レーザー解説

プラズマ計測用遠赤外レーザーシステムの開発

助川 統*・福田武司**・長島 章**

(1986年5月14日 受理)

Development of an FIR Laser System for Plasma Diagnostics

Osamu SUKEGAWA*, Takeshi FUKUDA**
and Akira NAGASHIMA**

(Received May 14, 1986)

1. はじめに

将来のエネルギー源をめざし、制御核融合の研究開発が各国で進められており、その一環として、プラズマの密度・温度・不純物等の情報を得るための各種のプラズマ計測法が開発され、発展をとげている。

数あるプラズマ計測法のうち干渉計測といわれるものは、電磁波の屈折率がプラズマ電子密度によって変化する現象を利用し、プラズマ通過による電磁波の位相変化を干渉計によって検出し、この位相変化からプラズマ電子密度を求めようとする手法である。干渉計測に用いられる電磁波の波長は、

- ・電磁波がプラズマにより反射されないこと。
- ・電子密度変化による電磁波の位相変化が大きいこと。

等の条件から決定されるが、近年の大型トカマク装置の電子密度では、波長100~400 μm 程度の遠赤外 (Far Infrared: FIR) 領域の光源

を用いることが適当であり、特にこの波長領域で有力な連続発振出力が得られる CO_2 レーザー励起118.8 μm CH_3OH レーザー^{1,2)}、放電励起337 μm HCN レーザー³⁾を用いた干渉計測が行なわれている。現在、日本原子力研究所において実験運転が進められている臨界プラズマ試験装置「JT-60」においても、118.8 μm CH_3OH レーザーを用いた干渉計測によりプラズマ電子密度の測定が行なわれている^{4,5,6)}。

本解説では、「JT-60計測用」という目的を持って、 CH_3OH レーザーシステムの開発に携ったものの立場から、干渉計測用レーザーに要求される条件、 CO_2 レーザー励起 CH_3OH レーザーの問題点について解説し、特に安定性と信頼性に重点を置いてJT-60計測用に開発された CH_3OH レーザー⁷⁾および、それを用いた双子型 CH_3OH レーザーシステム⁸⁾の特性を紹介する。118.8 μm CH_3OH レーザーの選択理由を含めたプラズマ計測に関する問題^{9),10)}、他の遠赤外レーザーの状況^{11),12)}等については、参考

*日本電気株式会社超LSI開発本部 (〒211 川崎市中原区下沼部1753)

**日本原子力研究所郡珂研究所 (〒311-02 茨城県那珂郡那珂町向山)

*VLSI Development Division, NEC Corporation (1753, Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki 211)

**Naka Fusion Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute (Mukoyama, Nakamachi, Naka-gun, Ibaraki 311-02)

文献を参照されたい。

2. 干渉計測用レーザーに要求される条件

本章では干渉計測の原理を簡単に述べ、そこから干渉計測用レーザーとしてどのような特性が必要かを考えてみることにする。

まず、プラズマ干渉計測の概略を示したFig. 1 によって干渉計測の原理を簡単に述べよう。Fig. 1 において、角周波数が $\Delta\omega$ だけ離調された2つのレーザー光を、プローブレザー光およびレファレンスレーザー光と呼ぶことにする。2つのレーザー光は、それぞれ2分割されて光学的に重ね合わせられ、角周波数 $\Delta\omega$ のビート信号が検出器から得られる。この時、プローブおよびレファレンスレーザー光を共にプラズマを通さないでビートをとる系（参照信号系）とプローブレザー光のみプラズマを通してビートをとる系（密度測定系）を設ける。プラズマ通過により、レーザー光はプラズマ電子密度に依存した位相シフト： $\phi(n_e)$ (n_e : プラズマ電子密度) を受けるため、密度測定系ビート信号は、プラズマがない場合と比べ、 $\phi(n_e)$ だけ位相がずれたものとなる。この位相変化は、参照信号系ビート信号を基準として密度測定系ビート信号の位相を測定することによって検出できる (Fig. 2)。従って、この位相シフト量の時間変化を測定することにより、プラズマ電子密度の測定が行なえる。

この様な干渉計測において精度の良い測定を行なうには

- ① 十分なSN比をもつビート信号が得られること。
 - ② ビート信号位相情報がプラズマ通過による位相シフト以外の変動分をもたないこと。
- が必要である。さらに、重要なこととして①②の条件が安定して、確実に得られることがあげられる。これは、レーザーそれ自体の研究が目的ではなく、レーザーを何かに応用する場合には特に重要な項目であるが、遠赤外レーザー、特にCO₂レーザー励起遠赤外レーザーでは、3章に述べるバックトーク現象等のため、一般

Fig.1 Dual beam modulated interferometer. Two lasers are operated at frequencies differing by $\Delta\omega$. Detector D₁ provides a beat signal $V_1 \sim \cos \Delta\omega t$, while detector D₂ sees a similar signal $V_2 \sim \cos(\Delta\omega t + A + \phi(n_e))$ with an additional phase shift due to the plasma $\phi(n_e)$ (Fig.2).

Fig.2 Beat signals obtained by two detectors. The magnitude of the phase shift due to the plasma $\phi(n_e)$ is obtained from comparison of the two signals.

に安定な動作が困難である。次に、上述した①②の条件について詳しく考えてみることにする。

十分なS/Nをもつビート信号を得るためには、

- ① レーザーパワーが大きい。
- ② レーザー光の伝搬損失が少ない。
- ③ 検出系が低ノイズ、狭帯域である。

ことが望ましい方向である。我々はビーム品質を高くすることに重点をおき、レーザーパワーについては、必要最小値として15mWという値をシステム設計から設定した。②の伝搬損失に

関して、特に118.8 μm では水蒸気による吸収が問題となるが、レーザーの問題としては、自由空間のTEM₀₀モードで伝搬するビームが得られること、すなわち、EH₁₁導波管モードで発振することが重要である。③の低ノイズ、狭帯域検出のためレーザーに必要とされる条件は、狭帯域のヘテロダイン検波を可能とするため、ビート周波数すなわち2台のレーザーの差周波数設定精度・安定度がよいことである。

ビート信号位相情報がプラズマ通過による位相シフト以外の変動分をもたないためには、

㊦ レーザー光の周波数および出力変動による誤差を含まない。

㊧ 振動・変形等による干渉計光路長変化による誤差を含まない。

ことが必要である。②については、遠赤外干渉計光路にプラズマ電子密度による屈折率変化の小さい可視光(632.8nm He-Ne レーザー光)をのせ、可視光による干渉計測を同時に行なうことにより、機械的な光路長変化を補正する手法が確立している^{13,14)}。ここでは、レーザーに要求される条件として、必要な周波数安定度、出力安定度をJT-60計測系をモデルとして議論する。なお、測定精度としては、1/100 フリンジ、位相にして2 π /100の精度を考えることにする。

(1) 必要な周波数安定度

プローブおよびレファレンスレーザー光の周波数が変動することにより、参照信号系と密度測定系のビート信号位相差がどのように変化するかを考える。プローブおよびレファレンスレーザーのレーザー出射端での電界をそれぞれ次の様に表わす。

$$e_P = A_P \sin [\omega_P t + \phi_P(t)] \quad (1)$$

$$e_R = A_R \sin [\omega_R t + \phi_R(t)] \quad (2)$$

ここで、 ω_P 、 ω_R は、一定とし、周波数変動は、位相項 $\phi_P(t)$ 、 $\phi_R(t)$ に含まれるとする。Fig. 1に示される干渉計構成において、検出器面でのレーザー光電界は、密度測定系について、

$$e_{P1} = A_P \sin [\omega_P(t - \frac{l_1}{c}) + \phi_P(t - \frac{l_1}{c})]$$

$$+ \phi(n_e)] \quad (3)$$

$$e_{R1} = A_R \sin [\omega_R(t - \frac{l_2}{c}) + \phi_R(t - \frac{l_2}{c})]. \quad (4)$$

参照信号系について、

$$e_{P2} = A_P \sin [\omega_P(t - \frac{l_3}{c}) + \phi_P(t - \frac{l_3}{c})] \quad (5)$$

$$e_{R2} = A_R \sin [\omega_R(t - \frac{l_4}{c}) + \phi_R(t - \frac{l_4}{c})] \quad (6)$$

となる。ここで l_{1-4} は、各ビームの伝搬光路長を表わす。密度測定系および参照信号系のビート信号は、それぞれ $(e_{P1} + e_{R1})^2$ 、 $(e_{P2} + e_{R2})^2$ の周波数 $\Delta\omega = \omega_P - \omega_R$ で振動する成分であり、2つのビート信号の位相差のレーザー周波数変動に関係する部分は、次の様に表わせる。

$$\begin{aligned} \varphi = & \frac{1}{c} [\phi_P(t - \frac{l_1}{c}) - \phi_P(t - \frac{l_3}{c}) - \phi_R(t - \frac{l_2}{c}) \\ & + \phi_R(t - \frac{l_4}{c})] \end{aligned} \quad (7)$$

位相の基準は観測開始時($t=0$)にとられるので、(7)式の $t=t$ 、0の差が周波数変動による位相誤差を表わす。 ϕ_P および ϕ_R を $t=t$ 、0の回りで展開し、一次の項をとると、位相情報誤差は、次の様になる。

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = & \frac{1}{c} [(l_3 - l_1) \Delta\omega_P + (l_2 - l_4) \Delta\omega_R] \\ = & \frac{1}{c} [(l_3 - l_1 + l_2 - l_4) \Delta\omega_P + (l_2 - l_4) \Delta\omega_B] \end{aligned} \quad (8)$$

ここで $\Delta\omega_P$ 、 $\Delta\omega_R$ 、 $\Delta\omega_B$ はそれぞれ、プローブレーザー、レファレンスレーザー、ビート周波数の変動値であり、位相の時間微分が周波数になることにより、 ϕ_P 、 ϕ_R から導びかれる。

(8)式は、干渉計光路長の差により、周波数変動による誤差が生まれることを意味しており、JT-60の干渉計では、 $l_1 - l_3 \div 40\text{m}$ 、 $l_2 - l_4 \div 2\text{m}$ なる関係があるので(8)式は、

$$\Delta\varphi \sim \Delta\omega_P \times 10^{-7} + \Delta\omega_B \times 10^{-8} \quad (9)$$

となる。従って、1/100 フリンジ($\Delta\varphi = 2\pi/100$)の測定精度を満たすには、

プローブレーザー周波数変動 $< 6 \times 10^5 \text{ Hz}$

$$(\Delta f/f < 4 \times 10^{-8})$$

差周波数変動 $< 6 \times 10^6 \text{ Hz}$

程度の周波数変動に抑えることが必要となる。

(2) 必要な出力安定度

ビート信号の位相は信号零点の位置で検出するので、レーザー出力に AM 変調がかかることによりビート信号零点がどれだけずれるかを評価することにより、必要な出力安定度が算定できる。プローブレーザー光に AM 変調がかかっている場合を考える。変調度を $a(t) (\ll 1)$ とすると、プローブおよびレファレンスレーザー光の電界は、次の様に表わせる。

$$e_P = A_P [1 + a(t)] \sin \omega_P t \quad (9)$$

$$e_R = A_R \sin (\omega_R t + \alpha_R) \quad (10)$$

ビート信号: V_s は、 $(e_P + e_R)^2$ の検出帯域内成分であり次の様に表わせる。

$$V_s = K A_P A_R [1 + a(t)] \left[\frac{A_P}{A_R} \frac{\tilde{a}(t)}{1 + a(t)} + \cos [(\omega_P - \omega_R)t - \alpha_R] \right]$$

ここで、 K はディテクター感度等から決まる定数、 $\tilde{a}(t)$ は AM 変調項: $a(t)$ の検出帯域内成分を表わす。 V_s の零点は AM 変調がない、すなわち $a(t) = 0$ のときと比べ、最大

$$\Delta t \sim \frac{1}{\omega_B} \frac{A_P}{A_R} \tilde{a}(t) \quad (12)$$

$$(\omega_B = \omega_P - \omega_R)$$

程度ずれる。これをフリンジ変化量: ΔN に書き直すと次の様に表わせる。

$$\Delta N \sim \frac{1}{2\pi} \frac{A_P}{A_R} \tilde{a}(t) \quad (13)$$

従って、 $\Delta N < 1/100$ の精度を得るには、

$$\tilde{a}(t) < 10^{-2}$$

程度の AM 変調、すなわち出力変動に抑えることが必要である。ここでいう出力変動は、検出帯域内成分であり、通常、レーザー光のノイズ

Fig.3 Schematic of a conventional hole coupling FIR laser cavity.

と呼ばれるものである。

3. 遠赤外レーザー装置

本章では、 CO_2 レーザー励起遠赤外レーザーの問題点を概説し、JT-60 計測用として開発された高安定 CH_3OH レーザーについて述べる。

Fig.3 は、 CO_2 レーザー励起遠赤外レーザーとして一般的なホールカップリング共振器レーザー¹⁵⁾ の概要である。 CO_2 レーザー遠赤外レーザーでは高パワーの CO_2 レーザー光を遠赤外レーザー共振器内に注入して媒質の励起を行なうという行為のため、一般に次の点が問題となる。

- ① 励起 CO_2 レーザー光が CO_2 レーザー共振器に戻り、 CO_2 レーザーの発振が不安定になる。これを optical feedback, あるいはバックトークと呼んでいる。
- ② ガウシアンライクの横モード出力が得にくい。
- ③ CO_2 レーザー光の照射により、遠赤外光学素子の加熱・損傷が起きやすい。
- ④ 出力がビートスペクトルをもつ雑音の多いものとなりやすい。

①のバックトークを除去することは、安定な連続発振を得るためには最も重要な項目であり、 $\lambda/4$ 板を用いた円偏光ポンピングを行う方法¹⁶⁾、リングレーザー共振器を用いる方法¹⁷⁾ 等種々の方策が試みられている。②の横モードに関しては、出力ミラーとしてキャパシティブメッシュ¹⁸⁾ に代表される均一なカップリング素子を用いることが有力であるが、カップリングホールによる損失があること、励起光の導波管内強

度分布が導波管低次モードに必ずしも適していない等の不十分な点が存在している。③の光学素子の加熱・損傷は、遠赤外レーザーの出力ミラーに CO_2 レーザー光があたる限り発生する危険があり、加熱による変形を抑えることは、安定な動作を得る上で重要である。④のセルフビートについては、遠赤外レーザーのモード構造から調べた報告¹⁹⁾があるが、我々の実験では、遠赤外レーザーの多モード発振と CO_2 レーザーがバックトークのためセルフビート発振をおこすことによる2つの原因がみられたので後に述べることにしたい。

これらの問題を解決し、安定な高品質の出力を得るものとしてJT-60計測用に開発された遠赤外レーザーの特性を次に述べる。

Fig. 4 は、今回開発された $118.8\mu\text{m}$ CH_3OH レーザーの共振器構成を示したものであり、エタロンブリュスタ板を CO_2 レーザー光のカップリングに用いているので、以下、ブリュスタカップリングFIRレーザーと呼ぶことにする。

Ge エタロン板は、P偏光の励起 CO_2 レーザー光に対しては、ブリュスタ板として働き、S偏光 $118.8\mu\text{m}$ ビームに対しては、反射率が最大になる様約1mmの適当な厚さに研磨されており、計算上の反射率は約96%である。エタロン材料としては、 CO_2 レーザー光の吸収が少ないことが要求され、さらに遠赤外光に対する吸収と屈折率、入手のしやすさ等を考慮するとGeが最適であった。 CH_3OH - $118.8\mu\text{m}$ 発振の

場合、 $170.6\mu\text{m}$ が同時に発振しやすいが、 $170.6\mu\text{m}$ の偏光はP偏光であるため、エタロン板により完全に抑制することができる。

励起 CO_2 レーザー光はレンズ等によるビーム変換をせず、遠赤外レーザー共振器に導入されビーム径が約15mmであるため導波管内の励起光強度分布は、 CH_3OH レーザーの EH_{11} モードに適したものとなる。励起光は、 CH_3OH レーザー共振器の全反射ミラーである球面ミラーによって反射・集束されるため、 CO_2 レーザー光路にアパーチャを設けることにより反射ビームの CO_2 レーザー共振器への注入を遮断でき、バックトークの除去が容易に行なえる。 CO_2 レーザー光が関係する光学素子(ZnSeブリュスタ窓、Geエタロン板、全反射ミラー)は、すべて CO_2 レーザー光の吸収が少ないものであり、さらにこれらの素子を水冷することにより、共振器の熱的安定性を高めている。

FIRレーザー共振器は、全反射ミラー、Geエタロン板、出力ミラーによって構成されている。出力ミラーは、 CO_2 レーザー光の照射をうけないので、FIRレーザーのカップリング特性のみを考慮して選定することができ、ここでは、750 lines/inchの金メッシュ($118.8\mu\text{m}$ 透過率 $\sim 12\%$)を用いている。メッシュミラーは、FIRビームに対して、低損失、均一性がよい、透過率の最適化が容易等の長所を有しているメッシュは機械的に弱いのでガスのフローによるミラー面の変形が懸念されるが、本レーザーに関しては、 CH_3OH ガスのフロー・封じ切りによる出力・ビート周波数の変化はなかった。

FIRレーザー共振器長の同調は、ステッピングモーター駆動ステージとPZTによって出力ミラー位置を変位させて行なう。 CO_2 レーザー光の照射を受けない出力ミラー部を同調のための可動部とすることにより、 CO_2 レーザー戻り光の状態はFIRレーザーの共振器長掃引によって変化せず、バックトーク除去が確実なものとなる。

Fig. 4 Schematic of the Brewster coupling CW CH_3OH laser. (B. C. FIR laser).

Fig.5 Example of output power recordings of the B.C. FIR laser.

Fig.6 First derivative signal of the B.C. FIR laser.

left: tuning curve,
right: free running drift.

このFIRレーザーの特性として、まず出力および周波数の安定性にふれてみる。Fig.5は、出力のドリフト特性の一例であり、数時間にわたる安定な出力が得られている。このような特性は、例えば、翌日起動すれば同じ程度のものが得られ、240時間（これは、JT-60の運転サイクルにあたる）の無調整連続運転を何度も行っている。この安定な動作には、バックトークが確実に除去されていることとFIRレーザー共振器構成部の熱的安定性が大きく寄与していると考えられる。なお、Fig.5において、CO₂レーザー周波数はポンピング最適値に、FIRレーザー周波数はパワー最大点に、4章で述べる方法によって安定化されている。Fig.6は、

ACT... actuator for FIR cavity tuning

Fig.7 Experimental configuration for evaluation of self-beating oscillation and tuning characteristics of two types of FIR laser.

一次微分信号の、同調特性とフリーランニング状態でのドリフトを示したものである。同調曲線の滑らかな形状は、発振モードがただ一つであることを示している。又、フリーランニング状態での周波数変動は、10秒間（JT-60の測定時間）で100kHz以下であり、2章で述べたプローブレーザーに要求される周波数精度を満足していることがわかる。

次に、モード構造（横モード選択性）についてみる。Fig.7は、本構成のプリユースタカップリングレーザー（以下B.C.レーザーと略す）と共振器サイズ、出力パワー、効率が同程度のホールカップリングレーザー（以下H.C.レーザーと略す）の同調曲線・出力スペクトルについて調べた実験の構成図であり、ポンピングCO₂レーザー周波数は、B.C.レーザーのポンピング最適値に安定化されている。

Fig.8(a)(b)は、それぞれ、B.C.レーザー、H.C.レーザーの出力同調曲線を示したものであり、B.C.レーザーでは、単一の横モードのみ発振の様子がよくわかる。次に、出力スペクトルを観測すると、H.C.レーザーへCO₂レーザー光を注入しない状態では、CO₂レーザーおよびB.C.レーザー出力にビートスペクトル

Fig. 8 Power tuning curves of two FIR lasers.

(a): H. C. laser,

(b): B. C. laser.

は現われず, H. C. レーザへの CO_2 レーザ光の注入を行ない, H. C. レーザの共振器長掃引を行なうと, Fig. 9 に示される 2 種類のビートスペクトルが発生した。A タイプは, H. C. レーザのみにあられ, かつ, 同調曲線 Fig. 8 (a) において周期的にあられる。さらに, その周波数および共振器掃引による周波数シフトは, モードプリングを考慮した導波管発振モードの周波数差とよく一致し, このタイプのビートが H. C. レーザの多モード発振であることをよく示している。B タイプのビートは, H. C. レーザから CO_2 レーザへのバックトークにより, CO_2 レーザがセルフビート発振を起こしていることによっている。

Fig. 10 は, B. C. レーザ出力の強度プロファイルを示したものであり, ガウシアン形のプロファイルとなっていることがわかる。レーザ出力端のビーム径 (約 12 mm) およびビーム拡がり角は, 導波管径から予想される値とは異なっており, 垂直方向および水平方向の異方性をもっている。Fig. 11 は, 出力ミラーに透過率の低い ($T \sim 6\%$) メッシュを用いた場合の出力同調曲線である。強く発振するモードおよび弱く発振している 2 つのモードは, そのモード間隔から, それぞれ, EH_{11} , EH_{12} , $\text{TE}_{02} + \text{EH}_{22}$

Fig. 9 Two types of self-beat spectra. Beat levels are expressed in dB unit and OdB represents the DC input level.

Fig. 10 Far-field mode patterns of the B.C. FIR laser obtained by scanning a pyro detector.

Fig. 11 Cavity tuning curve of the B.C. FIR laser with a low transmittance output mirror.

Fig.12 Schematic of the twin FIR laser system for JT-60 plasma diagnostics.

の導波管モードと判断される。

プラズマ中の磁場を測定するファラデー回転測定²⁰⁾においては、レーザー光の偏光度が重要なパラメータであるが、遠赤外領域では、十分な偏光比をもつ偏光子が存在しないので、我々は、市販の偏光比90%のグリッドポラライザーを2枚組み合わせ偏光子の特性を補正することにより、レーザー光の偏光度として、99.98%以上という値を得た。

4. 双子型 FIR レーザーシステム

3章で説明した CH_3OH レーザーを2台設け、用途に適した周波数安定化を行なうことにより、JT-60プラズマ電子密度計測用双子型 FIR レーザーシステムを構築した。

Fig.12 は、本システムの構成を示したものである。レーザーシステム全体は、空気除振されたハニカムベンチ上にあり、2台の FIR レーザー出力は、ベンチの動きによる光軸変動を補正する光学系⁹⁾を介して、JT-60装置に送られる。

ポンピング用 CO_2 レーザーは、通常的气体ロータイプであり、単一ブランチ、単一周波

数出力が得られる範囲で、放電管の長尺化をはかったものであり、 $9\mu\text{m P}$ (36) ブランチの CH_3OH $118.8\mu\text{m}$ ポンピング周波数において、単一周波数最大77Wの出力が得られた。単一周波数という条件のもとで得られる出力は、共振器の調整によってかわり、典型的に得られるのは、50W程度である。安定な CO_2 レーザー出力を得るため、次の様な配慮がなされている。

- ① 低熱膨張材料（低膨張結晶化ガラス、スーパーインバー）をできるだけ用いる。
- ② 光学素子の水冷を行なう。
- ③ 安定な定電流高圧電源を用い、ポンプのリップルによるガス圧変動を抑制するためレーザー管の前後にガスリザーバを設ける。

レーザーシステムの構成で問題となる周波数安定化システムについて、次に述べる。通常レーザーの周波数安定化としては、分光や周波数・波長標準への適用を目的としたより良い安定度を追求する方向の研究が多いが、本システムの場合、必要な精度は2章で述べた様に FIR レーザー周波数変動が $\Delta f/f < 4 \times 10^{-8}$ を満足すればよい程度であり、安定度をどれだけ高くできるかということよりも、長時間の運

Fig. 13 Output power of the FIR laser versus frequency of the pumping CO_2 laser. The frequency is expressed with the offset from the gain center of $9\mu\text{m}$ P(36) branch.

転に際して信頼性の高い動作をするということが重要である。

(1) CO_2 レーザー周波数安定化

ポンピング CO_2 レーザーの周波数変動はFIRレーザーの出力・周波数を変動させる。出力変動については、2章に示した様にビート信号検出帯域内成分が測定精度上問題となるが、Fig. 9に示されている様にバックトークが除去されている限り問題はなく、FIRレーザーパワーが十分得られる範囲で安定化されればよい。我々の実験によれば、 CO_2 レーザー周波数のポンピング最適値からのずれが5 MHzで、FIRレーザー出力減少は5%以下であった(Fig. 13)。 CO_2 レーザー周波数変動によるFIRレーザー周波数変動は、FM conversionと呼ばれ、その特性が報告されている^{21,22)} これらによれば、 CO_2 レーザー周波数変動量からFIRレーザー周波数変動量への変換係数は、0.1以下であり、 CO_2 レーザー周波数変動を1 MHz程度に抑えれば、FM conversionによるFIRレーザー周波数変

動は、測定精度上問題ないものとなる。

以上をまとめると、 CO_2 レーザーの周波数安定度として、絶対的精度は必要なく(FIRレーザーパワーが最大となる周波数に設定すればよい)、相対的安定度は1 MHz程度でよい。本システムでは、このような条件を信頼性よく満たすため、低パワーで安定度の良いローカルオシレーターをパワー最大点に位相検波方式で安定化し、ポンピング CO_2 レーザーをこれにオフセットロックする方式をとっている。ローカルオシレーター(レファレンス CO_2 レーザー)の周波数変動は、積分時間=100 msecの微分信号から80 KHz_{P-P}以下、 CO_2 レーザー間のビート信号変動は、F-V信号から500 KHz_{Z-P}以下と測定された。オフセット周波数は、始動時にFIRレーザー出力が最大となる様設定され、12~14 MHzだけリファレンス CO_2 レーザーより低い周波数が適当であった。これは、 CH_3OH 吸収線と若干ずれるが、主に、ポンピング CO_2 レーザーの同調特性によっているものと思われる。

共振器長の制御アクチュエーターには、制御スパン約10 μm のPZTを用いている。長時間運転によりスパンが不足する可能性があるため、制御スパン限界近くに達すると隣接した縦モードに発振モードを移すモードジャンプ機能²³⁾を設けている。

4.2 FIR レーザー周波数安定化

FIRレーザーの周波数制御精度として必要な条件は2章で述べた様に測定時のプローブレーザー周波数およびビート周波数の変動が600 kHz以下であり、差周波精度は、精度が高いほど検出帯域が狭くできるので望ましい。プローブレーザー周波数の測定時間内変動が600 kHz以下という条件は、Fig. 6に示される様にフリーランニングで確保でき、又、無変調出力が得られる、遠赤外領域では確度のよい制御誤差信号が得づらい等の理由で、フリーランニングは秀れた方法といえる。

Fig. 14は、これらを考慮して決定されたFIRレーザー周波数安定化システムのブロック

Fig.14 Block diagram of the frequency stabilization system of two FIR lasers. Three switches in this figure are operated according to the time sequence in Fig.15. S.M: stepping motor. D: driver circuit, PSD: phase sensitive detector, FVC: F-V converter.

Fig.15 Time sequence of controls of FIR lasers. High level means that the mode is operated.

図である。基本的には、プローブ FIR レーザーは、ステッピングモーターにより一次微分信号零点（パワー最大点）に安定化され、レファレンス FIR レーザーは、ステッピングモーター、もしくは PZT をアクチュエーターとして、プローブ FIR レーザーから 2 MHz オフセットロックされる。プラズマ計測時に「差周波数精度の高い無変調出力を得」それ以外の時間（待機状態）では、大きな制御スパン（～数100 μm ）

Fig.16 Frequency stabilities of two FIR lasers. (a): Beat frequency (F-V signal) of two FIR lasers (b): First derivative signal of the probe FIR laser.

を確保をするため、各制御動作は、Fig.15 に示されるシーケンス動作を行っている。すなわち、待機状態では、プローブレザーの周波数変調が行なわれ、一次微分信号零点にステッピングモーターにより、 $\pm 100 \text{ kHz}$ の精度で安定化し、一方、レファレンスレーザーは、ステッピングモーターにより、ビート周波数が $2 \text{ MHz} \pm 100 \text{ kHz}$ の範囲にオフセットロックされる。この状態で測定予告信号*が入力されると、プローブレザーは変調が停止してフリーランニング状態となり、レファレンスレーザーにおいては、制御アクチュエーターがステッピングモーターから PZT に切り換えられ、ビート周波数制御精度が高められる。Fig.16 は、プローブレザーの一次微分信号およびビート信号 F-V 出力をモニターし、制御システムシーケンス動作を確認したものである。

5. むすび

以上、核融合プラズマの電子密度測定に用いられるレーザーに要求される条件と遠赤外レ

*ここでは、J T-60 装置の放電一分前に発生する信号を利用している。

ザーの問題点, JT-60計測用に開発された CH_3OH レーザーおよび CH_3OH レーザーシステムについて概説した。遠赤外領域は良いコヒーレント光源が得づらい領域であり, レーザーのテクノロジーとしても経験が少なく未熟な分野である。本解説がこの分野に携わる方々の参考となれば幸いである。

最後に, CH_3OH レーザーシステムを共同で開発し, 本稿をまとめるにあたって御意見を頂いた日本電気(株)電子装置事業部磯部完一, 星宏一の両氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) S.M. Wolfe, et al.: Appl. Opt. **15** (1976) 2645.
- 2) M. Yamanaka, et al.: Int. J. of IR & MM Waves **1** (1980) 57.
- 3) D. Véron, et al.: J. Opt. Soc. Am. **67** (1977) 964.
- 4) 志甫諒他: O plus E No. 54 (1984) 52.
- 5) T. Fukuda and A. Nagashima: Conf. Digest of 9th Int. Conf. on Infrared & MM, Takarazuka, Oct. 1984, p. 258.
- 6) S. Aoki, et al.: ibid., p. 262.
- 7) O. Sukegawa, et al.: ibid., p. 396.
- 8) O. Sukegawa, et al.: ibid., p. 260.
- 9) K.J. Button and S.M. Wolfe: SPIE Vol. 105 For Infrared/Submillimeter Waves (1977) 72.
- 10) 板垣他: 日本原子力研究所研究報告書JAERI-M7121 (1977).
- 11) 山中正宣: 「遠赤外域測定用レーザー光源に関する調査」日本原子力研究所委託調査報告書.
- 12) 山中正宣: 応用物理学会誌 **49** (1980) 813.
- 13) D.R. Baker and S.T. Lee: Rev. Sci. Instrum. **49** (1978) 919.
- 14) A. Nagashima, et al.: Proc. 5th Int. Conf. on IR & MM Waves, Oct. (1980) 199.
- 15) D.T. Hodges: SPIE **105** (1977) 6.
- 16) D.K. Mansfield, et al.: Appl. Phys. Lett. **37** (1980) 688.
- 17) J. Heppner and C.O. Weiss: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 590.
- 18) D.A. Weitz, et al.: Opt. Lett. **3** (1978) 13.
- 19) H.P. Rüser, et al.: Int. J. of IR & MM Waves **3** (1982) 839.
- 20) C.H. Ma, et al.: Appl. Phys. Lett. **34** (1979) 219.
- 21) A. Godone, et al.: IEEE J. Quantum Electron. **QE-14** (1978) 339.
- 22) P.M. Plaincharp: IEEE J. Quantum Electron. **QE-15** (1979) 860.
- 23) Lansing Corp. Lock-in Stabilizer Model 80.214 Instruction Manual.