

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560053

研究課題名(和文) プラズマ計測用2波長同時発振型レーザー発振の確立

研究課題名(英文) Establishment of two-color simultaneously oscillated lasers 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) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：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 帯のテラヘルツ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が、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、レーザー発振線の探査、計測手法の開発、その構成要素の開発を進めている。これらと並んで重要な課題は、計測システムの高信頼性を実現するための安定なレーザー発振の確立である。本研究では、長時間安定な炭酸ガスレーザー励起の2波長(48- μm 、57- μm)同時発振型テラヘルツレーザーを開発した。

研究成果の概要(英文)：For fusion plasma diagnostics of large and high-density plasma devices, a new measurement system using a terahertz (THz) laser of the wavelength region of 50 μm is required. In this region between light and radio wave, measurement method including the light source has not been established. Therefore, we have surveyed THz laser lines, and the measurement method and components have been developed. It is important to realize the stable laser oscillation in order to improve reliability of the measurement system. In this study, we have developed the long-time stable 48- and 57- μm THz lasers pumped by a CO₂ laser.

研究分野：レーザー工学

キーワード：プラズマ計測 干渉計測 偏光計測 炭酸ガスレーザー テラヘルツレーザー

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(THz)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。THz 領域の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。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, 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(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 THz 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, 我々は図 1 に示すような 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きた。目的の帯域で発振する THz レーザーを探査し, 2 波長同時発振する 48- μm , 57- μm CH₃OD レーザーの高出力化を行い, 合計 2.4 W の世界最高出力を達成した。波長レーザーを用いた干渉計を構築し, その基本原理を実証した。高精度偏光計開発のために, THz 領域で動作する光弾性変調器を世界で初めて開発し, その有効性を実証した。計測システム中の真空窓やビームスプリッター等の光学素子の設計に必要な光学定数を高精度で測定する計測法を確立し, その設計を可能にした。これらと並んで重要な課題は, 計測システムの高信頼性を実現するために, 安定なレーザー発振の確立である。更に ITER では 1000 秒を越える長

時間放電が計画されており, 大型ヘリカル装置では 1 時間を超える定常プラズマの維持に成功している。図 1 に示す 2 波長レーザー計測システムでは, 長時間にわたって 4 本のレーザー発振線の出力や 2 つのヘテロダイビート周波数の安定化が要求される。

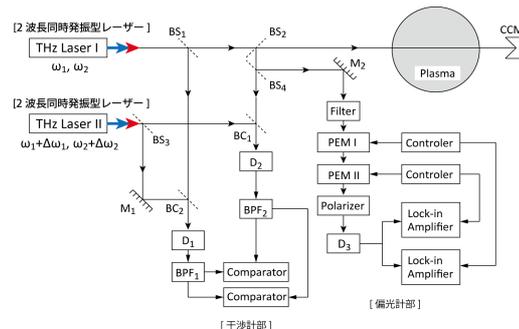


図 1. 2 波長同時発振型 THz レーザーを用いた干渉・偏光計測システム

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 THz 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。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, レーザー発振線(2 波長同時発振型)の探査, 計測手法(干渉, 偏光計測)の開発, その構成要素(光学素子, 検出器)の開発を進めている。これらと並んで重要な課題は, 計測システムの高信頼性を実現するための安定なレーザー発振の確立である。本研究では長時間にわたって安定した 2 波長同時発振を実証し, 9R(8)CO₂ レーザー励起の 48- μm , 57- μm CH₃OD レーザーを計測用レーザーとして確立する。

3. 研究の方法

将来の核融合プラズマ計測のために, 長時間安定動作する 2 波長同時発振型 THz レーザーの安定化システムを構築する。THz レーザーの安定性は, 励起用 CO₂ レーザーの安定性に強く依存するため, 励起用 CO₂ レーザーの安定化も含めて研究を進めた。そのためにに行った方法を以下にまとめる。

(1) 励起用 CO₂ レーザー及び THz レーザーの縦横シングルモード発振の実現

これを実現するには, レーザー管の真直性や真円性が重要となることから, 高精度で製作されたレーザー管を装置に取り付ける。次に, 共振器ミラーや管軸の調整を行い, 同調曲線, ビームプロファイルを測定し, セルフビートの無い単一モード発振を試みた。

(2) 励起用 CO₂ レーザーの出力及び周波数の安定化

励起用 CO₂ レーザーは, 外部シタルクセル変調法により周波数安定化を行う。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、共振器長をピエゾ素子(圧電素子)により制御する方法である。

(3) 2 波長同時発振型 THz レーザーの出力及びビート周波数の安定化

THz レーザー装置は、ヘテロダイン計測のために双子型(レーザーA: プロープとレーザーB: ローカルオシレータ)である。双子型 THz レーザー装置は、同調曲線のスロープを利用して出力安定化したレーザーA に対して、もう一方のレーザーB を目的のビート周波数にオフセットロックする方法で安定化する。本研究の 2 波長同時発振型レーザーでは、偏光板とフィルターにより分離した波長の短い 48- μm レーザーに対してフィードバックループを構成し、共振器長をステップモーターにより制御する。

(4) バックトーク(励起光の戻り)の軽減

THz レーザー共振器からの励起用 CO_2 レーザー光の戻りは、両レーザーの不安定性の大きな要因になる。一般に CO_2 レーザー用の光アイソレーターとしては、位相板と偏光子を組み合わせたものが使用されるが、9R(8) CO_2 レーザー励起の 48- μm 、57- μm CH_3OD レーザーに適用された例はない。そこで本研究では、耐久性、消光比、位相精度、効率を考慮し、直線偏光を円偏光に変換する 1/4 波長板と p 偏光に対しては吸収、s 偏光に対しては反射する ATFR(absorbing thin-film reflector)ミラーを用いた光アイソレーターによる戻り光の軽減効果の検証を行った。

4. 研究成果

本研究で開発した励起用 CO_2 レーザー装置と 2 波長同時発振型 THz レーザー装置の安定化システムの構成を図 2 示す。レーザー装置や安定化の光学系は、すべて光学除振台上に設置している。以下に本レーザー装置で得られた研究成果をまとめる。

(1) 縦横シングルモード発振の実現

高精度で製作されたレーザー管をレーザー装置に取り付け、レーザー発振の最適な動作パラメーターを測定した。最適な動作条件において、同調曲線、ビームプロファイル、セルフビートの有無を測定した結果、励起用

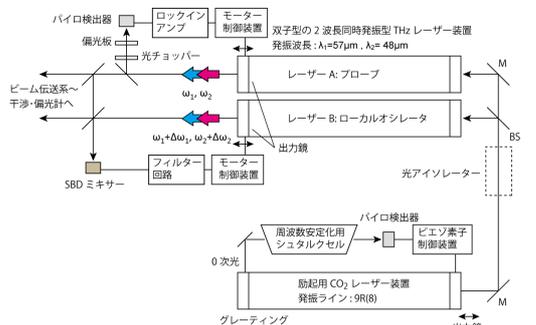


図 2. 2 波長同時発振型 THz レーザーの安定化システムの構成

CO_2 レーザー及び 2 波長 THz レーザー共に縦横シングルモード発振することを確認した。

(2) 励起用 CO_2 レーザーの安定性

9R(8)線で最高 150 W の出力を得たが、本実験では、発振モードやガス消費量から約 110 W で動作させた。レーザーの発振周波数は、外部シタルクセル変調法により共振器長を制御することで安定化した。セル中の電極板(長さ 1 m、間隔 7 mm)には、周波数シフト用の DC 電界(0~400 V/cm)と変調用の AC 電界(150 V/cm, 520 Hz)を印加する。吸収ガスには CH_3OH 、 CH_3OD 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、 HCOOH が使用できるが、変調信号の S/N から CH_3OH を選択した。核融合プラズマ計測では、長時間安定動作することが要求される。10 時間の安定化を行った結果、図 3 に示すようにモードジャンプすることなく 108.7 \pm 0.7 W、 \pm 560 $\text{kHz}_{\text{p-p}}$ の安定度を得た。次にセルをダブルパス構成にし、より急峻な吸収信号を利用することで、周波数安定度の更なる向上を試みた。その結果、1 時間に対して 108.2 \pm 0.6 W、 \pm 230 $\text{kHz}_{\text{p-p}}$ の安定度を達成した。

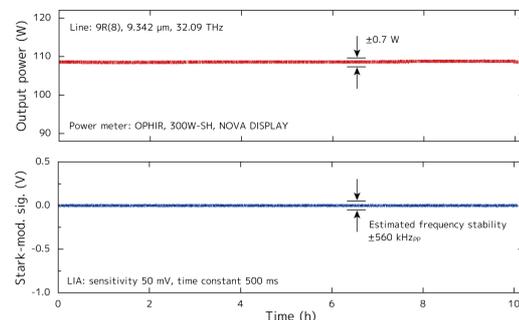


図 3. 励起用 CO_2 レーザーの出力と周波数安定性

(3) 2 波長同時発振型 THz レーザーの安定性

双子型のレーザー装置(レーザーA とレーザーB)の各共振器長を少し変えると、わずかに異なる周波数でレーザー発振する。本装置では、4 本のレーザービーム(ν_1 , ν_2 , $\nu_1 + \nu_2$, $\nu_1 - \nu_2$)が同時発振する。合計で約 0.5 W の出力を得た。レーザー出力とビート周波数が不安定になる最大の要因は、共振器長の変化である。本装置では、低熱膨張率のスーパーインバーロッドで共振ミラーの間隔を固定し、レーザー出力とビート周波数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。波長の短い 48- μm レーザーの出力とビート信号が一定になるよう制御することで、同時発振する 57- μm レーザーも安定化できることを確認した。4 本の THz レーザーの出力と各ビート信号の周波数の安定性を図 4 に示す。このとき、THz レーザーの出力は比較的安定であることから、ビート周波数が一定になるようレーザーB の共振器長のみ制御した。干渉計測に用いるビート信号の周波数安定性は、48- μm レーザーに対して 600 \pm 18 $\text{kHz}_{\text{p-p}}/\text{h}$ 、57- μm レーザーに対して 1200 \pm 18 $\text{kHz}_{\text{p-p}}/\text{h}$ であった。また、

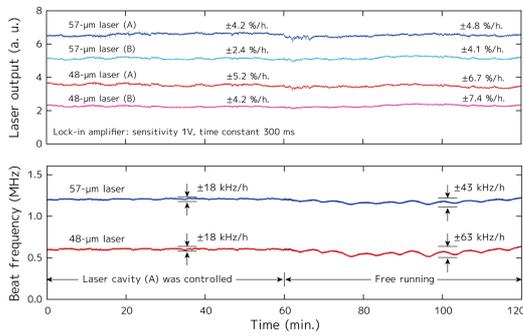


図 4. 2 波長同時発振型 THz レーザーの出力とビート周波数安定性

出力やビート周波数が不安定になる要因がバックトーク（励起光の戻り）によるものであることを確認した。より安定なレーザー発振を実現するには、励起光を THz レーザー共振器に斜入射する方式では不十分であることが分かった。

(4) バックトーク(励起光の戻り)の軽減

予備実験として、励起用 CO₂ レーザー装置の 0 次光を用いて、1/4 波長板と ATR ミラーの偏光特性を測定し、これらを組み合わせた光アイソレーターの試験を行った。次に、励起 CO₂ レーザー光の THz レーザー装置への導入光学系に光アイソレーターを設置し、THz レーザー共振器を掃引したときの戻り光による励起 CO₂ レーザーの出力変動と THz レーザー出力を測定した。波長板の光軸を 45° 回転させアイソレーターを ON/OFF(円偏光/直線偏光励起)し、これらを比較した。その結果、光アイソレーターにより戻り光との干渉による最大 ±7.5 % の出力変動を ±1 % 以下にまで軽減できた。また、円偏光励起しても 48-μm, 57-μm CH₃OD レーザーが発振することも確認できた。

以上の結果から、本研究によって励起用 CO₂ レーザーを含め 2 波長同時発振型 THz レーザーの安定発振が実証できた。また、より安定な発振には、光アイソレーターによりバックトーク（励起光の戻り）を軽減することが有効であることも確認できた。今後は、プラズマ計測への適用を考え、干渉計や偏光計と組み合わせたときの動作テストや THz レーザー光の長距離伝送技術の開発を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

K. Nakayama, S. Okajima, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Kawahata, Stabilization of simultaneously oscillated 48- and 57-μm CH₃OD lasers for plasma diagnostics, Proceeding of IRMMW-THz 2014, 査読無, 2014, 1-2,

DOI: 10.119/IRMMW-THz.2014.6956485
Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Dispersion interferometer using modulation amplitude on LHD, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol.8, 2014, 11D301-1-7,

DOI: 10.1063/1.4886777

K. Nakayama, S. Okajima, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Kawahata, Frequency Stabilization of A Pump 9R(8) CO₂ Laser for Simultaneously Oscillated 5.2- And 6.3-THz CH₃OD Lasers, Proceeding of IRMMW-THz 2013, 査読無, 2013, 1-2, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665682

T. Akiyama, N. Yoshida, M. Tokitani, S. Masuzaki, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Impurity deposition on first mirror surface during hydrogen discharge in LHD, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 8, 2013, 1402092-1-4

DOI: 10.1585/pfr.8.1402092

K. Nakayama, S. Okajima, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Kawahata, FIR (48-, 57-, and 119-μm) Lasers Pumped by Two CO₂ Lasers for ITER Diagnostics, Proceeding of IRMMW-THz 2012, 査読無, 2012, 1-2, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380238

中山和也, 岡島茂樹, 川端一男, 田中謙治, 秋山毅志, GaAs ショットキーバリアダイオードの短波長遠赤外領域での特性とその応用, 電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門誌), 査読有, Vol.132, No.9, 2012, 722-726

DOI:10.1541/ieejfms.132.722

T. Akiyama, N. Yoshida, K. Kawahata, M. Tokitani, H. Iwakiri, S. Okajima, K. Nakayama, Studies of reflectivity degradation of retroreflectors in LHD and mitigation of impurity deposition using shaped diagnostic ducts and protective windows, Nuclear Fusion, 査読有, Vol.52, No. 6, 2012, 063014-1-10

DOI:10.1088/0029-5515/52/6/063014

[学会発表](計 15 件)

中山和也, 岡島茂樹, 秋山毅志, 田中謙治, 川端一男, 光アイソレーターを用いた遠赤外レーザー励起用 CO₂ レーザーの安定化, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 12 日, 東海大学(神奈川県・平塚市)

T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Preliminary results of a Nd:YAG laser dispersion interferometer (1 micron DI), 27th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, 2014 年 11 月 3 日~7 日, St Paul Lez Durance (France)

K. Nakayama, S. Okajima, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Kawahata, Stabilization of simultaneously oscillated 48- and 57- μm CH_3OD lasers for plasma diagnostics, 2014年9月17日, IRMMW-THz2014, Arizona (USA)

T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Dispersion interferometer using modulation amplitudes on LHD, The 20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, 2014年6月1日-5日, Georgia (USA)

中山和也, 岡島茂樹, 川端一男, 秋山毅志, 田中謙治, 徳沢季彦, 高密度・大型核融合装置のための二波長同時発振型短波長遠赤外レーザーの開発と応用, プラズマ・核融合学会 第30回年会 2013年12月3日, 東京工業大学 (東京都・目黒区)

T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Application of a dispersion interferometer using a ratio of modulation amplitudes to LHD and Future prospects, 16th International Symposium Laser Aided Plasma Diagnostics, 2013年9月22日-26日, Wisconsin (USA)

中山和也, 岡島茂樹, 秋山毅志, 田中謙治, 川端一男, プラズマ計測用 50 μm 帯 CH_3OD レーザーの励起 9R(8) CO_2 レーザーの安定化, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月19日, 同志社大学 (京都府・田辺市)

K. Nakayama, S. Okajima, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Kawahata, Frequency Stabilization of A Pump 9R(8) CO_2 Laser for Simultaneously Oscillated 5.2- And 6.3-THz CH_3OD Lasers, 2013年9月4日, IRMMW-THz2013, Mainz (Germany)

中山和也, 岡島茂樹, 川端一男, 田中謙治, 秋山毅志, 高密度プラズマの干渉偏光計測用 2波長遠赤外レーザーの開発, レーザー学会学術講演会第33回年次大会, 2013年1月29日, 姫路商工会議所・イーグレ姫路 (兵庫県・姫路市)

T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Dispersion interferometer on LHD and prospects to fusion devices, U.S.-Japan Workshop on Millimeter Waves Technology and Fusion Plasma Fluctuation Diagnostics, 2013年1月14日-16日, Davis (USA)

T. Akiyama, K. Kawahata, R. Yasuhara, S. Okajima, K. Nakayama, CO_2 laser dispersion interferometer on LHD, 9th Australia-Japan workshop on plasma diagnostics, 2012年12月3日-6日, 那珂 (那珂市・茨城県)

T. Akiyama, N. Yoshida, M. Tokitani, S. Masuzaki, K. Kawahata, S. Okajima, K.

Nakayama, Impurity deposition on first mirror surface during hydrogen discharge in LHD, 22nd International Toki Conference, 2012年11月19日-22日, セラトピア土岐 (岐阜県・土岐市)

K. Nakayama, S. Okajima, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Kawahata, FIR (48-, 57-, and 119- μm) Lasers Pumped by Two CO_2 Lasers for ITER Diagnostics, 2012年9月25日, IRMMW-THz2012, Wollongong, (Australia)

中山和也, 岡島茂樹, 関谷将成, 高橋拓真, 小川 勇, 池田亮介, 長波長帯域遠赤外レーザーのデータベースの構築, 第73回応用物理学会秋季学術講演会, 2012年9月12日, 愛媛大学・松山大学 (愛媛県・松山市)

T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Dispersion interferometer with 1 micron light source, Japan-Korea Workshop on Plasma Diagnostics 2012, 2012年8月23日-25日, Jeju (Korea)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

秋山 毅志 (AKIYAMA, Tsuyoshi)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 80370138