



解説

遠赤外レーザーの開発とその応用

中山和也, 岡島茂樹, 川端一男¹⁾

中部大学工学部, ¹⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2011年10月31日)

遠赤外レーザーが核融合プラズマ診断の干渉・偏光・散乱計測用光源として利用され始めて約40年が経過した。この間にレーザーが大きく進歩し、国際熱核融合実験炉 ITER 計測でもなくてはならない光源の一つになっている。cw 遠赤外レーザーを中心に遠赤外レーザー開発の40年を振り返るとともに、最近の遠赤外レーザーや遠赤外光学素子の現状、プラズマ計測を中心とする応用の現状について解説する。

Keywords:

Far-infrared (FIR) laser, laser frequency stabilization, FIR optical element, plasma diagnostics

1. 遠赤外レーザー開発の推移

1.1 遠赤外波長領域とレーザー

遠赤外線は、分光学的にはイオン結晶のプリズムで光が透過しなくなる波長 $25\ \mu\text{m}$ (周波数約 $12\ \text{THz}$) から $1\ \text{mm}$ (約 $0.3\ \text{THz}$) までの電磁波である。遠赤外レーザーが発表されるまで、この波長領域の光源としてはインコヒーレントな熱輻射が主であり、中でも高圧水銀灯がよく用いられており、単一波長で単一モードの強い輻射が得られず、背景雑音も大きい等の欠点があった。また特殊電子管や半導体発振器を用いても波長 $1\ \text{mm}$ 以下の電磁波の発生は簡単ではなかった。そのため、この遠赤外波長領域は電波と光の谷間と言われ開発が非常に遅れた領域であった。ここでは、波長 $30\ \mu\text{m}$ (周波数約 $10\ \text{THz}$) ~ $300\ \mu\text{m}$ (約 $1\ \text{THz}$) の cw レーザーの開発とその応用に関する現状を中心に紹介する。

1964年に C.K.N. Patel 等が He-Ne 放電から $31.9\sim 57.3\ \mu\text{m}$ に 9 本の、A.Crocker 等が H_2O 放電により $23.3\sim 78.8\ \mu\text{m}$ に 9 本の、続いて H.A. Gebbie 等が HCN , CH_3CN , $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$ 放電から $337\ \mu\text{m}$ にレーザー発振を報告し[1-3]、それまでの状況を一変させた。希ガスレーザーは低出力のため実用化されなかったが、分子レーザーはその後の研究で cw で比較的高出力が得られるようになり、固体物性研究や分子分光研究などへの応用に重宝された。1970年頃までは新しいレーザー線の開発、発振機構の解明につながる研究が主であった。そして、 HCN (DCN) レーザーや H_2O (D_2O) レーザーが、分子の基底電子状態の異なる振動モード間の回転準位の共鳴相互作用による摂動準位を中心とした回転遷移による発振であると解明された[4, 5]。この機構を指導原理として遠赤外レーザー発振線数を増やすための開発研究がなされ、 SO_2 , H_2S , OCS , H_2CO 等からの新しいレーザーが報告されたが[6-9]、cw レーザー発振線数が少なく、高出力発振線も得られず、応用も限られていた。

遠赤外分子レーザーの応用範囲が広まったのは、1970年に CO_2 レーザー励起の CH_3F レーザーが報告されてからである[10]。この方式で多くの多原子分子からの遠赤外レーザーが報告された。これは $9\sim 11\ \mu\text{m}$ で100本近く発振する CO_2 レーザー光で永久双極子モーメントを持つ多原子分子の励起振動準位の特定回転準位を選択励起して反転分布を得て、純回転遷移により遠赤外波長領域で発振させるレーザーである。励起用レーザーと遠赤外レーザーの2台を必要とするものの、 CO_2 レーザー光を吸収する候補分子が多く、これまでに100以上の分子から4000本以上の新しい遠赤外レーザー線が報告された[11, 12]。しかし、発振線の中にはパルス動作のみで得られるレーザーや取り扱いがたい(例えば、高価、強酸、毒ガス等)分子からのレーザー、シュタルク効果を利用して分子のエネルギー準位を操作したレーザー、導波管型の CO_2 レーザーを用いてパンプオフセット周波数の高いレーザー等も多く、実用しやすいレーザー線は数10本程度と非常に限られている。また、遠赤外分子レーザーは特定のエネルギー準位間の遷移によるため、波長の変性がなく、希望する周波数と一致するとは限らない欠点がある。しかし、逆に、レーザー周波数が正確に決められるため、周波数標準や高精度光学定数測定など周波数を固定して計測する応用には適している。

1.2 遠赤外領域の他の光源の開発

他の遠赤外光源としては、半導体レーザー、自由電子レーザー、最近の超短パルス(フェムト秒)レーザーを用いた THz 波発生、高出力ジャイロトロン等がある。今後どのように発展するか楽しみである。現状では、半導体レーザーはコンパクトで優れているが、可視光線領域から数 $10\ \mu\text{m}$ までの波長領域が主で、ここで対象としている波長領域では難しい。量子カスケードレーザーも将来有用になると考えられるが、THz 領域では低温が必要であり、まだ出力も大きくなく、パルス動作が中心で、高出力の cw 発振

にはもう少し時間が必要な状況である。特に、5~12 THz 領域は未開発である[13]。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。超短パルスレーザーによる THz 発生はスペクトル幅が非常に広いメリットはあるが、出力が小さく (mW 以下)、超短パルスの特徴を必要とする応用が見つからない。高出力ジャイロトロン (電子管) は GHz 帯域で重要な高出力光源であるが、やっと周波数が THz 領域に入った状況で、THz 帯域でまだ幅広く実用できる状況ではない。

したがって、ここで取り上げる 1~10 THz 領域では、分子ガスレーザーは発振波長に限られる問題があるが、狭帯域性、周波数安定性に優れたコヒーレントな光源として重要な役割を果たしている。

1.3 遠赤外レーザーを光源として利用するための条件

遠赤外分子レーザーの応用としては、古くからの固体物性、分子分光 (天文研究を含む)、核融合プラズマ研究等に、また新しくは、最近成功した高エネルギー電子ビームとの相互作用による γ 線生成研究に用いられている。さらに、医学面への応用も期待されているが、今後の課題である。遠赤外レーザーを計測用光源として利用するためには次の条件を満たしていることが必要である。

- (1) 目的に合致した最適波長での発振
- (2) 発振線の構成の単純さ (単一発振利用, 同時発振利用に対して)
- (3) ビーム広がり少ない単一モード発振 (セルフビート発生がない)
- (4) 直線偏光出力
- (5) 高出力動作
- (6) 高安定動作 (出力, 周波数, 偏光)
- (7) 低雑音発振
- (8) 取り扱いやすさ (メンテナンスフリーが望まれる)
- (9) 低運転コスト (特に使用レーザー媒質)
- (10) 高安全性 (人, 装置, 環境に対して)
- (11) パルスレーザーでは要求されるパルス幅

また、使用にあたってはこれらのレーザー特性がよくわかっていることが大切である。

放電励起分子レーザーでは、数 100 kHz に現れる雑音が計測を妨げるため、計測目的に応じて、パラメータの調整等で低減する必要がある[14]。特に、HCN (DCN) レーザーの場合はレーザー管壁へのポリマー (C, H(D), N 化合物からなる褐色のポリマー) 付着の問題、排ガスの処理等の問題も大きい[14]。

CO₂ レーザー励起の遠赤外レーザーの場合は、分子の振動回転遷移による励起のため、励起 CO₂ レーザーの周波数の安定性、縦横単一モード動作が重要であり、システムとしては励起光の遠赤外レーザー共振器からのフィードバック (バックトーク) 対策が特に重要である。この点に関しては後の章で詳しく述べる。

遠赤外波長領域を利用するためには、光源だけでなく、光学素子 (光学窓, ビームスプリッター等)、検知器、システム構成等も重要であり、未開発の部分が大きく、並行して開発しなければならない。

1.4 遠赤外レーザーとプラズマ計測

遠赤外レーザーのプラズマ計測への応用は早く、遠赤外レーザー出現の 4 年後には名古屋大学プラズマ研究所で cw337- μ m HCN レーザーを光源として干渉計測が行われた[15]。プラズマ計測の点では、干渉・偏光・散乱 (密度揺動) 計測用光源として、放電励起では、cw 高出力の得られる HCN レーザー (波長 337 μ m), DCN レーザー (波長 195 μ m), H₂O レーザー (波長 28 μ m) が、CO₂ レーザー励起では cw の CH₃OH レーザー (波長 119 μ m), CH₂F₂ レーザー (波長 184 μ m), HCOOH レーザー (波長 394 μ m, 433 μ m), CH₃I レーザー (波長 447 μ m) などが代表的な光源として現在でも用いられている[16]。イオン温度を測るための散乱 (協同イオントムソン散乱) 計測用のパルス CO₂ レーザー励起の 385- μ m D₂O レーザー開発に力を入れた時期もあったが[17]、ローザンヌ工科大学での散乱計測を最後に、姿を消した[18]。最近では、プラズマの高密度化、大型化が進み、ITER のような装置に対応するものとして 100 μ m 以下の短波長遠赤外領域で高出力発振する 48- μ m, 57- μ m CH₃OD レーザーが注目されている[19]。また、磁場閉じ込め高温プラズマにおけるレーザー応用計測に関しては本誌小特集で解説されており、参考にされたい[20]。

1.5 遠赤外分子レーザーの例

1.5.1 放電励起 337- μ m HCN レーザー, 195- μ m DCN レーザー

このタイプのレーザーは 1 本のレーザー管で済む便利さがあり、使える発振線は限られるが、今でも重宝なレーザーである。しかし市販品はなく、自己開発しなければならない。筆者らはプラズマ計測用光源として長さ 5 m の 337- μ m HCN レーザーと 195- μ m DCN レーザーを開発した[16, 17]。レーザー管は EH11 モード (直線偏光) で発振させるのがよく、誘電体導波管タイプ (HCN レーザーは内径 59 mm, DCN レーザーでは 43 mm のパイレックスガラス管を使用) とする。広がり角の小さいビームを得るためには口径が大きい方がよく、レーザー共振器はメッシュ出力鏡と金属平面鏡で構成する。遠赤外レーザーでは共振器の同調が必要であり、金属平面鏡を減速モーター駆動して共振器長を調整する。周波数や出力の安定化はこの長さを制御して行う。安定で高出力の発振には電極も重要で、LaB₆ や Ta の熱陰極が良い。放電励起のこの種のレーザーでは、管壁への褐色のポリマーの付着が出力低下の大きな原因となるため、この付着を防ぐ目的で、約 180 °C に保つようにする。HCN レーザー, DCN レーザーで現在得られている最大出力は 1.3 W である[16, 17]。この種の放電型のレーザーは陽光柱に縞模様が生じ、それが変動すると周波数も変動する。また、レーザー出力に放電に起因する 0~1 MHz の雑音が生じる。これ等は放電パラメーター (電流, ガス圧, ガス流量等) の調整で変わる。しかし、周波数の安定度, 出力, 雑音のすべてを最適にする動作条件はないために、利用目的に合わせてパラメーターを調整する必要がある[18]。HCN レーザーは 337 μ m 以外に 331 μ m, 373 μ m にレーザー発振が知られているが、共振器長の同調で単一

波長のレーザー発振が可能である。しかし、DCN レーザーは 189.95 μm , 190.01 μm , 194.70 μm , 194.76 μm に近接発振線があり、共振器の同調だけでは分離し難く、フィルター等の外部光学素子による波長分離が必要である。

1.5.2 CO₂ レーザー励起の 119- μm CH₃OH レーザー

励起用と遠赤外用の 2 組のレーザーを必要とするが、このタイプのレーザーは同じ装置で遠赤外レーザー分子を変えるだけでレーザー発振線を変えることができ便利である。励起用 CO₂ レーザーの共振器は、波長を変えるための回折格子と周波数調整のための共振器長微調機構（電圧駆動のピエゾ素子（PZT））を備えた ZnSe 出力鏡で構成する。計測用光源として優れた（高出力、単一モード、高安定性）遠赤外レーザーを実現するには、励起 CO₂ レーザー、遠赤外レーザー共に、レーザー管の真円性、直線性、共振器の安定性が特に重要である。励起 CO₂ レーザー長は、遠赤外レーザー分子のポンプオフセット周波数との関係で決める必要がある。

遠赤外レーザーはプラズマ計測ではビート変調型干渉・偏光計への応用のために双子型にすることが多い。CO₂ レーザー励起の遠赤外レーザーでは、励起 CO₂ レーザーと遠赤外レーザーの共振器が複合共振器を構成することになり、励起 CO₂ レーザー光の遠赤外レーザー共振器から戻るバックトークが周波数や出力の不安定さの原因となる。この対策が最重要課題である。筆者らは、励起光を遠赤外レーザー共振器へ斜入射させ、入射角度やビームの広がり角を調整して最適化している。遠赤外レーザーの周波数及び出力の安定動作のためには励起 CO₂ レーザーの周波数の安定化が特に重要であり、分子の吸収線を用いて制御するのが良い。レーザーの高出力動作のためには、励起 CO₂ レーザー、遠赤外レーザー共に冷却水の低温化が有用である。また、遠赤外レーザー管への He の混入が有効な場合がある。現在、230 W の 9P(36) cw CO₂ レーザー励起で、最大

出力 1.6 W の 119- μm CH₃OH レーザーが得られている [21]。

CO₂ レーザー励起の遠赤外レーザーは、非常に多くの発振線が報告されているが、1.1 節で述べた理由から実際に使用できるレーザー線を選択することが難しい状況にある。そこで、筆者らがプラズマ計測用の光源開発のためにレーザー線を探査し、得られたレーザー線の中から、比較的高出力で発振し、使い易いものを表 1（末尾）に参考として示す。48- μm , 57- μm CH₃OD レーザーや 119- μm CH₃OH レーザーを除けば、決して最適化された値ではないが、これらのレーザー線を用いて光学素子や検出器開発を行っている。

2. 短波長遠赤外レーザーの最近の開発状況

計測用の遠赤外レーザーは、その目的により重要度は異なるが、1.3 節で示した条件を満たさなければならない。ここでは、これらの要件を満たすべく筆者らが行っている CO₂ レーザー励起の短波長遠赤外レーザーの開発状況（レーザー装置、複数波長の発振、高出力化、安定化）について述べる。

2.1 波長 100 μm 帯、50 μm 帯のレーザーの開発

波長 100 μm 帯域の代表的なレーザーとして、9P(36) CO₂ レーザー励起の波長 119 μm の CH₃OH レーザーが挙げられる。核融合プラズマ計測では、電子密度や電流密度計測用の干渉計や偏光計の光源に使用されている。現在、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) の電子密度分布計測や SPring-8 における γ 線生成研究 (4.3 節) で実用されている。一方、CH₃OD を 9R(8) CO₂ レーザーで励起すると、波長 48 μm と 57 μm のレーザーが高出力で同時発振する。この波長帯域は、LHD の高密度実験や ITER 計測において最適領域であるが、まだ開発段階にある。現在、レーザーを含めた計測システムの開発を進めている (4.2 節)。図 1 に安定化システムも含めた CO₂ レーザー励起の遠赤外レ

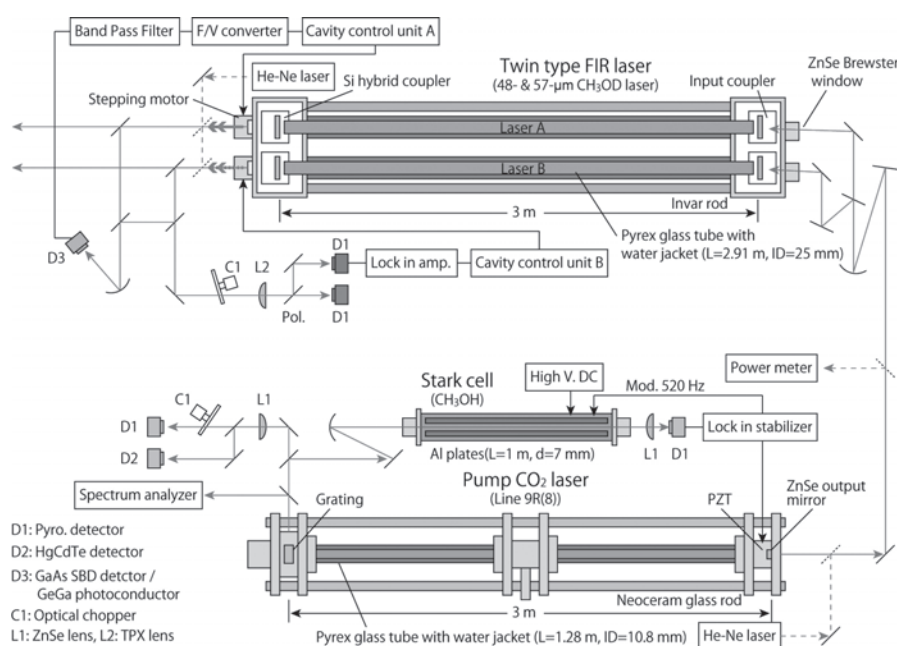


図 1 出力及び周波数安定化のための制御システムも含めた CO₂ レーザー励起の双子型遠赤外レーザー装置。

ザー装置を示す。本レーザー装置は、高精度の核融合プラズマ計測に用いるために高出力かつ高安定動作を目的として開発されたものである。基本的な構造は、LHD で使用されている 9P(36) CO₂ レーザー励起の 119 μm CH₃OH レーザー装置と同じであるが、9R(8)CO₂ レーザー励起の 48- μm , 57- μm CH₃OD レーザー用に最適化している。これらは、システム内の光軸変動や外部からの振動の影響を抑えるために 1.5 m \times 4.2 m の光学除振台の上に設置されている。

励起用 cw CO₂ レーザー装置は、プリュスター窓のない内部鏡タイプで、発振波長選択用の回折格子と周波数微調整のために PZT に取り付けられた出力鏡で共振器を構成している。回折格子は、格子定数 150 lines/mm, プレーズ波長 10.6 μm の Al コーティングの銅オリジナル格子である。出力鏡は、曲率半径 20 m, 反射率 55 % の ZnSe 平凹ミラーを用いている。また、高出力レーザー発振による損傷および熱歪を抑えるために、これらは水冷されている。共振器長の変化は、レーザー出力や周波数の安定性に大きな影響を与える。そこで、フリーランニング動作での安定化のために共振器マウントの間隔を低熱膨張率のネオセラムガラスロッド ($-1 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$) で固定している。レーザー周波数の長時間の安定動作が必要な場合は、分子の吸収線を用いて安定化する (2.4 節)。レーザー放電管は、水冷 2 重管構造 (長さ 1.25 m \times 2 本, 内径 10.8 mm) で 2 分割四電極方式を採用している。調整上の安全を考慮し、中央の 2 電極が負高電圧、両端は接地している。レーザーの単一

モード動作を実現するためには、レーザー管の真直度や真円度、レーザー光軸と放電軸とを一致させることが重要となる。そのために、レーザー管の構造や支持に工夫がされている。レーザーガスには、CO₂/N₂ 混合ガス (33 % : 67 %) と He ガスを用いている。本レーザー装置では、回折格子の角度を変えることで、9~11 μm の波長範囲で 90 本以上の発振線が選択できる。代表的な発振線である 10P(20) 線で 250 W, 119- μm CH₃OH レーザーの励起線である 9P(36) 線で 177 W, 48- μm , 57- μm CH₃OD レーザーの励起線である 9R(8) 線で 164 W の出力を達成している。図 2 は、約 110 W で発振させた 9R(8) 線の同調曲線 (共振器長を走査させたときのレーザー出力) とその時のセルフビート信号の有無及び安定化のためのシュタルクセルの透過信号を示している。48- μm , 57- μm CH₃OD レーザーのオフセット周波数は、約 2 MHz とセンター周波数に近く、図 2 に示すようにピーク付近ではセルフビートのない発振が得られている。

遠赤外レーザー装置は、ビート変調型干渉計の光源として用いる目的から、図 1 に示すように双子型 (プローブとローカル) となっている。励起 CO₂ レーザー光は、凹面鏡で絞られ、ZnSe ビームスプリッターで分割された後、遠赤外レーザー装置に入射される。共振器は、金コーティングの銅平面鏡 (励起光の入力側) とシリコンのハイブリッドカップラー (遠赤外光の出力側) で構成されている。光励起の遠赤外レーザーの場合、その構造上、遠赤外レーザー共振器から励起 CO₂ レーザー共振器への戻り光 (バックトーク) が発生する。これを防ぐために、入力鏡には直径 3 mm の入力結合孔を光軸から 9 mm 離れた位置に取り付けている。一方、出力鏡はシリコン基板上に CO₂ レーザー光の反射膜をコーティングし、その上にドーナツ状の金をコーティングしたハイブリッドカップラーである。出力鏡は、レーザー同調を行うためにステッピングモーター駆動の X 軸ステージに取り付けている (分解能 0.02 μm /pulse)。遠赤外レーザーの出力は、同調曲線のスロープ上の 1 点に、双子レーザー間のビート周波数は、F/V コンバーターと電子回路でステッピングモーターを制御して安定化する (2.4 節)。CO₂ レーザー装置と同様にフリーランニング動作での安定化のために、共振器マウントの間隔を低熱膨張のインバーロッド ($1 \sim 2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) で固定している。48- μm , 57- μm CH₃OD レーザーを共に単一モードで発振させるに

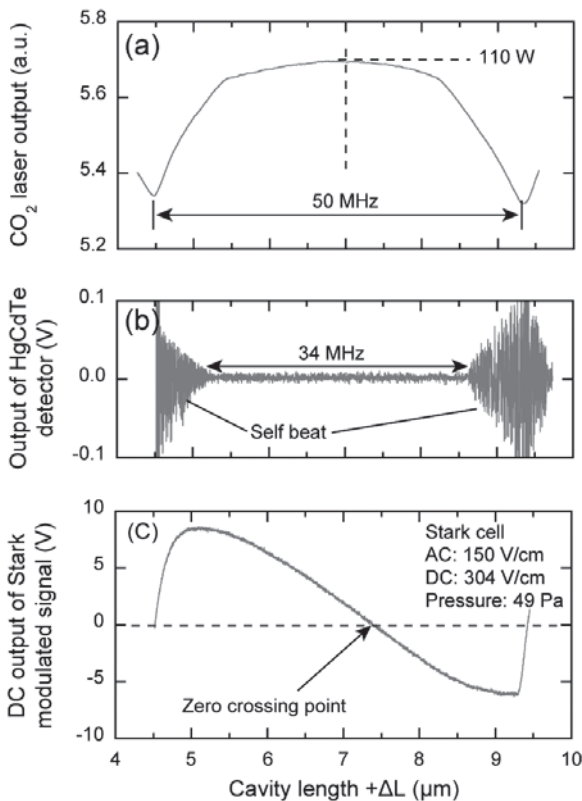


図 2 励起用 9R(8) CO₂ レーザーの (a) 同調曲線と (b) セルフビートの有無および (c) ロックイン検出したシュタルクセルの透過光の DC 出力信号。

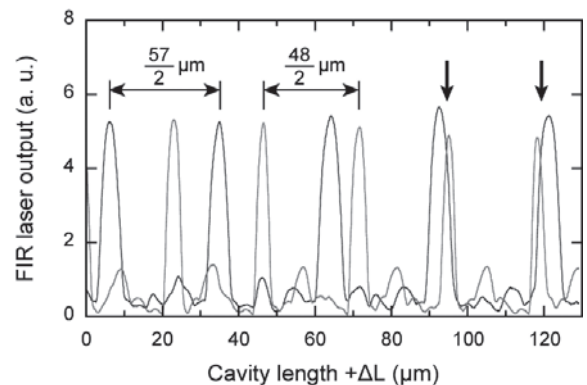


図 3 48- μm , 57- μm CH₃OD レーザーの同調曲線。

は、レーザー管の真直度と真円度が重要となる。そこで、管軸のズレが0.5 mm 以内の精度のレーザー管（水冷2重管構造、内径25 mm、長さ3 m）を製作し、使用している。真空窓として、入力側にはZnSeプリュースター窓、出力側にはCVD-ダイヤモンド窓を使用している。遠赤外分子レーザーの場合、共振条件を満足するために、共振器間隔を変化させて同調をとる必要がある。図3は、48- μm 、57- μm CH₃OD レーザーの同調曲線を示している。図中の矢印の位置で共振器長を固定することで、両レーザーの同時発振が可能となる。本レーザー装置では、48- μm 、57- μm CH₃OD レーザーにおいて2.4 Wの合計出力を得ている[22]。

2.2 遠赤外複数波長の同時発振

任意の複数波長で同時発振する遠赤外レーザーを使用することで、計測の幅を広げることが可能になる。例えば、プラズマ計測では、プラズマ装置の運転状況に合わせて密度の高くなる中心付近の計測コードには短波長のレーザーを、低密度領域には長波長のレーザーを利用するといったような使用方法もでき、適材適所の計測が可能になる。 γ 線生成研究では、多波長発振している遠赤外レーザーを用いることで、レーザーの波長の切替えにより、発生する γ 線のエネルギーの切り替え利用が可能になる。また、光学素子の特性測定や検出器の性能評価といったコンポーネント開発では、波長変換時のレーザー調整が不要となることから計測結果の再現性が良く、信頼性が向上すると共に計測時間の短縮にもなる。

光励起の遠赤外分子レーザーでは、単一波長励起で複数波長のレーザーが発振すること多い。しかし、実際に計測に用いられるのは、48- μm 、57- μm CH₃OD レーザーのケースを除けば、ほとんどの場合1波長のみである。その理由として、各遠赤外レーザー線の動作条件（発振圧力範囲、共振条件、発振線間の相互作用）によっては、同時に得ることが難しい、もし得られたとしても出力差が大きく実用にならない、希望する偏光方向や波長帯域で得ることが難しいことなどが挙げられる。

そこで、筆者らは図4に示すような2台（2波長）のCO₂ レーザー励起により、複数波長で同時発振可能な遠赤外レーザーを得ている[23]。本方法により、これを実現するための発振および装置の条件を以下に示す。

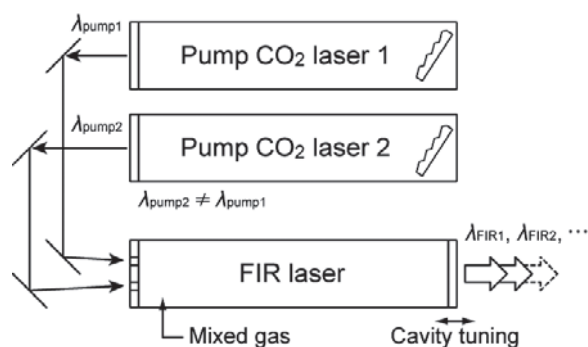


図4 2波長CO₂レーザー励起による多波長遠赤外レーザー発振の模式図。

- (1) 各遠赤外レーザー発振過程において、各CO₂ レーザー光の吸収と遠赤外レーザー光の放出が、独立の振動回転準位間および回転準位間で行われること。
- (2) 各遠赤外レーザー出力が共に同時発振する圧力領域を持っていること。
- (3) 2種類以上の遠赤外分子を使用する場合、各励起線で発振する遠赤外レーザー光に対して、混在する分子による吸収が十分小さいこと。
- (4) 各遠赤外レーザーの利得幅内で、共に共振条件を満たす共振器長があれば、同時発振が可能になる。
- (5) 複数の励起レーザー光を1本の遠赤外レーザー共振器の中に導入できる構造にする。
- (6) 各遠赤外レーザーに対して共用できる出力鏡を使用する。
- (7) 遠赤外レーザー光の偏光方向を選択するために、励起レーザー光の偏光方向を変えることができるようにする。

50 μm 帯と100 μm 帯を代表する9P(36)CO₂ レーザー励起の119- μm CH₃OH レーザーと9R(8)CO₂ レーザー励起の57- μm CH₃OD レーザーの同時発振の実験結果を図5に示す。図5は、2波長（9P(36)線と9R(8)線）のCO₂ レーザーをCH₃OHとCH₃ODを封入した遠赤外レーザー装置に入射し、発振した遠赤外レーザー光を回折格子分光器で観測した分光パターンを示している。従来不可能であった波長119 μm と57 μm のレーザー光を一台の遠赤外レーザー装置から同時に得ることができた。現在、レーザーの動作特性（励起パワーの依存性、混合ガスの流量比や圧力依存性、出力や周波数の安定性など）を調査し、計測用光源として実用可能な多波長遠赤外レーザーの開発を行っている。

2.3 遠赤外レーザーの高出力化

CO₂ レーザー励起の遠赤外レーザーの高出力化の方法として、(1)励起CO₂レーザーの高出力化、(2)発振波長に合わせた遠赤外レーザー装置の最適化、(3)動作圧力の最適化、(4)レーザー管の冷却やバッファガスの添加が挙げられる。(1)の方法は、遠赤外レーザーの出力を直接的に高める方法で効果的である。CO₂ レーザーは利得が高く、レーザー管の冷却や共振器長を長くすることで比較的容易に高出力化が可能である。ただし、CO₂ レーザーの中

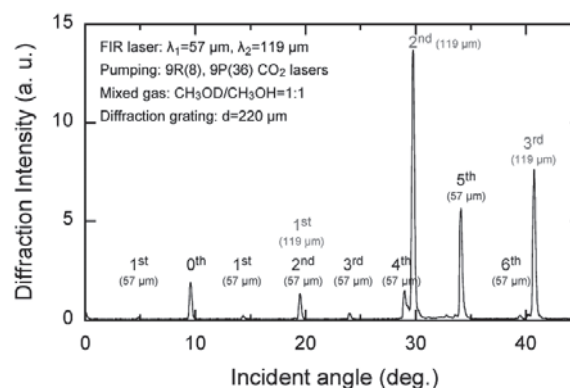


図5 回折格子分光器により観測した2波長同時発振している遠赤外レーザー（波長57 μm 、118 μm ）の分光パターン。

心周波数と遠赤外分子の吸収線が必ずしも一致しないので（オフセット周波数がある）、共振器長を長くすることには限界がある（縦モード間隔が狭くなる）。（2）の方法としては、励起 CO_2 レーザー光の遠赤外レーザー共振器への入射角度およびビームの広がり最適化、レーザーの利得内であれば共振器長を長くする、遠赤外レーザー光に対して透過率の高い出力鏡や出力窓を使用することなどが挙げられる。（3）の遠赤外レーザーの動作圧力には、レーザー管径や励起パワーに依存するある最適な範囲が存在する。これは、圧力が低くなるとレーザー媒質の密度が小さくなり十分な利得が得られず、圧力が高くなると分子間の衝突の割合が増えるからである。（4）は、レーザー管の冷却やバッファガスによる脱励起の効果[24]で出力を増加させる方法である。

以上の方法で出力を増幅させることが可能である。しかし、実際に計測に使用する場合、その安定度も重要となることから、例えば、バックトークによる影響を抑えるために、あえて高い圧力で動作させるほうが良い場合もある。これまでに、48- μm 、57- μm CH_3OD レーザーに対して装置の最適化や高出力化を行った結果、138 W の CO_2 レーザー励起で、 -6°C までレーザー管を冷却し、バッファガスとしてヘリウムを添加することで両レーザー合わせて、約 2.4 W の出力を得ている。このとき、両レーザーの出力比から 57- μm レーザーの出力は最小で見積もって約 1.6 W、48- μm レーザーの出力は最高で見積もって約 0.8 W である。この帯域における cw のレーザーとしては、世界最高出力を達成している[22]。

2.4 遠赤外レーザーの安定化

計測用光源として遠赤外レーザーを使用する場合、高出力であることに加えて、安定であることも要求される。 CO_2 レーザーや遠赤外レーザーも他のレーザーと同様に、増幅機能を持つレーザー媒質、共振器、光学系とそれらを取り囲む環境で構成されている。レーザーの出力や周波数の変動は、これら構成要素の各パラメーターの変化やそれらの相互作用が重なって起こる。フィードバック制御により安定化するには、まずフリーランニング動作で十分安定でなければならない。そのためには、まず機械的に安定であることが重要である。例えば、真空ポンプ、エアコン、空冷用ファン、人の歩行やドアの開け閉めなどは、レーザー管、共振器、プリズム窓、ビームスプリッターや光学ミラーなどに機械的・音響的振動を与える。温度変化やレーザー各部の温度分布の違いは、レーザー管の変形、共振器長の変化、光軸のずれや屈折率の変化の原因となる。したがって、レーザー架台の構造や強度、レーザー管の支持方法、共振器用ミラーホルダーおよび光学窓や光学素子の材質・強度および支持方法などを工夫する防振対策も考えなければならない。

励起 CO_2 レーザーの出力や周波数の変動は、遠赤外レーザーの出力に強く依存する。特に、周波数の安定化が重要となる。励起 CO_2 レーザーのフィードバック制御による安定化の方法としては、これまでにいくつかの方法が報告されているが[25]、ここでは図 1 に示す外部シユタルクセル

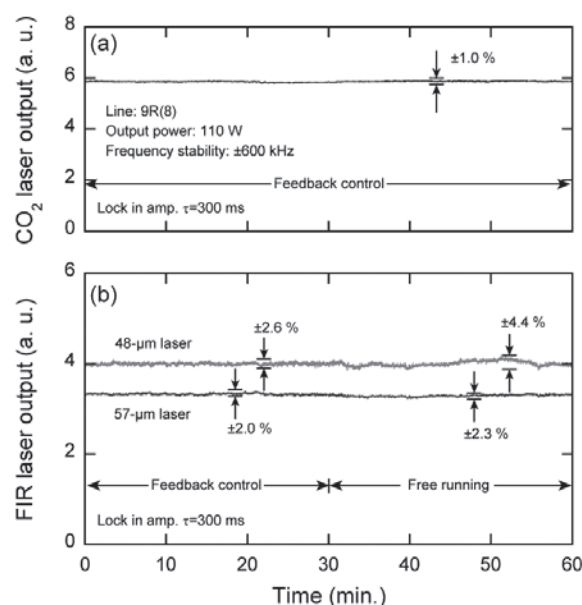


図 6 同時発振時における 48- μm 、57- μm CH_3OD レーザーの出力安定度。(a)周波数安定化した励起 9R(8) CO_2 レーザーの出力、(b)48- μm レーザーが一定の出力となるような制御の有無における 48- μm 、57- μm レーザーの出力安定性を示している。

変調による周波数安定化[26]について述べる。 CO_2 レーザー共振器外に配置したガスセルには、2 枚のアルミ板が平行に並んでいる。この電極板には、 CO_2 レーザー発振線と吸収分子の吸収線を一致させるための DC 電圧と、変調用の AC 電圧を印加する。そして、セルの透過光強度の変化をロックインスタビライザーにより位相検出し、 CO_2 レーザー共振器長を制御する。図 2 (C) は、 CH_3OH を封入したセルの透過信号をロックインスタビライザーで検出し、その出力信号を示している。この信号が、ゼロクロス点を保持するように共振器長の制御が行われる。この方法は、誤差信号を得るためにレーザーの内部変調を必要とせず、DC 電圧を変えることにより広範囲の任意周波数で安定化できる利点がある。我々のレーザー装置では、110 W で発振させた 9R(8)線において、単独動作で $\pm 0.74\%/\text{h}$ の出力および $\pm 580\text{ kHz}/\text{h}$ の周波数安定度を得ている。正確には、アラン分散による評価が必要であるが、ここでは変動の P-P 値から算出している。また、遠赤外レーザー装置に入射した状態（バックトークが発生している）であっても、図 6 に示すように $\pm 1.0\%/\text{h}$ 、 $\pm 600\text{ kHz}/\text{h}$ の安定動作が可能である。

遠赤外レーザーの出力を安定化させるには、バックトークの軽減が重要となる。その方法として、偏光を利用した光アイソレーター[27]やリング共振器を使うなどがあるが、本装置では、励起光を斜入射することでそれを行い、入射角度やレーザー管内での励起ビームの広がり最適化により、バックトークの大きさ（遠赤外レーザー共振器長の変化に対する CO_2 レーザー出力の変動から見積もる）を $\pm 1.4\%$ 程度に抑えている。出力および周波数の安定化の方法としては、同調曲線のピークで出力を変調する方法、気体の吸収曲線を利用する方法[28]、ミリ波源との高調波ミキシ

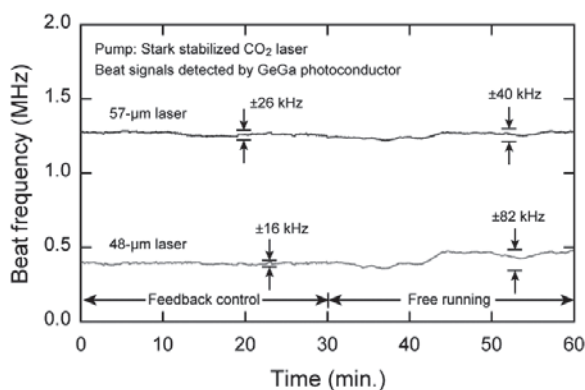


図7 同時発振時における48- μm 、57- μm CH_3OD レーザーのビート周波数安定度。48- μm レーザーのビート周波数が一定となるような制御の有無における両レーザーのビート周波数安定性を示している。

ングをする方法[29]などがある。

プラズマ計測では、ビート周波数の位相変化を測定するために、その安定度が重要となる。双子型のレーザー装置を使用する場合の安定化の方法として、図1のように出力安定化したレーザー(B)に対して、もう一方のレーザー(A)をオフセットロックする方法がある。遠赤外レーザーの出力は、同調曲線のスロープを利用して安定化する。同時発振している47- μm 、57- μm CH_3OD レーザーの場合、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制御することで、図6に示すように、48- μm レーザーでは $\pm 2.6\%$ /30 min.、57- μm レーザーでは $\pm 2.0\%$ /30 min. の出力安定度を得ている。出力安定化と同様に、48- μm レーザーのビート信号を用いてフィードバックループを形成し安定化した結果を図7に示す。フリーランニング時に見られるドリフトが除去でき、48- μm レーザーでは $400 \pm 16\text{ kHz}$ /30 min.、57- μm レーザーでは $1260 \pm 26\text{ kHz}$ /30 min. のビート周波数の安定度を得ている。

3. 遠赤外周辺技術開発と課題

遠赤外レーザーを光源とする計測システムを構築するには、光学素子や検知器といった周辺技術の開発も重要となる。特に、波長50 μm 付近の遠赤外領域は、これらの開発が遅れている。ここでは、先に述べたレーザー開発と並行して行っている48- μm 、57- μm CH_3OD レーザー用の光学素子と検出器の開発の現状とその課題について述べる。

3.1 遠赤外光学素子

一般に、遠赤外領域の光学材料として、結晶水晶、サファイヤ、シリコンなどの結晶材料、ポリエチレン、テフロン、TPXなどの高分子材料がよく使用される。また、フィルターやポラライザーとして金属メッシュやワイヤーグリッドも用いられ、最近では、遠赤外領域でのメタマテリアルの開発研究も行われている[30]。

プラズマ計測における主な光学素子として、プラズマ装置、ビーム伝送のための導波管、レーザー装置の窓や干渉計や偏光計のビームスプリッター／コンバイナーなどが挙げられる。これら光学素子に最適な材料を選択し、それを設計することが重要となる。窓およびビームスプリッター

／コンバイナーに要求される主な条件を以下に示す。

- (1) 遠赤外光に対して吸収が小さく、光学系のアライメントのために可視光に対して透明であること。
- (2) 機械的強度に優れていること（大気圧や機械的振動に強い）。
- (3) 熱的強度に優れ、放出ガスが少ないことや熱膨張率が小さいこと。
- (4) 高周波電磁波やX線のような放射線に対して丈夫で経年変化がないこと。
- (5) 窓の場合、戻り光を防止するために傾けた状態で最大透過が得られること。
- (6) ビームスプリッター／コンバイナーの場合、 45° 入射に対して、任意の透過率と反射率が得られること。

現在、LHDの119- μm CH_3OH レーザー干渉計では、光学素子として結晶水晶エタロンを用いている。しかし、結晶水晶は、48- μm 、57- μm CH_3OD レーザーに対して吸収が大きく、使用できない。そこで、我々は結晶水晶に代わる材料を調査し、設計する上で必要となる光学定数（屈折率 n と吸収係数 α ）を測定した。窓やビームスプリッター／コンバイナーの透過率や反射率を数%以内の精度で得るには、少なくとも4又は5桁以上の屈折率と2桁以上の吸収係数が必要となる。そこで、光学定数は、エタロンの多重反射によるレーザー光の透過率測定法から求めた[31]。この方法は、赤外フーリエ分光法（FT-IR: Fourier Transform Infrared Spectrometry）やテラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS: THz Time Domain Spectroscopy）のように幅広い波長領域での値を得ることはできないが、実際にプラ

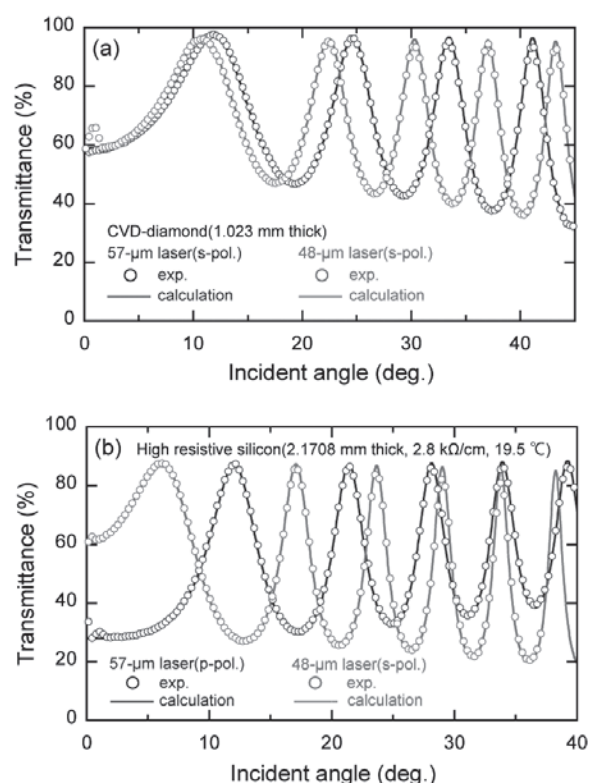


図8 (a)CVDダイヤモンドと(b)高抵抗シリコンエタロンの48- μm 、57- μm CH_3OD レーザーに対する透過率の入射角度依存性。

ズマ計測に使用するレーザー波長に対して、信頼性が高く、より高精度の値を得ることできる。図8は、回転する高抵抗シリコンエタロンとCVD-ダイヤモンドエタロンに対する48- μm 、57- μm CH₃OD レーザーの透過率を示している。光学定数は、エタロンの厚さ、レーザー波長、各ピークの透過率およびその時の入射角度から求める。例えば、高抵抗シリコン（抵抗率2.8 k $\Omega \cdot \text{cm}$ 、温度19.5℃）の57- μm レーザーに対する光学定数は $n = 3.4164 \pm 0.0005$, $\alpha = 0.36 \pm 0.05 \text{ cm}^{-1}$, 48- μm レーザーでは $n = 3.4164 \pm 0.0005$, $\alpha = 0.33 \pm 0.05 \text{ cm}^{-1}$ であった。これらの値を用いたエタロンの透過率の計算値と実測値は良く一致しており、多チャンネルの計測システムにおける効率的なビーム分配の設計が可能である。

48- μm 、57- μm CH₃OD レーザー用の光学材料として、CVD-ダイヤモンドは、その性質から最適な材料であるが、高価である。一方、高抵抗シリコンは、可視光に対して不透明であるが、吸収が小さく適した材料といえる。現在、筆者らが開発している干渉・偏光計のテストスタンド(4.2節)では、ビームスプリッター／コンバイナーとして多数の高抵抗シリコンエタロンを用いており、その光学系のアライメントには可視のHeNe レーザー（波長633 nm）に加えて赤外のYAG レーザー（波長1.06 μm ）を利用している。また、高抵抗シリコンを用いた光弾性変調器（Photoelastic Modulator: PEM）を偏光計測に利用している[32]。その他の材料としては、半導体デバイスとして知られるシリコンカーバイド（SiC）も興味深い材料である。SiCは様々な結晶多形（ポリタイプ）があるが、6H-SiCは可視光に対して透明で、高抵抗シリコンほど吸収係数は小さくないが、結晶水晶よりも小さいことがわかっている[33]。

3.2 遠赤外検出器

一般に、遠赤外領域で使用される検出器には、熱型検出器、量子型検出器、電磁波直接検波型検出器などがある[34]。また、最近では高感度のTHzカメラも各メーカーから市販されている。

熱型検出器は、遠赤外光の吸収による温度変化を利用するもので、ボロメーターやパイロ検出器などがある。応答速度は遅いが、幅広い波長領域に感度を持っている。量子型検出器は、遠赤外光の光子による光伝導度の変化を利用するもので、Si:Sb 光導電検出器、Ge:Ga 光導電検出器やInSb 光導電検出器がある。波長依存性があり、波長範囲は限られているが、応答速度は速い。また、極低温（液体ヘリウム温度）まで冷却する必要がある。電磁波直接検波型検出器は、遠赤外光を電磁波として、電波と同様にアンテナで受信し、ダイオードの非線形性を利用して検出するもので、GaAsショットキーダイオードやMOMダイオードなどがある。アンテナの構造や素子のカットオフ周波数によって波長範囲は制限されるが、応答速度が速く、室温で動作する。

プラズマ計測における検出器に要求される性能としては、広帯域特性（ヘテロダイン検波の中間周波数>数MHz）を持っていること、長時間安定動作すること、計測

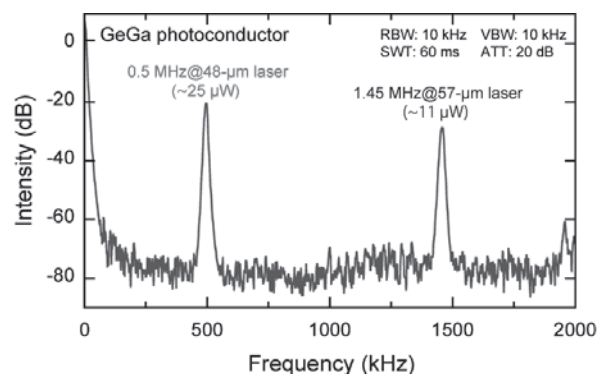


図9 Ge:Ga フォトコンダクターにより同時検出した48- μm 、57- μm CH₃OD レーザーの各ビート信号。

システムが多チャンネル化のために、使用するレーザー波長に対して十分な感度を持ち、高S/Nであることなどが挙げられる。これまでに、Ge:Ga 光導電検出器、InSb 光導電検出器、ショットキーダイオードが用いられている。現在、LHDの119- μm CH₃OH レーザー干渉計では、ミキサーとしてショットキーダイオードを用いている。ショットキーダイオードは、その性質から優れた検出器／ミキサーであるが、実用は3 THz までとされている。これは、短波長化に伴い、より微細なアンテナ構造にする必要があることやカットオフ周波数に近くなるためである。48- μm 、57- μm CH₃OD レーザーに対しては、検出感度が低く[35]、使用することが難しいのが現状である。今後の更なるMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の進歩により、5～6 THz において十分な感度を持つショットキーダイオードが利用できることを期待している。

現在、筆者らが開発している干渉・偏光計のテストスタンド(4.2節)では、検出器／ミキサーとしてGe:Ga 光導電検出器 (QMC Instruments Ltd) を用いている。この検出器のピーク感度は、100 μm 付近であるが、50 μm 帯においても十分な感度を持っている。48- μm 、57- μm CH₃OD レーザーに対する検出感度は、それぞれ約1.4 kV/W、約1.9 kV/Wと非常に高い。図9は、テストスタンド上でGe:Ga 光導電検出器により同時検出した48- μm 、57- μm CH₃OD レーザーの各ヘテロダインビート信号である。双子型レーザー装置の一方に対して他方の共振器長をわずかにずらして発振させ、各レーザー光をヘテロダイン検出したものである。1.45 MHzに対応するものが57 μm のビート信号であり、0.5 MHzに対応するものが48 μm のビート信号である。このときの入力パワーは、48- μm レーザーは約25 μW 、57- μm レーザーは約11 μW であり、多チャンネル干渉・偏光計を組み上げる上で十分なS/Nを持つことが確認された。観測されたビート周波数は、遠赤外レーザーの共振器の調整とレーザーガス圧の調整によってある程度任意の値に調整可能である。

4. 遠赤外レーザー応用と将来展望

遠赤外レーザーの応用としては、遠赤外領域の要素技術や計測システム開発研究、物理研究用の有用な光源としての利用がある。前者には検知器開発、光学素子開発、計測

システム開発等があり、後者には標準研究（周波数の絶対値測定）、分子分光研究（分子の振動回転準位の吸収や放出研究、分子構造研究、星間分子研究等）、固体物性研究（例えば、電子スピン共鳴（ESR）やレーザー磁気共鳴（LMR）研究）、核融合プラズマ物理研究等がある。現在、計画が進んでいる ITER では、短波長遠赤外レーザーによる電子密度分布計測等も検討されている。最近では、原子核物理実験のために高エネルギー電子ビームと高出力遠赤外レーザーとの相互作用（逆コンプトン散乱）を利用した低エネルギーγ線生成研究でも注目を浴びている。それらの研究例を紹介する。また、近年、テラヘルツパルス波の研究（発生、検出、計測）が盛んに行われていることから、テラヘルツパルス波の特徴とその応用についても紹介する。

4.1 テラヘルツ波パルス光源とその応用

周波数帯の定義は多様であるが、テラヘルツ帯とは、周波数0.1～100 THzの領域を指すことが多く、この帯域は遠赤外領域とも呼ばれる。テラヘルツ帯の光源には、1.2節で述べた様に各種あるが、近年のフェムト秒レーザーの発達や半導体作成技術の進歩によりテラヘルツ波パルス光源の開発研究が急速に進展している。フェムト秒レーザーを励起光源とするテラヘルツ波発生は、大きく分けて、(1)光伝導スイッチ素子と(2)非線形光学結晶を用いた2つの方法がある。(1)はマイクロストリップアンテナを付けた半導体素子に超短パルスレーザーを照射することで生じる超高速電流変調によってテラヘルツ波を発生させるものである。(2)は2次の非線形電気感受率を持つ非線形光学結晶に超短パルスレーザーを照射し、光整流効果によりテラヘルツ波を発生させるものである。得られるテラヘルツ波は、位相関係を保った広帯域な周波数成分からなるサブピコ秒の電磁波パルスである。その検出には、発生と同じ光伝導スイッチ素子を用いる方法や電気光学（EO: Electro-Optics）結晶を用いたEO効果サンプリングによる方法がある。どちらも、サブピコ秒のパルスの時間波形を瞬時に観測することはできないので、遅延時間をスキャンすることで、テラヘルツ波の電場の実時間波形を観測する。現在では、数10 THz以上の超広帯域テラヘルツパルス波の発生・検出が報告されている。

テラヘルツパルス波の応用としては、その特徴からテラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS）の光源としての利用が

主となっている。図10に、光伝導アンテナを用いた THz-TDS システムの例を示す。分光計測には、従来からフーリエ分光法（FT-IR）が用いられているが、最近では THz-TDS による測定も多くなされ、各メーカーから THz-TDS システムが市販されている。THz-TDS は、テラヘルツパルス波を試料に入射させた時の透過光または反射光の信号波形と、試料を取り除いた時の信号波形を測定し、これらをフーリエ変換し、その振幅強度と位相の周波数成分を得る測定法である。従来のフーリエ分光法と異なり、強度情報と位相情報を同時に計測できることが利点となっている。また、レーザーと非線形光学結晶を用いたテラヘルツ波発生には、パラメトリック過程や差周波発生による狭帯域のテラヘルツ波発生があるが、これらも含め、多くの解説があるのでそれを見られたい[36-39]。

4.2 核燃焼プラズマ計測への応用

核融合研究の最終目標である核燃焼プラズマの実験が国際協力によって進められている（ITER 計画）。ITER 計画を進める上で、密度分布や磁場分布の計測は必須なのである。ここでは、核燃焼プラズマの計測を目的として開発を進めている短波長遠赤外レーザー干渉／偏光計測について紹介する。

4.2.1 ITER のポロイダル偏光計測

図11は ITER のポロイダル偏光計[40]の概念設計である。上部および水平ポートプラグから15チャンネルの計測コードに対して、119-μmCH₃OH レーザーによるファラデー回転計測とコットン・ムートン偏光計を用いる設計となっている。干渉／偏光計測では、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）と計測信号の大きさから最適なプローブ波長が決定される。今、磁場に閉じ込められたプラズマ中を直線偏光した電磁波（波長：λ）がz方向に伝搬すると、電磁波は次式で与えられる位相と偏光角の変化を受ける[41]。

$$\varphi = 2.82 \times 10^{-15} \lambda [\text{m}] \int n_e(z) [\text{m}^{-3}] dz \quad (1)$$

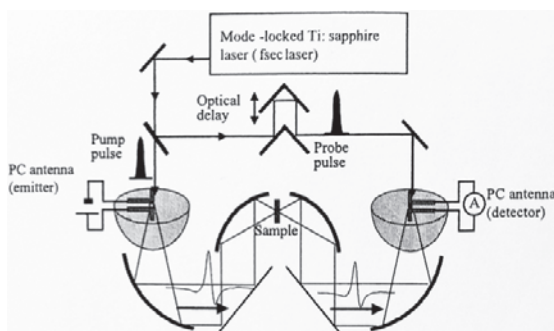


図10 テラヘルツ時間領域分光システム[38]。

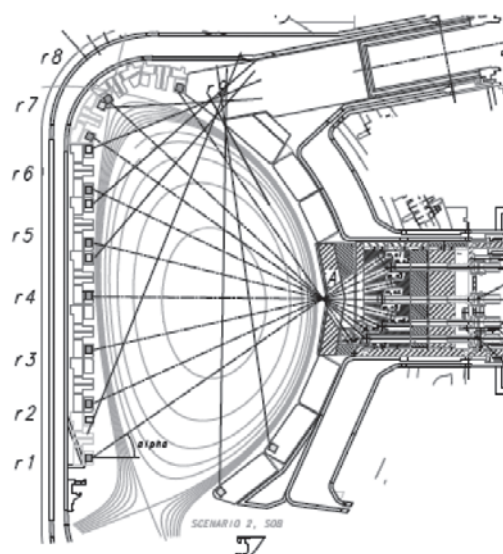


図11 ITER のポロイダル偏光計の断面図。

$$\Omega = 2.62 \times 10^{-13} \lambda^2 [\text{m}^2] \int n_e(z) [\text{m}^{-3}] B_{\parallel} [\text{T}] dz \quad (2)$$

ここで、 $n_e(z)$ は電子密度、 ϕ はプラズマによる位相変化、 Ω はファラデー効果による回転角である。一般に干渉／偏光計測では、この2つの物理量の測定から、プラズマの電子密度と内部磁場分布の情報を得ている[42]。偏光角の計測では、レーザービームの伝搬方向の磁場の情報が得られるが、垂直方向の磁場成分 (B_{\perp}) がある場合には (3) 式で与えられる磁気的複屈折効果 (コットン・ムートン効果) を考慮する必要がある[43]。一般には、この効果が無視できる条件下でファラデー回転角を計測することが望ましいが、そうでない時は、この楕円度を同時に計測し、両者のカップリングの影響を評価する必要がある。なお、コットン・ムートン効果によって O/X-mode 間に生じる位相差 ε は次式で与えられる。

$$\varepsilon = 2.45 \times 10^{-11} \lambda^3 [\text{m}^3] \int n_e(z) [\text{m}^{-3}] B_{\perp}^2 [\text{T}^2] dz \quad (3)$$

これらのパラメーターの波長依存性を ITER の代表的な放電条件下 (磁場強度: 5.3 T, プラズマ電流: 15 MA, 中心電子密度: $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) で図11のNo.r 5 計測コードについて評価したものを図12に示す。図から、現在、ITER で計画している波長 119 μm のレーザー計測システムではコットン・ムートン効果が無視できない大きさであること、ビー

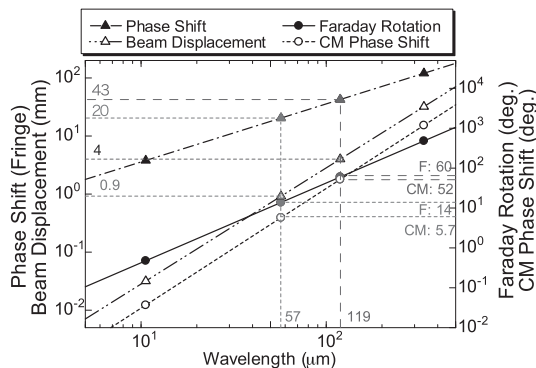


図12 ITERの代表的なプラズマパラメータを用いて計算した干渉位相変化量、ファラデー回転、コットン・ムートン効果、図11のチャンネル5の反射鏡位置におけるレーザー光のシフト量の波長依存性。

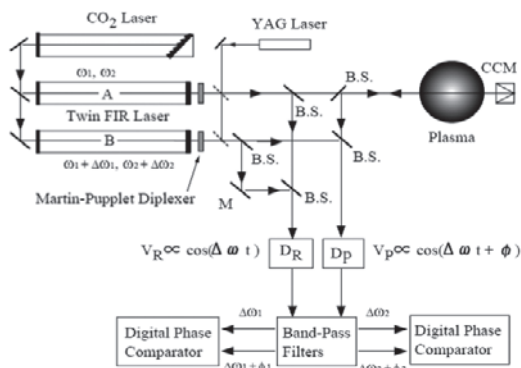


図13 2波長同時発振型レーザーを用いた干渉計の概念図。

ムの屈折効果が大きいことがわかる。コットン・ムートン効果とファラデー効果の同時計測がまだ確立されていないことから、コットン・ムートン効果が無視できる波長を選択するとすれば、次の候補は波長 10 μm のCO₂レーザーとなるが、ファラデー回転角は1度以下となって十分なS/Nが得られない。そのため、この中間の領域に位置する波長 50 μm 帯のレーザー計測法の開発が望まれている。

4.2.2 2波長干渉計測への応用

図13に新型2波長レーザー干渉計装置[44]のブロックダイアグラムを示す。双子型の遠赤外レーザー(A,B)からは、48 μm と 57 μm のレーザー発振線 (ω_1, ω_2) と、各周波数に対してわずかに異なる周波数の発振線 ($\omega_1 + \Delta\omega_1, \omega_2 + \Delta\omega_2$) が得られる。レーザー A の主成分はプラズマ中を伝搬した後、リトロ反射鏡 (CCM) によって反射され、再びプラズマ中を伝搬した後、検出器 DP に導入される。一方、ビームスプリッター (B.S.) によって分けられた一部のレーザー光はリファレンス光として検出器 (DR) に導入される。それぞれのレーザー光は、局部発振光 (レーザーB) によってヘテロダイン検出される。検出器 DP と DR の出力には、48 μm と 57 μm レーザー光のそれぞれの干渉信号が含まれているが、それぞれのビート信号の周波数が異なるため電気的なバンドパスフィルターを用いることによって分離できる。周波数分離された2つのビート信号成分は、各々のレーザー光の干渉信号成分に対応しており、位相検出器によって変動成分が検出されることになる。

この干渉計の特徴は、(i)同一のレーザーからの2波長同時発振を用いている、(ii)発振波長が48 μm と 57 μm であり、現在の大型磁場閉じ込め装置の干渉計測装置に用いられている波長 119 μm レーザーと比べて、プラズマによる屈折効果が約4分の1となり高密度プラズマに対応できる、(iii)使用する2波長の値が近接していることから、同じ光学素

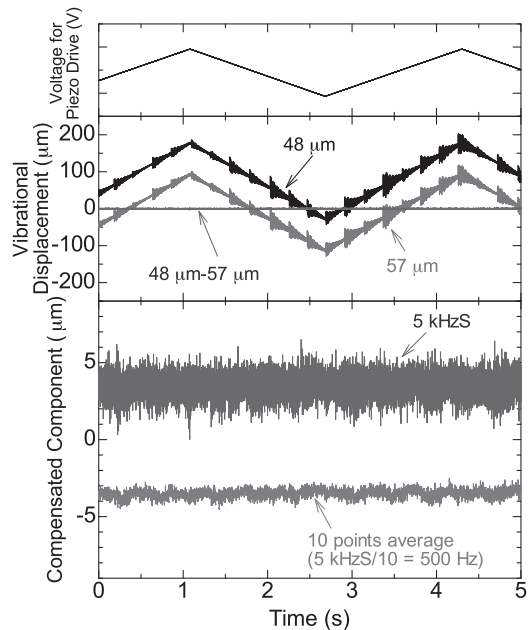


図14 2波長 (57 μm , 48 μm) 干渉計の測定結果。上から反射鏡駆動用ピエゾ素子の制御信号、2波長干渉計で計測した位相変化とその差分、そして差分を拡大したものである。

子及び検出器を利用できる、(iv)レーザーの出口から検出器まで全く同じ光学経路を伝搬することから、理想的な機械的振動の補正が期待できること等である。

短波長遠赤外レーザーを用いた2波長干渉計の性能試験のためにテストスタンドを組み上げた。ビームスプリッター／コンバイナーには、高抵抗シリコンエタロンを使用し、液体ヘリウム温度で動作するGe:Ga光導電検出器により2波長のビート信号を検出した(図9)。機械振動を模擬するために、反射鏡はピエゾ駆動型ステージに取り付けられている。図14に両レーザーのビート信号の位相変化から求めた変動量とその差分を示す。反射鏡の駆動振幅はおおよそ200 μm (p-p)であり、周波数は約0.3 Hzである。高周波振動成分の補正性能を見るために、反射鏡ホルダー部に機械的な振動を与えている。低周波成分、高周波成分ともに計測された振幅の大きさは、2つのレーザー干渉計ともほぼ同じであることから、この2波長干渉計を用いて機械的振動の補正が可能であることが確認された。

4.2.3 偏光計測への応用

偏光角度の測定には、図15に示すPEMを2台用いた方式を採用した[29]。本方式は、角度・時間分解能が高く、光学系も簡素である、また、信号強度の比を用いるため、レーザーの出力・周波数変動の影響を受けにくい利点を持つ。

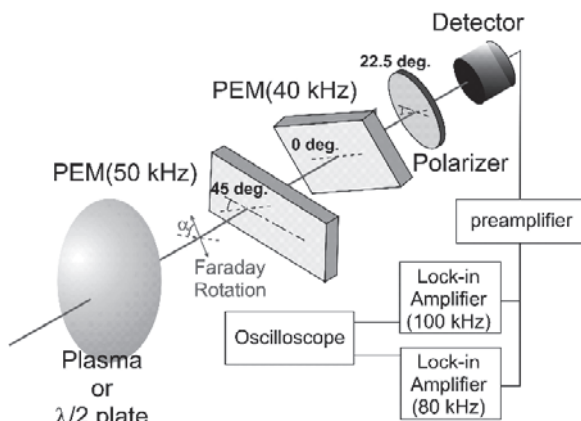


図15 2台のPEMを用いた偏光計の概念図。

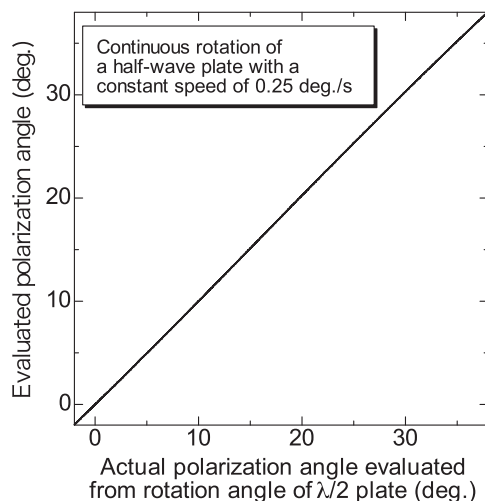


図16 1/2波長板の光学軸回転角度から評価した真の偏光角と偏光計で評価した偏光角の関係。

つ。しかし、PEMの使用はこれまで可視～赤外領域に限定されていたため、50 μm 帯で透過特性の良い高抵抗シリコンを光弾性素子とした遠赤外線領域用PEMを新たに開発した。長波長域では変調効率を決める光学遅延量が小さい問題があるが、偏光計測に十分な遅延量 $\lambda/4$ が得られた。

プラズマによる偏光面回転を1/2波長板の光学軸を回転して模擬し、真の回転角と偏光計で評価した偏光角の関係を図16に示す。両者の間に良い直線性が得られている。現在得られている偏光角分解能は、時定数1 ms(0.1 ms)で0.01度(0.025度)である。ファラデー回転角、線平均電子密度、磁気データに、それぞれ0.05度(57 μm)、 $2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 、0.2 mTの誤差を仮定し、ITERの平衡再構成を行うと、q分布の誤差が約5%となる。ITERにて要求されるq分布計測精度は、時間分解能10 msで10%であるため、本偏光計では、ITERの要求を十分満足する測定精度が達成されたと言える。

4.2.4 2波長干渉・偏光同時計測

ここでは、最終目的である2波長同時発振型レーザーを用いた干渉・偏光計測法の開発の現状について紹介する。図17は、2波長レーザー光を用いた干渉・偏光計測システムの概念図である。このシステムは、図13の2波長干渉計に偏光角の検出部を追加したものである。プラズマを透過したプローブ光をビームスプリッター(BS4)で分岐した後、PEMを用いた検出法で偏光角を計測する。一つの波長を選択するためのフィルターとして#1000のNiメッシュを用いたファブリペロー干渉計を用いている。テストスタ

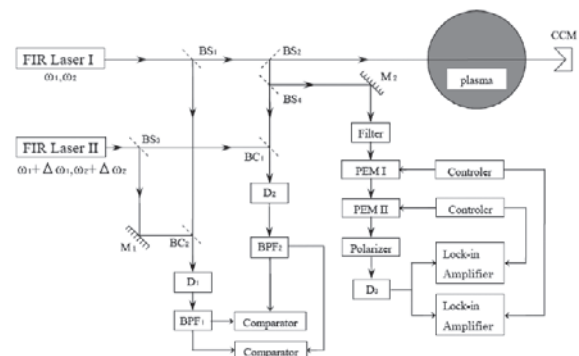


図17 2波長干渉・偏光計の計測システム概念図。

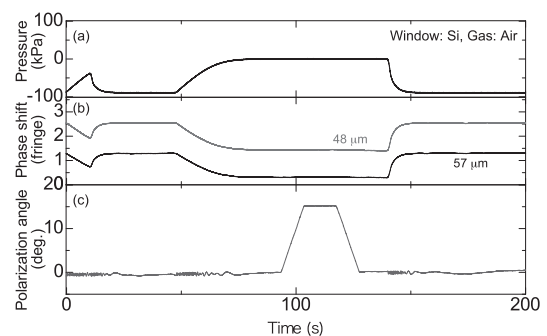


図18 2波長レーザー干渉・偏光計を用いて計測した干渉位相と偏光角の時間変化。干渉位相の変化はガスセルの圧力変化によって、偏光角の変化は波長板の回転によって与えている。

ンドではプラズマを用いたテストはできないので、干渉光学系の経路内にガスセルを導入し、そのガス圧を変化させることでプラズマの密度変化を模擬した。図18に実験結果を示す。図18(a)はガスセル内の圧力の時間変化を示し、図18(b)は圧力変化に伴って観測される干渉位相の変化を示しており、その大きさはガスセルの長さや圧力の変化量から予想される値となっている。図18(c)は偏光角の変化量であり、圧力がほぼ一定のところでは1/2波長板を回転している。十分なS/Nで偏光角と干渉位相変化が検出されている。この波形では、圧力の変化時に偏光角の計測信号に細かな振動成分がみられる。これは、ガスセルの真空窓に使用したシリコン板が圧力変化に伴うストレスの影響を受けたものと考えている。なお、実際のプラズマ実験ではこの影響は無視できる。

以上、50 μm 帯の短波長遠赤外レーザーによるITERのポロイダル偏光計への適用に向けた計測システムの開発の現状を紹介した。この波長領域は、これまでに実際のプラズマ計測に適用された実績はないが、高出力で安定したビート信号が得られること、計測システムを構築するために必要な高感度検出器、低損失の光学素子が存在すること等の計測システムを組み上げるに必要な条件が整っている。また、2波長同時発振を利用することで、計測上の様々な利点が得られる。核融合研究が核燃焼プラズマ実験を視野に入れた現在、この新しいレーザー光源を用いた計測法の導入が、研究の進展に大きく貢献することが期待される。

4.3 高エネルギー電子ビームとの相互作用による γ 線の生成

数MeV～数10MeV領域のガンマ線は、原子核物理、天体核物理、核物性研究における有力な光源として注目されている。その生成方法の一つとして1963年にMilburn[45], Arutyunian, Tumanian[46]によって提唱された高

エネルギー電子とレーザーとの逆コンプトン散乱がある。ここでは8 GeVのSPRING-8蓄積リングでの高出力cw 119- μm CH_3OH レーザーとの相互作用による10 MeV γ 線生成研究への応用を紹介する[47, 48]。

8 GeVのSPRING-8とcw遠赤外レーザーにより生じる γ 線は電子のエネルギーが高いことから前方方向に集中した広がり角度の狭い高輝度 γ 線の生成が可能になる。また、レーザー波長が長いために生成光子数が短波長レーザーの場合より多く、高強度の γ 線生成が期待できる。エネルギーの大きい蓄積リングの電子ビームを利用するため、逆コンプトン散乱過程で失うエネルギーが少なく(0.1%程度)、電子周回軌道に与える影響が少なく済む。さらに、レーザーの偏光をほぼ100%保持した偏極 γ 線生成が可能である。また、この方法ではレーザーを高出力化すれば、高強度のMeV領域の γ 線を得ることができる利点もある。

この研究では、高出力で発振する119- μm CH_3OH レーザーが用いられた。そのために開発されたレーザーは、図19に示すように、長さ3mの CO_2 レーザーと遠赤外レーザーの組み合わせである[21]。123 Wの9P(36)cw CO_2 レーザー励起により、1.6 Wの遠赤外レーザー出力が得られた。得られた遠赤外レーザー出力とその長時間(24時間)の安定性を図20に示す。レーザーからSPRING-8の電子ビームへの入射ミラーまでの距離は約20 mであり、この伝送路はア

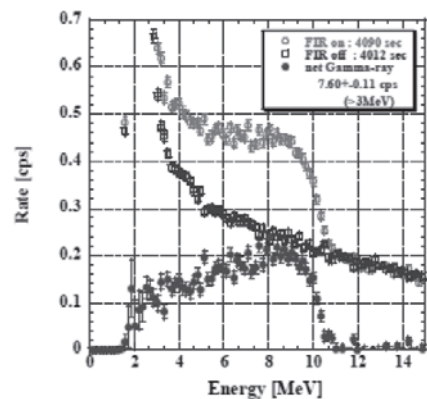


図21 119- μm CH_3OH レーザーのSPRING-8からの逆コンプトン散乱によるガンマ線生成[47]。

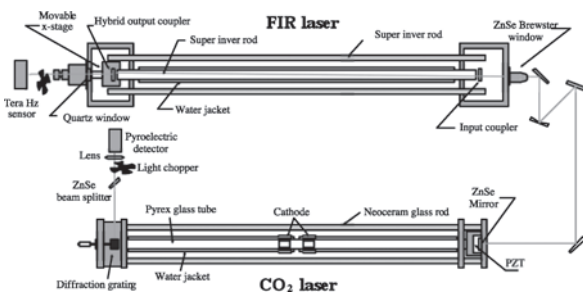


図19 SPRING-8の119- μm CH_3OH レーザーシステム。

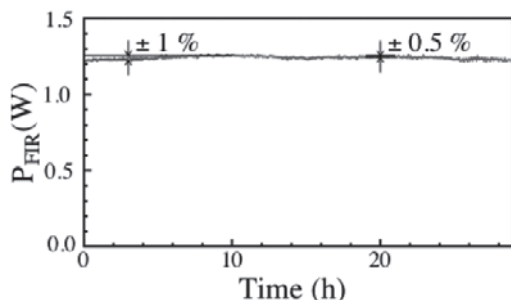


図20 大出力119- μm CH_3OH レーザー出力の時間安定性[21]。

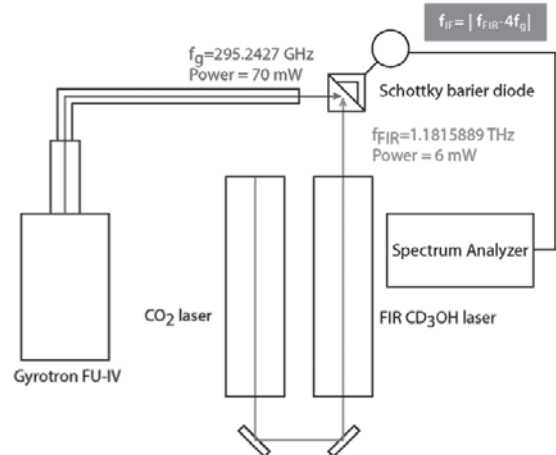


図22 遠赤外レーザーを用いたジャイロトロンFU-IVの周波数測定システム[49]。

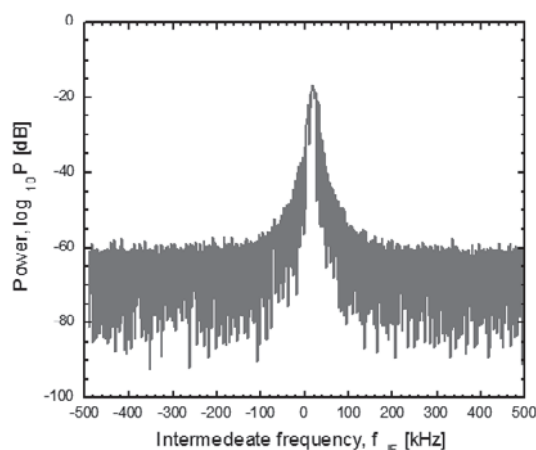


図23 254- μm CD_3OH レーザーとジャイロトロン FU-IV とのヘテロダイニート信号。

クリル管内を乾燥空気で置換された。また入射ミラーから電子との衝突点まで更に約 20 m である。図21に示すように、この実験では、相互作用領域で 0.85 W の遠赤外光に対して 103 個/s の 10 MeV γ 線を得ることができた [47]。またレーザーの発振線を変えることで、生成される γ 線のエネルギーを変えることが可能になる。例えば、高出力動作する 9R(8) CO_2 レーザー励起の 57- μm CH_3OD レーザーを用いると 20 MeV の γ 線生成が可能になる。

4.4 テラヘルツ発振器周波数の超精密測定

cw 遠赤外分子レーザーは、狭帯域で安定性に優れている。この発振線を周波数基準として、レーザー周波数と他の発振器からの電磁波の周波数（またはその高調波）とのヘテロダイニート周波数測定から、発振器からの電磁波の周波数の超高精度測定が可能となる。この手法で、長さ標準のためのレーザー周波数測定がなされてきた。ここでは、テラヘルツジャイロトロン周波数の高精度測定 [49] の例を紹介する。

ジャイロトロンとして福井大学遠赤外領域開発研究センターの cw モードで発振する FU-IV を使い、図22の測定系で行われた。基準周波数源として、10R(36) CO_2 レーザー励起の 254- μm (1.185889 THz) CD_3OH レーザーを使用した。ジャイロトロン周波数の 4 倍高調波とのヘテロダイニート信号を図23に示す。これにより、ジャイロトロン周波数は 295.2427 GHz と測定できた。また、この方法により、ジャイロトロン周波数の変動も測定でき、周波数安定度に関する性能評価が可能になる。

謝 辞

本解説で紹介した 2 波長干渉・偏光計の開発研究は、核融合科学研究所の秋山毅志博士と田中謙治博士との共同研究の成果であり、深く感謝申し上げます。この研究は科学研究費基盤研究 (B) (No.22360293) の支援を受けて実施されたものであり、深く感謝申し上げます。また、ガンマ線生成研究は、高輝度光科学研究センターの大熊春夫博士、ジャイロトロン周波数測定は、福井大学遠赤外領域開発研究センターの出原敏孝教授との共同研究により得られた成果であり、ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] C.K.N. Patel *et al.*, Appl. Phys. Lett. 4, 18 (1964).
- [2] A. Crocker *et al.*, Nature 201, 250 (1964).
- [3] H.A. Gebbie *et al.*, Nature 202, 685 (1964).
- [4] L.O. Hocker and A. Javan, Phys. Lett. 25A, 489 (1967).
- [5] W.S. Benedict *et al.*, IEEE J. Quantum Electron., QE-5, 108 (1969).
- [6] T.M. Hard, Appl. Phys. Lett. 14, 130 (1969).
- [7] J.C. Hassler and P.D. Coleman, Appl. Phys. Lett. 14, 135 (1969).
- [8] S. Okajima and A. Murai, IEEE J. Quantum Electron., QE-8 677, (1972).
- [9] C.S. Willet, *An Introduction to Gas Lasers: population Inversion mechanisms* (Pergamon Press, Oxford, 1974) pp.374-515.
- [10] T.Y. Chang *et al.*, Opt. Commun. 1, 423 (1970).
- [11] "Reviews of Infrared and millimeter Waves, Vol.2, Optically Pumped Far-Infrared Lasers" ed. By K.J. Button *et al.*, (Plenum Press, New York) (1984).
- [12] *Handbook of Laser Wavelength* ed. By M.J. Weber, CRC Press (1998).
- [13] 寶迫 徹他：レーザー研究 39, 763 (2011).
- [14] 岡島茂樹, 川端一男：固体物理 31, 326 (1996).
- [15] S. Kon *et al.*, J. Appl. Phys. 7, 434 (1968).
- [16] 岡島茂樹：レーザー研究 17, 679 (1989).
- [17] 市川 洋他：レーザー研究 14, 38 (1986).
- [18] R. Behn *et al.*, Report on CRPP, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne-Suisse, LRP357/88 (1988).
- [19] K. Kawahata *et al.*, Rev. of Sci. Instrum. 77, 10F132 (2006).
- [20] 川端一男, 岡島茂樹：プラズマ・核融合学会誌 76, 845 (2000).
- [21] 有本 靖他：電気学会, 光・量子デバイス研究会資料 (OQD-02-24), (2002) 63.
- [22] K. Nakayama, H. Tazawa, S. Okajima, K. Kawahata, K. Tanaka, T. Tokuzawa and Y. Ito, Rev. Sci. Instrum., Vol. 75, 329 (2004).
- [23] [20] K. Nakayama, M. Tomimoto, S. Okajima, K. Kawahata, K. Tanaka, T. Tokuzawa and T. Akiyama, *Proc. 13th Int. Sym. LAPD, NIFS-PROC-68*, 134 (2007).
- [24] D.K. Mansfield, E. Horlbeck, C.L. Benette and R. Chouinard, Int. J. IR MMW 16, 867 (1985).
- [25] 岡島茂樹：光学 13, 190 (1984).
- [26] S. Okajima, M. Yamanaka, A. Nishizawa, S. Makino, M. Kondo, S. Kon and J. Fujita, Infrared Phys. 25, 564 (1985).
- [27] D.K. Mansfield, A. Semet and L.C. Johnson, Appl. Phys. Lett. 37, 688 (1980).
- [28] 阪井清美：レーザー研究 15, 134 (1987).
- [29] T. Hori and N. Hiromoto, J. J. Appl. Phys. 5552 (1993).
- [30] 萩行正憲, 宮丸文章：応用物理 78, 511 (2009).
- [31] K. Nakayama, H. Tazawa, S. Okajima, K. Kawahata, K. Tanaka, T. Tokuzawa and Y. Ito, Int. J. IR MMW 24, 1421 (2003).
- [32] T. Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama and T. C. Oakberg, J. Plasma Fusion Res. 2, S113 (2007).
- [33] K. Nakayama, S. Okajima, K. Kawahata, K. Tanaka and T. Akiyama, *35th Int. Conf. IRMMW-THz2010*, ISBN 978-1-4244-6656-6, Tu-P.50 (2010).
- [34] 板倉安正, 出原敏孝, 安岡義純：電気学会論文誌 A 123, 949 (2003).

- [35] T. Yasui, A. Nishimura, T. Suzuki, K. Nakayama and S. Okajima, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 066102-1 (2006).
 [36] 深澤亮一：電子情報通信学会誌 **89**, 467 (2006).
 [37] 永井正也, 田中耕一郎：応用物理 **75**, 179 (2006).
 [38] 長島 健, 谷 正彦, 萩行正憲：赤外線学会誌 **16**, 45 (2007).
 [39] 服部利明：レーザー研究 **37**, 345 (2009).
 [40] A.J.H. Donne *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 4694 (2004).
 [41] D. Veron, *Infrared and Millimeter Waves* **2**, 67 (Academic Press 1979).
 [42] H. Soltwisch : Proceeding of International School of Plasma Physics PieroCaldilora, Basic and Advanced Diagnostics Techniques for Fusion Plasmas, Varenna, 1986 2 (CEC. Brussels, 1986) 343.
 [43] A.J.H. Donne, T. Edlington, E. Joffrin, H.R. Koslowski, C. Nieswand *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 726 (1999).
 [44] K. Kawahata, K. Tanaka, T. Tokuzawa, T. Akiyama, Y. Ito, S. Okajima, K. Nakayama and R.J. Wylde, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 3508 (2004).
 [45] R.H. Milburn, *Phys. Rev. Lett.* **10**, 75 (1963).
 [46] F.R. Arutyunian, V.A. Tumanian, *Phys. Lett.* **4**, 574 (1963).
 [47] H. Ohkuma *et al.*, *Proc. EPAC 2006*, Edinburgh, Scotland (TUOAFI03), 961 (2006).
 [48] K. Kawase *et al.*, *Nucl. Instrum. Math. A. Phys. Res.* **592**, 154 (2008).
 [49] T. Idehara *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 2860 (2003).

表1 cw CO₂ レーザー励起の cw 遠赤外分子レーザーの発振線一覧表.

Pump CO ₂ laser			THz gas laser						
Line	Power (W)	L ¹⁾ (m)	Molecule	λ (μ m)	f (THz)	Pol. ²⁾	Pressure (Pa)	Power ³⁾ (mW)	L ¹⁾ (m)
9R(18)	131	3.0	CH ₃ OH	186.0	1.61	∥	80	12	2.9
9R(10)	83	2.4	CH ₃ OH	96.5	3.11	∥	93	68	2.2
9P(24)	96	2.4	CH ₃ OH	133.1	2.25	∥	45	14	2.2
9P(34)	75	2.4	CH ₃ OH	70.5	4.25	⊥	27	65	2.2
9P(36)	148	3.0	CH ₃ OH	118.8	2.52	⊥	71	680	2.9
	77	2.4	CH ₃ OH	170.6	1.76	∥	43	115	2.2
10R(38)	104	3.0	CH ₃ OH	163.0	1.84	∥	43	28	2.9
10R(36)	72	3.0	CH ₃ OH	53.9	5.56	⊥	101	49	2.9
10R(16)	123	3.0	CH ₃ OH	63.0	4.76	∥	60	54	2.9
9R(34)	63	2.4	CD ₃ OH	52.9	5.67	⊥	47	10	2.2
10R(36)	85	2.4	CD ₃ OH	253.7	1.18	⊥	47	28	2.2
10R(18)	89	2.4	CD ₃ OH	41.4	7.24	⊥	24	13	2.2
10R(16)	113	3.0	CD ₃ OH	81.6	3.67	∥	47	25	2.9
9P(26)	85	2.4	CH ₃ OD	117.2	2.56	∥	40	26	2.2
9P(30)	84	2.4	CH ₃ OD	103.1	2.91	⊥	43	23	2.2
9R(8)	138	3.0	CH ₃ OD	57.2	5.24	⊥	60	1.6 W	2.9
	138	3.0	CH ₃ OD	47.6	6.30	∥	60	0.8 W	2.9
9P(10)	65	2.4	CH ₂ DOH	183.6	1.63	∥	25	10	2.2
9P(12)	56	2.4	CH ₂ DOH	108.8	2.76	∥	41	16	2.2
	56	2.4	CH ₂ DOH	112.5	2.66	∥	41	38	2.2
9P(14)	85	2.4	CH ₂ DOH	206.7	1.45	∥	23	19	2.2
9P(16)	91	2.4	CH ₂ DOH	102.0	2.94	⊥	39	15	2.2
10R(34)	74	2.4	CH ₂ DOH	150.8	1.99	∥	35	22	2.2
10P(26)	110	2.4	CH ₂ DOH	150.6	1.99	⊥	31	24	2.2
10P(34)	91	2.4	CH ₂ DOH	124.4	2.41	∥	57	63	2.2
10P(46)	43	2.4	CH ₂ DOH	49.1	6.11	⊥	27	17	2.2
10R(16)	103	3.0	CHD ₂ OH	179.0	1.67	∥	25	15	2.9
9R(30)	65	2.4	NH ₃	67.2	4.46	∥	55	97	2.2
9R(32)	81	2.4	CH ₂ F ₂	184.3	1.63	⊥	25	298	2.2
	81	2.4	CH ₂ F ₂	195.8	1.53	⊥	25	146	2.2
9R(22)	148	3.0	CH ₂ F ₂	121.9	2.46	⊥	57	86	2.9
9R(20)	81	2.4	CH ₂ F ₂	117.7	2.55	⊥	67	62	2.2
9P(10)	112	3.0	CH ₂ F ₂	158.5	1.89	∥	23	82	2.9
	110	3.0	CH ₂ F ₂	382.6	0.78	∥	35	78	2.9
9P(16)	79	3.0	CH ₂ F ₂	105.5	2.84	∥	120	75	2.9
9P(22)	157	3.0	CH ₂ F ₂	134.4	2.23	⊥	56	85	2.9
9P(24)	128	3.0	CH ₂ F ₂	108.9	2.75	⊥	65	65	2.9
9R(32)	150	3.0	CH ₂ CF ₂	184.4	1.63	⊥	200	78	2.9
9R(18)	90	2.4	HCOOH	393.2	0.76	∥	43	21	2.2

1) Cavity length

2) Polarization relative to the pump laser: ∥ =parallel, ⊥=perpendicular

3) Power meters: Scientech 362, H310 (Scientech, Inc.), TK Absolute Power Meter System (Thomas Keating, Ltd.)



なか やま かず や
中山 和也

中部大学工学部工学基礎教室，講師。主な研究分野は，短波長遠赤外レーザーを用いた計測システムの開発に関する研究。応用物理学会，日本赤外線学会，レーザー学会の会員。最近，ペットの犬とともにアジリティ競技会に参加できるようにお互いに訓練中です。



かわ はた かず お
川 端 一 男

1976年名古屋大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了。名古屋大学プラズマ研究所助手を経て，1995年核融合科学研究所教授となる。主としてマイクロ波からレーザー光に至る電磁波を用いたプラズマ計測法の開発を通してトーラス磁場配位におけるプラズマ閉じ込め研究に従事。最近，波長50ミクロン帯の短波長遠赤外レーザーを利用した新しいプラズマ計測法の開発を進めている。



おか じま しげ き
岡 島 茂 樹

中部大学工学部教授。1942年奈良県生まれ。東京理科大学，大阪市立大学大学院を経て，中部大学（前中部工業大学）に勤務して34年。遠赤外レーザーの研究をはじめたのが1968年，名古屋大学プラズマ研究所の共同研究で遠赤外レーザーによるプラズマ計測に関わったのが1978年，以後，高性能遠赤外ガスレーザーの開発とその応用に関する研究を続けている。他に，科学啓発活動をはじめて約25年。趣味はオペラを聴くこととオーケストラ伴奏で合唱すること。