

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04932

研究課題名（和文）光取り出し効率の向上による光励起型短波長遠赤外レーザーの高性能化

研究課題名（英文）Improving the performance of optically pumped short-wavelength far-infrared lasers by improving light extraction efficiency

研究代表者

中山 和也（Nakayama, Kazuya）

中部大学・工学部・准教授

研究者番号：40434584

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：核融合プラズマ研究の分野では、プラズマ中の電子密度や磁場分布を計測するために、素粒子物理学の実験分野では、ニュートリノ崩壊時に発生する光子の検出器を開発するために、波長50 μm帯の短波長遠赤外レーザーが強く求められている。しかし、この波長帯域で高出力かつシングルモード発振可能な遠赤外レーザーは未だ実現できていない。

本研究では、光取り出し効率を向上させたレーザー出力鏡を開発し、波長48 μm, 57 μm, 71 μm, 119 μmで発振する高出力かつシングルモードの光励起型短波長遠赤外レーザーを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遠赤外レーザーは、遠赤外領域における要素技術や計測システムの開発研究（検出器、光学素子、計測法など）および物理研究の有用な光源（分子分光研究、固体物性研究、核融合プラズマ研究など）としての幅広く利用されている。

本研究により得られる結果は、遠赤外レーザー光を必要とする多くの研究者にとって重要であり、各分野の学術研究の進展に貢献できるものである。また、レーザー発振の効率化はレーザー装置のダウンサイジングを可能にし、遠赤外レーザーの新しい応用の可能性を拓く。

研究成果の概要（英文）：In fusion plasma research, short-wavelength far-infrared (FIR) lasers with wavelengths around 50 μm are required to measure electron density and magnetic field distribution in plasma. In particle physics, similar lasers are needed to develop detectors for neutrino decay photon search experiments.

In this study, we have developed a laser output mirror with improved light extraction efficiency and have realized high-performance optically pumped short-wavelength FIR lasers at wavelengths of 48 μm, 57 μm, 71 μm, and 119 μm.

研究分野：レーザー工学

キーワード：遠赤外レーザー 炭酸ガスレーザー レーザー出力鏡

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

波長 25 μm ~ 1 mm, 周波数約 0.3 ~ 12 THz の遠赤外領域 (テラヘルツ領域とも呼ばれる) は, 光と電波の谷間に位置し開発が遅れていたが, その光は分子の回転や振動や結晶の構造変化に起因する特徴的な吸収スペクトルを持ち, 物質の透過性の良さから, 近年開発が進んでいる。この領域のレーザーとしては, 自由電子レーザー, 量子カスケードレーザー, 分子ガスレーザーがある。自由電子レーザーは, 高出力動作が可能であるが, 装置が大型で出力・周波数安定度が良くない。量子カスケードレーザーは, 小型であるが, 低温が必要で出力も小さい。分子ガスレーザーは, 波長の可変性はないが, 多くの発振線を持ち, 狭帯域性, 周波数安定性に優れた各種計測用光源として重要な役割を果たしている。

核融合プラズマ研究の分野では, 電子密度や磁場分布計測のために, HCOOH レーザー (波長 433 μm), HCN レーザー (波長 337 μm), DCN レーザー (波長 194 μm), CH₃OH レーザー (波長 119 μm) が干渉計や偏光計の光源として使用されている。現在, 核融合研究の最終目標である核燃焼プラズマを実証する計画 (ITER 計画) が国際協力によって進められている。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置では, 中心電子密度 21 乗の超高密度プラズマの生成に成功している。このような大型で高密度化したプラズマ装置では, プラズマへの適用条件や計測信号の大きさから, 従来よりも波長の短い, 波長 50 μm 帯の遠赤外レーザーを用いた新しい計測システムが必要とされている。また, 素粒子物理学の実験分野では, 宇宙背景ニュートリノ崩壊光子を検出し, そのエネルギーを測定するための研究プロジェクトが進められている。予測されるニュートリノ崩壊光子の波長は, 波長 50 ~ 90 μm の遠赤外領域にあり, 現在, 超電導トンネル接合素子検出器の開発が行われている。

波長 50 μm 帯が目玉される中, 光励起の 2 波長 CH₃OD レーザー (波長 48, 57 μm) を用いた新しい干渉・偏光計測システムを提案し, これまでに計測システムに必要な基盤要素の開発を進めてきた。しかしながら, この波長帯域で, 高出力かつシングルモード発振可能な短波長遠赤外レーザーは未だ実現できていない。

2. 研究の目的

遠赤外領域は, 利得曲線の幅が共振器の縦モード間隔に比べて狭いので, レーザー発振させるには, 共振器間隔を変化させて同調する必要がある。そのために, 縦モードについては一般にシングルモード発振している。よって, レーザーの高出力化と横モード (光の強度分布) の単一化が本研究の課題となる。計測用光源として利用するには, ビーム広がり少ないガウシアンビーム, 直線偏光出力, 高安定動作であることも要求される。これを実現するには, 光励起の導波管型遠赤外レーザー装置が適している。

本研究では, (1) アウトプットカップラー (レーザー出力鏡) の光取り出し効率を向上させることで高出力化し, (2) 導波管 (レーザー管) を細くすることで高次の横モード発振を抑え単一化する。いずれも目的の波長帯域 (波長 50 μm 帯) における研究例はない。高い光取り出し効率を得るには, 図 1 に示すように, 励起レーザー光を反射し, 遠赤外レーザー光を透過する誘電体多層膜の材料選択が重要になる。従来用いられてきた低屈折率材料である CaF₂, BaF₂, ZnSe, ThF₄ は, 目的の波長帯域では吸収による損失が大きい。そこで, 吸収の小さいヨウ化セシウム (CsI) 又は臭化セシウム (CsBr) を採用することで, 世界で初めて波長 50 μm 帯に最適化したアウトプットカップラーを開発する。

高出力かつシングルモードの短波長遠赤外レーザーが実現できれば, 核融合プラズマ研究の分野では, より高精度の電子密度や磁場分布計測が可能になり, 素粒子物理学の実験分野では, ニュートリノ崩壊光子検出器の開発に大いに役立つ。また, レーザー発振の効率化はレーザー装置をダウンサイジングでき, 遠赤外レーザーの新しい応用の可能性を拓く。

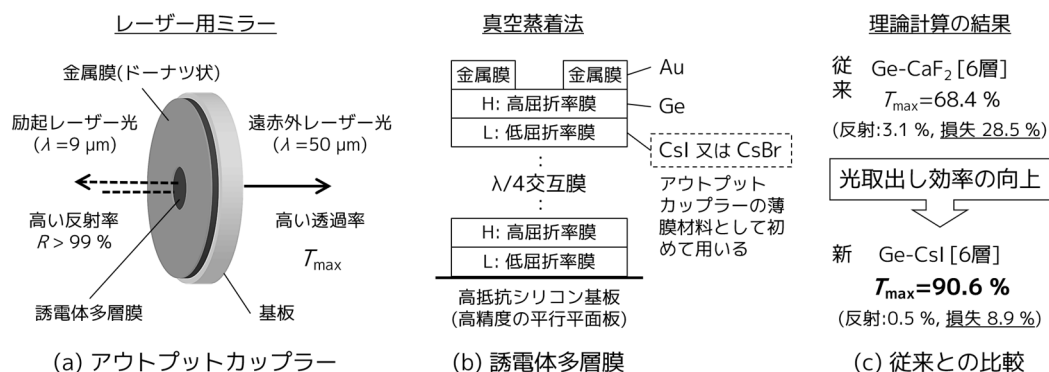


図 1. 光励起の遠赤外レーザー用アウトプットカップラーの開発

3. 研究の方法

本研究では、光励起の導波管型遠赤外レーザー装置を用いて、CO₂レーザー励起のCH₃ODレーザー（波長48, 57 μm）とCH₃OHレーザー（波長71, 119 μm）の高出力化とシングルモード化を試みた。アウトプットカップラーの最適化による出力増加の効果、レーザー管の細径化による高次横モードの抑制を明らかにするために、(1) 薄膜の光学定数測定、(2) アウトプットカップラーの設計・製作、(3) レーザー発振特性の測定、(4) レーザービーム品質の測定を行う。具体的な研究の方法を以下に示す。

(1) 薄膜の光学定数測定

光学薄膜の重要な特徴の一つは、同じ材料でもバルク形状のものとは特性が異なることである。そこで、高抵抗Si基板上に各種単層膜(Ge, CsI, ZnS)を蒸着し、遠赤外レーザーを用いて、アウトプットカップラーの設計に必要な薄膜の光学定数を測定する。

(2) アウトプットカップラーの設計・製作

測定した薄膜材料の光学定数を用いて、基板と誘電体多層膜の設計を行う。レーザー発振の最適化のために、透過率 T と反射率 R の比や遠赤外光の取出し径の異なるアウトプットカップラーを製作する。 T と R の実測値と理論計算による設計値とを比較し、アウトプットカップラーの最適設計を目指す。

(3) レーザー発振特性の測定

レーザー管とアウトプットカップラーをレーザー装置に取り付け、各種レーザー特性（波長、出力、偏光方向、圧力依存性、横モード、出力安定性）を測定する。

(4) レーザービーム品質の測定

ビームプロファイラーを用いて、レーザービームの強度分布を撮影し、各ビームパラメーター（ビーム幅、ビーム拡がり角、ビーム伝搬比(M²因子))を測定する。

4. 研究成果

(1) 薄膜の光学定数

本研究では、9P(36) CO₂レーザー励起の119-μm CH₃OHレーザー、9P(34) CO₂レーザー励起の71-μm CH₃OHレーザー、9R(8) CO₂レーザー励起の57-μm CH₃ODレーザー、9R(8) CO₂レーザー励起の48-μm CH₃ODレーザー用のアウトプットカップラーの設計・製作を行った。そのためには、励起レーザー光を反射し、遠赤外レーザー光を透過する誘電体多層膜の材料選択が重要になる。今回は、基板には高抵抗シリコン(Si)を、多層膜用の高屈折率材料としてゲルマニウム(Ge)を、低屈折率材料としてヨウ化セシウム(CsI)と硫化亜鉛(ZnS)を選択した。

アウトプットカップラーを設計するには、薄膜と基板の光学定数(屈折率 n と吸収係数 α)が必要となる。そこで、両面鏡面研磨加工(平行度5 μm以下、面精度 $\pm 1/2$ 以下)した高抵抗Si基板(抵抗率1 kΩ・cm以上、直径30 mm、厚さ2 mm)上に各単層膜(直径20 mm、厚さ2 μm)を蒸着し、遠赤外レーザー光の透過測定により、各単層膜の光学定数を求めた。また、触針式表面形状測定器により、膜厚と表面形状の測定も行った。表1に光学定数の測定結果を示す。薄膜とバルクの光学定数を比較すると、設計に必要な有効数字3桁程度であれば、屈折率はほぼ同じ値であったが、吸収係数は違いがあり、特にGeは桁違いの差があった(薄膜の方がバルクよりも大きい)。この原因の一つとして、薄膜がアモルファス化している可能性が考えられる。

表1. 遠赤外レーザー光に対するSi基板とGe, CsI, ZnS薄膜の光学定数

λ (μm)	Si		Ge		CsI		ZnS	
	n	α (/cm)	n	α (/cm)	n	α (/cm)	n	α (/cm)
47.661	3.4178	0.318	3.97	126	1.42	<0.1	3.56	388
57.1511	3.4177	0.332	3.98	154	1.40	<0.1	3.23	187
70.5116	3.4173	0.213	3.99	110	1.32	44.0	3.05	106
118.863	3.4173	0.056	4.03	68.3	0.431	1090	2.93	63.7

(2) アウトプットカップラーの設計・製作

表1の測定データを用いて、各2波長で共用できる(最大透過が得られる)ように $1/4$ 交互多層膜の計算を行い、2種類のアウトプットカップラーを製作した。一つは、57-μmレーザーと48-μmレーザー用で、高抵抗Si基板上に8層のGe/CsI膜を蒸着した(図2に写真を示す)。もう一つは、119-μmレーザーと71-μmレーザー用で、高抵抗Si基板上に12層のGe/ZnS膜を蒸着した。どちらも、高次横モードをカットするためにドーナツ状に金をコーティングし、遠赤外レーザー光の取り出し径が8 mmのものと10 mmのものを製作した。

次に、FTIRによる透過スペクトル、励起CO₂レーザー光に対する反射率、各遠赤外レーザー光に対する透過率を測定し、計算値と比較した。中赤外域での透過スペクトルは、計算値と実測値がよく一致しており、励起CO₂レーザー光に対して96%の高い反射率を得た。図3に57-μmレーザーに対するアウトプットカップラーの透過率の測定データの一例を示す。設計通りに入射角度0°で透過がピークになり、計算と実測値がよく一致していることが分かる。

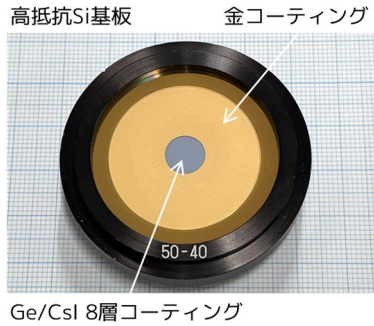


図2. 製作したアウトプットカップラー

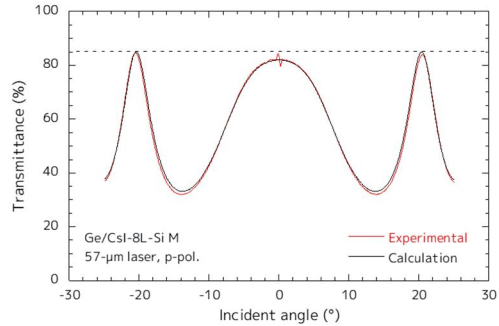


図3. 製作したアウトプットカップラーの透過率

(3) レーザー発振特性

製作したアウトプットカップラー，内径の異なるレーザー管をレーザー装置に取り付け，レーザー発振特性を測定した。高次横モードがなく，円形に近いビームプロファイルで，高い出力が得られる組み合わせを調べた。その結果，57- μm レーザーと48- μm レーザーは，アウトプットカップラーの光取り出し径 $d=8$ mm，レーザー管の内径 $ID=25$ mm，一方，119- μm レーザーと71- μm レーザーは， $d=10$ mm， $ID=35$ mm のものが適していることが分かった。表2に出力，図4にビームプロファイルの一例を示す。いずれの発振線も従来のアウトプットカップラーと比べ，10~50%程度の出力増加が確認できた。また，高出力の励起 CO_2 レーザー光に対するアウトプットカップラーの耐久性（膜の剥離や特性の変化）に問題がないことも確認できた。

表2. 遠赤外レーザーの出力

Pump CO_2 laser Line	P_{CO_2} (W)	FIR laser	
		λ (μm)	P_{FIR} (mW)
9R(8)	55	47.661	300
	55	57.1511	278
9P(34)	100	70.5116	318
9P(36)	100	118.863	529

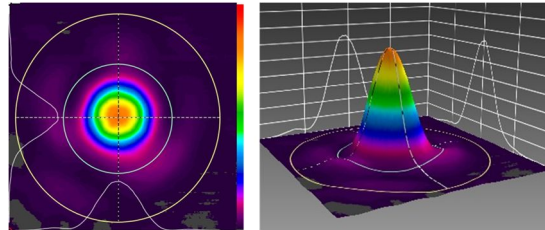


図4. 57- μm レーザーのビームプロファイル

(4) レーザービーム品質の測定

ビームプロファイラー（Ophir社製，型式 PyrocamIV，有効画素エリア 25.6 mm \times 25.6 mm）を用いて，ビーム幅，ビーム拡がり角，ビーム伝搬比（ M^2 因子）を測定した。表3に各パラメータの測定結果を示す。ビーム幅は D4 シグマ法（2次モーメント法）により，ビーム拡がり角は，軸外しの放物面鏡（焦点 $f=152.4$ mm）を用いた焦点距離法により測定した。ビーム伝搬比は，長焦点の凹面鏡（ $f=1$ m）によりレーザー光をコリメートし，軸外しの放物面鏡（ $f=152.4$ mm）に集光したときのビーム幅から求めた。ビーム伝搬比が 1.3~1.6 と理想的なガウシアンビーム（ $M^2=1$ ）に近いビームが得られた。わずかながら大きくなった理由の一つとして，アウトプットカップラーの光取り出し孔からの回折光が含まれている可能性が考えられる。

表3. 遠赤外レーザー光のビームパラメーター

λ (μm)	Beam width ^c		Beam Divergence angle		Beam propagation ration	
	d_{ox} (mm)	d_{oy} (mm)	θ_{ox} (mrad)	θ_{oy} (mrad)	M^2_x	M^2_y
47.661 ^a	10.43	10.61	12.84	12.34	1.43	1.45
57.1511 ^a	12.46	12.23	15.65	14.58	1.58	1.43
70.5116 ^b	9.96	9.72	12.47	13.79	1.32	1.36
118.863 ^b	15.85	14.63	21.44	21.16	1.36	1.29

^a coupling hole $\phi 8$, ^b coupling hole $\phi 10$

^c location $z=600$ mm

(5) まとめ

光取り出し効率をあげた光励起型遠赤外レーザーのアウトプットカップラーの開発により，将来の核融合プラズマ計測や宇宙背景ニュートリノ崩壊光子検出器の開発用光源として期待される波長 40~100 μm の短波長遠赤外レーザーの性能（出力及びビーム品質）が大きく向上した。

本研究により，高出力かつシングルモードのレーザー発振を実証し，アウトプットカップラーの高効率の光取り出し技術および横モードの制御技術を確立することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hikona SAKAI, Kenji TANAKA, Yuki TAKEMURA, Yasuhiko ITO, Tokihiko TOKUZAWA, Ryo YASUHARA, Hiyori UEHARA, Toshiki KINOSHITA, Tsuyoshi AKIYAMA, Kazuya NAKAYAMA and Kazuo KAWAHATA	4. 巻 18
2. 論文標題 Application of Digital Phase Analysis to Far-Infrared Laser Interferometer for the Large Helical Device	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1402062
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.18.1402062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 柏木隆城, 武内勇司, 飯田崇史, 金信弘, 王生尚志, 清水理那, 吉田拓生, 古屋岳, 松浦周二, 中山和也
2. 発表標題 宇宙背景ニュートリノの崩壊光探索における光学機器開発
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会（2023年）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柏木隆城, 武内勇司, 飯田崇史, 金信弘, 王生尚志, 清水理那, 吉田拓生, 古屋岳, 松浦周二, 中山和也
2. 発表標題 宇宙背景ニュートリノの崩壊光探索におけるSiO ₂ 集光器の開発とNbの光学定数測定
3. 学会等名 日本物理学会 2024年 春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 柏木隆城, 武内勇司, 飯田崇史, 金信弘, 守屋佑希久, 清水理那, 吉田拓生, 古屋岳, 松浦周二, 中山和也
2. 発表標題 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索のためのサブミリサイズ遠赤外集光器と反射防止膜の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山 和也、安原 亮、田中 謙治、鈴木 正輝
2. 発表標題 CO2レーザー励起の遠赤外レーザー出力鏡の開発
3. 学会等名 2022年 第83回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王生尚志、前山滉太郎、吉田拓生、中山和也、古屋岳、金信弘、武内勇司、飯田崇史、他COBAND実験メンバー
2. 発表標題 ニュートリノ崩壊光子検出器較正用遠赤外分子レーザーのビームモニター装置の開発
3. 学会等名 2022年度 日本物理学会 北陸支部 定例学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今澤良太、中山和也
2. 発表標題 ITERボロイダル偏光計測用の光励起型遠赤外レーザーの開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第43回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 若林凜、吉田拓生、中山和也、古屋岳、金信弘、武内勇司、飯田崇史、他COBAND実験メンバー
2. 発表標題 ニュートリノ崩壊光子検出器較正用光学系の設計と評価II
3. 学会等名 2021年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------