ³⁺ :Lu ₂ O ₃ の吸収、放出断面積	19
図 4.1-1	マルチパス励起 thin-disk レーザーの概念図	22
図 4.2-1	自作マルチパス励起モジュールの設計	23
図 4.2-2	自作マルチパス励起モジュールの写真	24
図 5.1-1	マイケルソン干渉計構成図	26
図 5.1-2	HR の干渉縞	27
図 5.1-3	HR の干渉縞(あおり付き)	27
図 5.1-4	曲率 200 mm 凹面鏡の干渉縞	28
図 5.2-1	thin-disk セラミックのコーティング	29
図 5.2-2	ヒートシンクの干渉縞	31
図 5.2-3	ハンダ付け接合前のカバーガラスの状態	31
図 5.2-4	ハンダ付け接合前のカバーガラスの干渉縞	32
図 5.2-5	接合手順フローチャート	33
図 5.2-6	ハンダ付け接合後のカバーガラスの干渉縞	34
図 5.2-7	ハンダ付け接合前の thin-disk セラミックの干渉縞	35
図 5.2-8	ハンダ付け接合後の thin-disk セラミックの干渉縞	35
図 5.2-9	ハンダ付け接合後の thin-disk セラミック写真	36
図 5.3-1	接合装置	39
図 5.3-2	接着剤接合後カバーガラスの顕微鏡写真	40
図 5.3-3	接着剤接合前カバーガラスの顕微鏡写真	41
図 5.3-4	接着剤接合後カバーガラスの顕微鏡写真	41
図 5.3-5	接着剤接合前の thin-disk セラミックの干渉縞	42
図 5.3-6	接着剤接合後の thin-disk セラミックの干渉縞	43
図 5.3-7	接着剤接合後の thin-disk セラミック写真	44

図 6.1-1	実験配置図.....	45
図 6.1-2	入出力特性.....	46
図 6.1-3	発振スペクトル.....	47
図 6.1-4	$\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の吸収断面積と LD の発振波長.....	48
図 6.1-5	VBG ロック LD の入出力特性.....	49
図 6.1-6	VBG ロック LD の発振スペクトル.....	49
図 6.1-7	$\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の吸収断面積と VBG ロック LD の発振波長.....	50
図 6.1-8	励起光吸収効率.....	51
図 6.1-9	入出力特性.....	52
図 6.1-10	発振スペクトル.....	52
図 6.1-11	TEM ₀₀ モードの thin-disk セラミックの上でのビーム径の共振器長依存性.....	53
図 6.1-12	入出力特性.....	54
図 6.1-13	共振器長 350 mm の時のレーザー光のビームプロファイル.....	54
図 6.1-14	光・光変換効率.....	55
図 6.2-1	実験配置図.....	56
図 6.2-2	VBG ロック LD の出力低下.....	57
図 6.2-3	VBG ロック LD の発振スペクトルの変化.....	58
図 6.2-4	入出力特性.....	59
図 6.2-5	共振器長 250 mm でのレーザー光のビームプロファイル.....	59
図 6.2-6	光・光変換効率.....	60
図 6.3-1	実験配置図.....	61
図 6.3-2	thin-disk セラミックのサーモグラフィ画像.....	61
図 6.3-3	励起スポット上での thin-disk セラミックの温度変化.....	62

表目次

表 3.4-1	$\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ の熱特性.....	20
表 3.4-2	希土類酸化物、YAG の熱伝導率.....	21
表 5.2-1	各金属の熱伝導率 [34] [35].....	30
表 5.3-1	使用した接着剤.....	38

謝辞

本研究を行うにあたりお世話になった方々に、この場を借りて感謝の意を示したいと思います。

主指導教員の白川晃准教授には、本実験を行うにあたってのすばらしい環境、充実した設備の中でセラミックレーザー研究に携わる機会を与えていただいたことに、深く感謝いたします。また、研究に取り組む姿勢、多角的な物事の捉え方、その研究から一番主張していきたいことなど、はば広い視点でご指摘をいただくことで、多くを学ばせていただきました。お忙しいながらも私の研究に対する鋭いご指摘、助言を多く頂き、ここまで研究を進めていくことが出来ました。たいへん感謝しております。

これまで共に学校生活を送ってきた研究室のメンバーに感謝申し上げます。研究室の先輩後輩の垣根を作らず、お互いに意見を交換し合い、厳しい意見をいただきとても勉強になりました。また同期のメンバーには大学院の授業、就職活動など研究以外の面でも支えていただき、楽しい生活が出来ました。大変感謝しております。