

令和元年6月7日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04984

研究課題名(和文) プラズマ計測用のバックトークレス高安定光励起型2波長遠赤外レーザーの開発

研究課題名(英文) Development of high stable optically pumped two-color far-infrared laser with back-talk less for plasma diagnostics

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：波長50 μm 付近の遠赤外レーザーは、将来の核融合プラズマ装置の電子密度や内部磁場分布計測用光源として適している。高精度かつ高信頼性のプラズマ計測を実現するには、レーザー発振の安定化が必須である。光励起型遠赤外レーザーでは、励起光の戻り光(バックトーク)の除去が長年の課題となっている。本研究では、光アイソレーターを開発し、9R(8)CO₂レーザー励起の48-、57- μm CH₃ODレーザーの安定発振を実証し、その安定化技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、未だ確立した高精度計測用レーザー光源のない波長50 μm 帯(周波数5 THz帯)の遠赤外領域において、高出力かつ高安定なレーザー発振を、しかも2波長同時発振で実現するというものである。本研究による成果は、レーザープラズマ計測以外の学術分野(例えば、遠赤外領域の要素技術や計測システム開発研究、標準研究、固体物性研究、分子分光研究など)の進展にも貢献できる。

研究成果の概要(英文)：A far-infrared laser with a wavelength of about 50 μm is suitable as a light source for measuring the electron density and internal magnetic field distribution of future fusion plasma devices. Stabilization of laser oscillation is important to realize highly accurate and highly reliable plasma diagnostics. In the optically pumped far-infrared laser, removal of the return of the pump light(back-talk) has been a problem for many years. In this study, we have demonstrated stable oscillation of the 48-, 57- μm CH₃OD lasers pumped by 9R(8) CO₂ laser using the developed optical isolator, and established its stabilization technology.

研究分野：レーザー工学

キーワード：遠赤外レーザー プラズマ計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

遠赤外領域(波長 25 μm ~1 mm, 周波数約 0.3~12 THz)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。最近では, テラヘルツ領域とも呼ばれる。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, 低温が必要であり, パルス動作が中心で高出力の CW 動作にはもう少し時間が必要な状況である。またその発振領域は, 1.2~4.9 THz で, 本研究目的の周波数 6 THz 帯(波長 50 μm)では発振報告はない。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(4 千本以上), 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。

核融合プラズマ計測では, 電子密度や電流密度分布計測のための干渉・偏光・散乱(密度揺動)計測用光源として, 放電励起では HCN レーザー(波長 337 μm), DCN レーザー(波長 194 μm)が, CO₂ レーザー励起では CH₃OH レーザー(波長 119 μm)等が代表的な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(プラズマの自己加熱によって核反応を持続させる)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。また, 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD 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。この様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(カットオフ効果, 密度勾配によるレーザー光の屈折効果)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。

そこで, 我々は CO₂ レーザー励起で 2 波長同時発振する 48- μm , 57- μm CH₃OD レーザー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いる。プラズマ計測に必要な高い信頼性を実現するには, レーザー発振の安定化が欠かせない。光励起型遠赤外レーザーは, その構造上, 遠赤外レーザー装置から励起レーザー装置への励起光の戻り(バックトーク)が発生し, それが周波数や出力変動の主な原因となっている。研究当初は, 励起光を遠赤外レーザー共振器に斜入射し, バックトークを軽減していたが, 十分ではなく, 目的の安定度(数百 mW の出力に対して $\pm 1\%$ 以内, 約 1 MHz のビート周波数に対して ± 5 kHz 以内)を達成できていなかった。

2. 研究の目的

近年, 大型で高密度化するプラズマ装置における核融合プラズマ計測では, 波長 50 μm 帯の遠赤外レーザーを用いる新しい計測システムが必要とされている。しかし, 光と電波の谷間に位置するこの領域では, 光源を含め, 計測手法が確立していない。そこで, 2 波長同時発振型のレーザー光源, 干渉・偏光計測法, 各構成要素(光学素子, 検出器)の開発を進めている。高精度かつ高信頼性のプラズマ計測を実現するには, レーザー発振の安定化が必須である。

光励起型遠赤外レーザーの出力及び周波数安定性は, 励起 CO₂ レーザーの出力と周波数変動に強く依存し, 遠赤外レーザー装置から励起 CO₂ レーザー装置への励起光の戻り(バックトーク)は, 励起 CO₂ レーザー自身の変動の原因となる。このバックトークの除去が長年の課題であり, 高安定光励起型遠赤外レーザー装置の実現に必要不可欠となっている。本研究では, 光アイソレーターを用いたバックトークレスの 9R(8)CO₂ レーザー励起の 48- μm , 57- μm CH₃OD レーザーの安定発振を実証し, その安定化技術を確認する。

3. 研究の方法

将来の核融合プラズマ計測に向けて, 励起光の戻り(バックトーク)を除去した高安定光励起型遠赤外レーザー発振の実証試験を行い, その安定化技術を確認する。図 1 に本研究で使用した CO₂ レーザー励起型遠赤外レーザー装置の概略図を示す。レーザー装置及び光学系は, すべて光学除振台上に設置している。励起用 CO₂ レーザーは, 外部シュタルクセル変調法により周波数安定化した。これは, 平行平板電極を入れたセルに吸収ガスを封入し, 周波数シフト用の DC 電圧と変調用の AC 電圧を印加させ, 透過光強度の位相変化を検出し, 共振器長を PZT により制御する方法である。また, ヘテロダイナミクス計測を行うために遠赤外レーザー装置は双子型(A:プローブと B:ローカル)となっている。遠赤外レーザー共振器長は, ステッピングモーターにより制御することができる。本研究では以下のことを行った。

(1) 光アイソレーターの試験

偏光子と $\pi/2$ 位相遅延素子を用いて光アイソレーターを構成する。偏光子にはワイヤー・グリッド, ブリュスター・スタック又は ATFR ミラー(S 偏光に対して反射, P 偏光に対しては吸収する)を, $\pi/2$ 位相遅延素子には種類の異なる

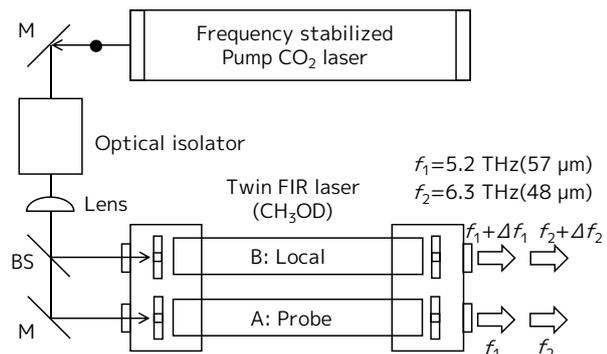


図 1. CO₂ レーザー励起の双子型遠赤外レーザー装置

$\lambda/4$ 波長板を用いる。各光学素子の励起 CO_2 レーザー光に対する透過率や偏光度を測定し、適した組み合わせを選定する。

(2) 戻り光の影響と遠赤外レーザーの動作特性の測定

レーザーシステム上に光アイソレーターを配置し、励起 CO_2 レーザーと 2 波長遠赤外レーザーの出力及び周波数変動から戻り光の影響を測定する。2 波長遠赤外レーザーの偏光状態やビーム形状も測定し、従来の斜入射による戻り光の軽減方式との比較を行う。

(3) 2 波長遠赤外レーザーの安定化

2 波長遠赤外レーザーの出力及びビート周波数が一定になるように遠赤外レーザー共振器長をフィードバック制御する。そのために、フィードバックループを構成するレーザー光学系、電子機器の制御系の最適化を行う。最終的には、本研究で開発する光アイソレーターを用いて、戻り光を軽減した状態で励起 CO_2 レーザー装置と双子型遠赤外レーザー装置を同時制御することで、2 波長遠赤外レーザー発振の長時間安定性を実証する。

4. 研究成果

(1) 光アイソレーターの開発

励起 CO_2 レーザーは、9R(8)線でも最大 160 W の CW 発振が可能であるが、本研究ではレーザーガス(ヘリウムガスと CO_2/N_2 混合ガス)の消費量を抑えるために、140 W 程度の出力で動作させた。光アイソレーターを構成する各種光学素子を試験した結果、高出力のレーザー光に対する耐久性があり、効率が良く、戻り光が少ない組み合わせとして、ATFR ミラーと ZnSe 製のプリズム型 $1/4$ 波長板(位相差 84° 、透過率 98%)が最適であることが分かった。採用した光アイソレーターの配置を図 2 に示す。直線偏光する励起光は、 $1/4$ 波長板により円偏光となり、双子型の遠赤外レーザー共振器に入射される。その戻り光は、再度 $1/4$ 波長板を通過すると励起光とは直交する直線偏光となり、ATFR ミラーで吸収される。当初は、1 枚の ATFR ミラー(S 偏光反射率 $R_S > 99\%$ 、P 偏光反射率 $R_P = 2\%$ 、消光比 $ER = 50$)を用いていたが、十分でなかったために、もう 1 枚 ATFR ミラー($R_S > 99\%$ 、 $R_P = 1\%$ 、 $ER = 100$)を追加し、消光比を上げることで戻り光をより少なくした。図 3 に双子型遠赤外レーザー装置の共振器長を掃引したときの励起 CO_2 レーザーの出力変動を示す。 $1/4$ 波長板が無い状態では、戻り光との干渉により、励起 CO_2 レーザーの出力が大きく変動していることが分かる。一方、 $1/4$ 波長板を挿入した場合は、戻り光の完全な除去は難しいが、出力変動を $\pm 1\%$ 以内に抑えることができた。

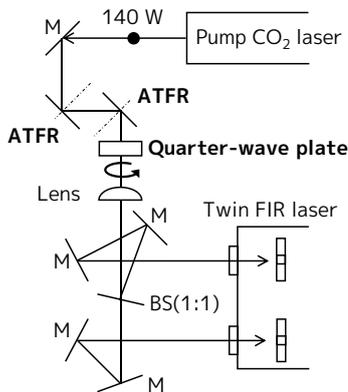


図 2. 光アイソレーターの構成

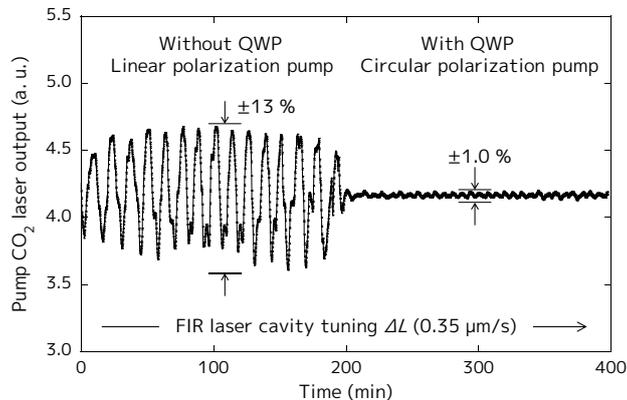


図 3. 戻り光による励起 CO_2 レーザーの出力変動

(2) 2 波長遠赤外レーザーの動作特性

本研究の遠赤外レーザー装置は双子型(A, B)である。遠赤外レーザー出力鏡には高抵抗シリコン基板上に励起 CO_2 レーザーの反射多層膜とドーナツ状に金をコーティングしたものを使用した。レーザー光を取り出す結合孔のサイズにより出力、横モード、ビームウエスト、ビーム発散角が異なるため、双子型 A, B それぞれに直径 8 mm と直径 6 mm の結合孔を持つ出力鏡を取り付け、レーザービームの各種特性を測定した。表 1 に双子型遠赤外レーザー装置(A, B)から 2 波長同時発振する計 4 本のレーザービームの各種特性(波長、出力、偏光、ビームウエスト、ビーム発散角、ビームプロファイル)を示す。CW 140 W の CO_2 レーザーで励起し、バッファーガスとしてヘリウムを添加することで、合計 1 W を超える遠赤外レーザー出力を得ることが

表 1. 2 波長遠赤外レーザーのビーム特性

| Twin FIR laser | FIR laser A | | FIR laser B | |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Wavelength | 47.7 μm | 57.2 μm | 47.7 μm | 57.2 μm |
| Output power | 313 mW | 272 mW | 178 mW | 272 mW |
| Polarization (ellipticity ϵ) | $\epsilon=0.79$ | $\epsilon=0.83$ | $\epsilon=0.75$ | $\epsilon=0.82$ |
| Beam waist ($1/e^2$) | 2.9 mm | 3.2 mm | 1.9 mm | 2.2 mm |
| Beam divergence | 11.0 mrad | 11.8 mrad | 16.0 mrad | 16.6 mrad |
| Beam profile (30 mm×30 mm) | | | | |

できた。遠赤外レーザーは、円偏光で発振すると予想していたが、実際は楕円偏光であった。これは、1/4波長板の位相差と遠赤外レーザー装置への励起光の入射光学配置が原因であった。また、出力鏡の結合孔のサイズは、単一横モードでガウス型の強度分布である、出力が大きい、ビーム広がり小さいことから、直径8 mmの方が直径6 mmよりも適していることが確認できた。

(3) 2波長遠赤外レーザーの出力及びビート周波数安定化

レーザー共振器長の変化は、レーザー発振を不安定にする。そこで、従来よりも熱膨張率の小さいスーパーインバーロッド(熱膨張率 0.15×10^6 /K, 温度範囲 20~30 °C)を用いて遠赤外レーザー共振器を固定した。2波長遠赤外レーザー光は、金属メッシュ製のバンドパスフィルタにより波長分離し、波長の短い48- μm レーザーの出力が一定になるように、同調曲線のスロープを利用し、共振器長をステップモーターで制御した。図4に励起CO₂レーザー及び双子型遠赤外レーザー装置から2波長同時発振する計4本の遠赤外レーザーの出力安定性を示す。励起CO₂レーザーの周波数安定化、光アイソレーターによる戻り光の軽減、双子型遠赤外レーザー共振器長を同時制御することで、 $\pm 1.5\%$ /h以内の出力安定度を得ることができた。プラズマ計測におけるヘテロダイン干渉計測では、ビート周波数の安定性が重要となる。ショットキーダイオードミキサーを用いて、2波長遠赤外レーザーのビート信号を検出し、ローパスフィルタとハイパスフィルタを組み合わせた電子回路により波長分離した。その後、周波数-電圧コンバーターにより電圧信号に変換し、波長の短い48- μm レーザーの出力が一定になるように、共振器長をステップモーターで制御した。スペクトラムアナライザーにより観測した2波長ビート信号とその安定度を図5に示す。48- μm レーザーに対しては、 $0.6 \text{ MHz} \pm 13 \text{ kHz/h}$ 、57- μm レーザーに対しては、 $1.7 \text{ MHz} \pm 17 \text{ kHz/h}$ のビート周波数安定度を得ることができた。また、制御中におけるビート周波数変動の一番大きな要因は、ステップモーターステージのボールネジのバックラッシュであることが分かった。

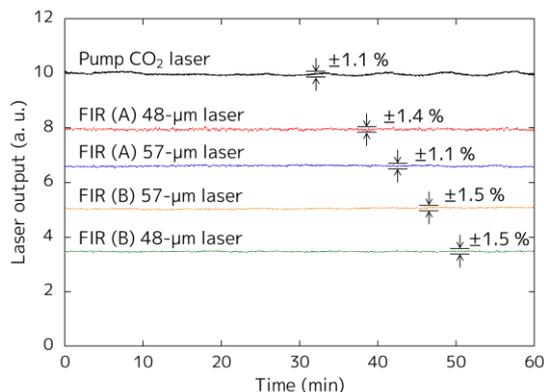


図4. 2波長遠赤外レーザーの出力安定性

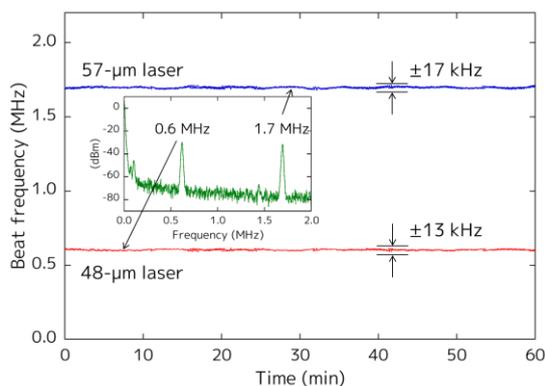


図5. 2波長遠赤外レーザーのビート周波数安定性

(4) まとめ

光アイソレーターの開発とレーザー装置の改良により、将来の核融合プラズマ計測用光源として期待される9R(8)CO₂レーザー励起の2波長遠赤外レーザーの性能(出力及び安定性)が大きく向上した。研究開始当初は、励起CO₂レーザーの出力とその安定性は109 W \pm 2.0%/hであったが、現在は、135 W \pm 1.1%/hまで改善された。また、双子型遠赤外レーザー装置から発振する2波長遠赤外レーザーの出力も、当初の665 mWから1035 mWと増加した。遠赤外レーザー共振器長を制御することで、その出力変動も、 $\pm 4.2\%$ /hから $\pm 1.5\%$ /hに抑えることができた。干渉計測で重要となるビート周波数安定性も、 $\pm 38 \text{ kHz/h}$ から $\pm 17 \text{ kHz/h}$ に改善された。

以上本研究により、光アイソレーターを用いたバックトークレスの9R(8)CO₂レーザー励起の48- μm 、57- μm CH₃ODレーザーの安定発振を実証し、その安定化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 2件)

- ① IMAZAWA Ryota, NAKAYAMA Kazuya, AKIYAMA Tsuyoshi, Measuring Faraday Effect in Z-cut Crystal Quartz at Wavelength of 118.8 μm for Polarimeter, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 13, 2018, pp.1405112 1-4
DOI:10.1585/pfr.13.1405112
- ② K. Nakayama, S. Okajima, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Kawahata, Improvement of Output Stability of CO₂ Laser Pumped FIR Lasers by Using an Optical Isolator, Proceedings of IRMMW-THz2016, IEEE Conference Publications, 査読無, 2016, pp.1-2
DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758948

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 中山和也, 岡島茂樹, 秋山毅志, 田中謙治, 川端一男, SiC 基板を用いた遠赤外レーザー出力鏡の開発, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 2018
- ② 中山和也, 岡島茂樹, 秋山毅志, 田中謙治, 川端一男, アイソレーターを用いた CO₂ レーザー一励起の遠赤外レーザー発振の安定化, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, 2017
- ③ 中山和也, 岡島茂樹, 秋山毅志, 田中謙治, 川端一男, 遠赤外レーザーを用いた SiC ウェハの光学定数測定, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017
- ④ K. Nakayama, S. Okajima, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Kawahata, Improvement of Output Stability of CO₂ Laser Pumped FIR Lasers by Using an Optical Isolator, 41st International Conference on Infrared and Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2016, 2016
- ⑤ 中山和也, 岡島茂樹, 秋山毅志, 田中謙治, 川端一男, 57- μ m CH₃OD レーザー用の水晶波長板の開発, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：秋山 毅志

ローマ字氏名：(AKIYAMA, Tsuyoshi)

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：80370138

削除：2018 年 12 月 11 日

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：岡島 茂樹

ローマ字氏名：(OKAJIMA, Shigeki)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。