UDC 621.375.826.038.823:535.417
621.317.318:533.9

論 文

57-A9

二光束変調形遠赤外レーザ干渉計用位相 検出器とそのプラズマ電子密度計測への 応用

正 員 高井 正弘 (関西大)
准 員 下林 勝 (関西大)
非会員 西沢 章光 (名古屋大)
非会員 野田 信明 (名古屋大)
非会員 藤田 順治 (名古屋大)

正 員 山中 正宣 (大阪大)
非会員 長島 章 (原 研)
非会員 岡島 茂樹 (中部工大)
非会員 小泉 俊郎 (東京理科大)
非会員 長坂 啓吾 (東京理科大)

1. ま え が き

核融合研究の進展につれて装置は大形になり、生成されるプラズマは高温高密度化している。そのためプラズマパラメータの新しい診断法の開発が必要になってきた。例えば、干渉法による電子密度の測定においては、密度が $5 \sim 10 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ と高くなると従来のマイクロ波に代わって遠赤外光を用いなければならなくなる。また大形装置では機械的振動が大きく、

プローブ光強度の変動も長距離伝搬の間に生じる屈折、散乱、吸収などによって大きくなる。従って、干渉測定に際しては、装置の機械的振動成分を除去すること、測定値がプローブ光強度の変動に影響されないこと、および時間変化を知るためには、高時間分解能で実時間処理の可能な方法が必要である。

著者らは、このために二光束変調形遠赤外レーザ干渉計⁽¹⁾⁽²⁾の開発を昭和52年度より名古屋大学プラズマ研究所の共同研究として進めてきた。一般的なマイケルソン形やマッハツェンダー形干渉計では、出力 $I \propto I_0(1 - \cos \phi)$ から位相変化 ϕ を求めているので、位相分解能はプローブ光強度 I_0 の変動と $dI/d\phi \propto \sin \phi$ によって制限され、 $\phi = n\pi$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) で0になる。また位相変化が複雑な場合には、その変化を読み取ることは不可能である。

これに対して、著者らの二光束変調形干渉計では、周波数 ω と $\omega + \Delta\omega$ の二光束を用いてプローブ側と参照側で、それぞれ二つの干渉計を構成している。そうして変調周波数 $\Delta\omega$ のプローブ光が、プラズマ中で位相シフトされたときのプローブ信号 $I_P \propto \cos(\Delta\omega t + \phi)$ を参照信号 $I_R \propto \cos \Delta\omega t$ と比較することにより、位相シフト量は二信号間の時間遅れから直接求められる。すなわち、時間遅れを Δt とすると $\phi = \Delta\omega \Delta t$ であり、信号の振幅(強度)変動の影響を受けず、分解能も位相と無関係になる。更に装置の機械的振動成分を除去するために、 $0.6328 \mu\text{m}$ He-Ne

A Digital Phase Comparator for a Beat-Modulated Far-Infrared Laser Interferometer and its Application to the Electron Density Measurement. By Masahiro Takai, Member, Masaru Shimobayashi, Associate (Department of Electrical Engineering, Kansai University), Akimitsu Nishizawa, Non-member, Nobuaki Noda, Non-member, Junji Fujita, Non-member (Institute of Plasma Physics, Nagoya University), Masanobu Yamanaka, Member (Course of Electromagnetic Energy Engineering, Osaka University), Akira Nagashima, Non-member (Japan Atomic Energy Research Institute), Shigeki Okajima, Non-member (Department of Physics, Chubu Institute of Technology), Toshiro Koizumi, Non-member & Keigo Nagasaka, Non-member (Department of Physics, Science University of Tokyo).

高井正弘: 正員, 関西大学工学部

下林 勝: 准員, 関西大学工学部

西沢章光: 非会員, 名古屋大学プラズマ研究所

野田信明: 非会員, 名古屋大学プラズマ研究所

藤田順治: 非会員, 名古屋大学プラズマ研究所

山中正宣: 正員, 大阪大学工学部

長島 章: 非会員, 日本原子力研究所

岡島茂樹: 非会員, 中部工業大学工学部

小泉俊郎: 非会員, 東京理科大学理学部

長坂啓吾: 非会員, 東京理科大学理学部

レーザ干渉計を併用していることも本干渉計の特長である。

この干渉計システムの性能は、位相シフト量の検出精度、時間分解能および検出信号の処理の容易さなどによって決まる。従って、位相変化の検出方法が重要な研究課題の一つとなる。著者らは、位相シフト量を検出するためにデジタル位相検出器⁽³⁾を開発した。この特長は高感度、高分解能をもち、しかもブラウン管オシロスコープで直読でき、同時に電子計算機によるデータ処理が容易な電圧信号として実時間で検出できることである。

位相検出法としては、Meddens 氏ら⁽⁴⁾が CO₂ レーザ干渉計に用いたデジタル位相比較器の例があるが、それに比べて我々の場合には次のような利点がある。

- (1) 装置の各部に IC と OP アンプを用いており、簡便で動作の安定性も高い。
- (2) 波形整形部の入力インピーダンスが高く、入力側測定系へ与える影響はほとんどない。また動作点を入力信号の任意のレベルに設定できる。
- (3) 出力側のローパスフィルタの帯域および増幅器の利得が可変であり、動作出力電圧値が広くとれる。

本検出器の時間分解能は 4 μs であり、 $2 \times 10^{-2} \sim 15$ フリンジの位相変位量の検出が可能である。

本論文では、著者らが開発した位相検出器による位相変位量の検出方法と、これを適用した二光束変調形 118.8 μm CH₃OH レーザ干渉計による JIPPT-II トカマク (名古屋大学プラズマ研究所) プラズマの電子密度の測定例について述べる。なお 118.8 μm CH₃OH レーザの諸特性⁽⁵⁾、および干渉計システムの詳細な構成、特性、ならびに電子密度の計測にかかわる問題点⁽⁶⁾⁽⁷⁾などについては他の報告にゆずる。

2. 二光束変調形遠赤外レーザ干渉計

干渉測定において、プローブ光がプラズマを通過したときに受ける位相シフトのフリンジ数 $N (\equiv \phi/2\pi)$ は、 $N = 5.97 \times 10^{-14} a \lambda_0 n_e$ で与えられる⁽⁸⁾。ただし、 $a(\text{cm})$ はプラズマ半径、 $\lambda_0(\text{cm})$ はプローブ光の波長で、電子密度 $n_e(\text{cm}^{-3})$ はプラズマ中心から半径方向への放物線分布を仮定し、かつしゃ断密度 $n_{eo} (= 1.16 \times 10^{13} \lambda_0^{-2})(\text{cm}^{-3})$ よりも極めて小さい場合である。すなわち、位相シフト量は電子密度の線形関数となるが、測定対象とするプラズマによってプローブ光の波長を選定しなければならない。著者らは大形トカマクプラズマの電子密度の測定を目的として 118.8 μm CH₃OH レーザを用いた。その理由は、

- (1) プラズマによってしゃ断されることなく、位相シフト量は電子密度の線形関数となり、しかも検出が容易な値となる。
- (2) プラズマの凹レンズ作用によるビームの発散および機械的振動による影響が小さい。

などである。この場合のしゃ断電子密度 n_{eo} は $7.9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ であり、JIPPT-II トカマクプラズマ (半径 15 cm, 電子密度 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) による位相シフトは 0.1~1 フリンジとなる。

本干渉計システムの構成図を図 1 に示す。干渉計は場所的制限と位相変化が大きくとれることからマイケルソン形を採用し、プラズマ真空容器の窓に直接取り付けたコーナキューブを反射鏡として用いた。レーザ周波数の変調は、双子形 CH₃OH レーザの共振長を差動マイクロメータで変化させて生じる相互の発振周波数差を用いた。検出器 D_1 では発振周波数 ω と $\omega + \Delta\omega$ のレーザ光を混合して、変調参照信号 $I_r \propto \cos \Delta\omega t$ を、 D_2 ではプラズマで位相シフト ϕ されたプローブ信号 $I_p \propto \cos(\Delta\omega t + \phi)$ を検出する。変調周

図 1 二光束変調形遠赤外レーザ干渉計システムの構成図

Fig. 1. Block diagram of a beat modulated FIR laser interferometer system.

波数は 1 MHz を用いたが、プラズマの持続時間約 300 ms, その間の速い変動約 100 kHz であることから、電子密度の変動に十分追従した時間分解能が得られる。プローブ信号と参照信号の位相差は、位相検出器でプローブ光の光路に含まれる装置の機械的振動は He-Ne レーザ変位計で検出した。両者の出力はオシロスコープでそれぞれ表示し、同時に電子計算機処理によって振動分を補正した電子密度の時間変化をグラフで表示した。

118.8 μm CH₃OH レーザは、CO₂ レーザ 9.7 μm P(36) で光励起して発振させた。測定時の CO₂ 9.7 μm P(36) の発振出力は約 30 W, その安定性は 60 分で $\pm 0.3 \sim 1.8\%$ であり、118.8 μm CH₃OH レーザ出力は 1 台あたり約 10 mW であった。ビート信号の検知器出力は、参照光で 100~200 mV, S/N 250, プローブ光で 30~60 mV, S/N 50 であった。また 1 MHz ビートの周波数変動は約 ± 10 kHz であった。なお、この程度のビート周波数および出力の変動があっても、それが位相検出へ及ぼす影響は認められなかった。検知器⁽⁹⁾には液体ヘリウム温度の GeGa 光伝導素子を用いてあり、感度は 1 A/W, 応答速度は 30 MHz 以上、等価雑音パワー約 10^{-14} W/√Hz 以下の性能をもっている。

3. 位 相 検 出 器

著者らは、プローブ光のプラズマによる位相変位量の検出方法として、高精度、高時間分解能をもち、しかも処理が容易な電圧信号として検出できるデジタル位相検出器を開発した。ここでは、この位相検出器の原理、構成、特性などについて述べる。なお、この検出方法は、著者らの遠赤外レーザ干渉計のみならず一般的に適用できるものである。

〈3.1〉 位相差の検出原理 位相差の検出原理は次に述べるごとくである。二つのデジタルカウンタを用いて、一方をダウンカウンタ、他方をアップカウンタとして働かせるようにしてある。参照パルスを一定周期でダウンカウンタへ、位相シフトされたプローブパルスをアップカウンタへそれぞれ入力する。この場合、図 2 のようにプローブパルスが入力されると 1 レベル立上り、参照パルスが入力されると 1 レベル下がる。この両カウンタからの出力を全加算器でデジタル的に加算し、その出力をはしご形積分器で D/A 変換した後にローパスフィルタおよび増幅器を通して位相の変化量を電圧の変化として検出する。この値はオシロスコープで直読でき、同時に電子計算機でデータ処理を行なうことができる。

図 2 位相検出器の原理図

Fig. 2. Principle of a digital phase comparator.

図 3 位相検出器の構成図

Fig. 3. Block diagram of a digital phase comparator.

〈3.2〉 位相検出器の構成 位相検出器は図 3 に示すように波形整形、アップダウンカウンタ、全加算器、D/A 変換器、フィルタおよび増幅器より構成されている。波形整形には電圧比較用 IC ($\mu 760$ HC) を用い、入力信号電圧を基準電圧と比較して、入力電圧が基準電圧を越えるときにパルス信号を発生させる。この場合、入力波形に応じて適切な基準レベルに動作点を設定できるようにしてあり、また正出力と反転出力の切り換えも可能である。電圧比較用 IC の入力インピーダンスは、1 MHz で 12 k Ω , 8 pF である。カウンタは 4 ビットの TTL IC 74913 を 2 個用い、一方をアップカウンタ、他方をダウンカウンタとして動作させることにより、アップダウンカウントを同時かつ独立に行なえるようになっている。なお、このカウンタでは 15 フリンジ ($2\pi \times 15$) までの位相差の検出が可能である。全加算器には IC 7483 を用いている。ローパスフィルタは OP アンプ (LM 310) を用いたバタワーズ形のアクティブフィルタで、シャ断周波数は可変抵抗によって 50~400 kHz の範囲で任意の値に設定できる。出力増幅器にも OP アンプ (BB 3508) を用いてあり、その増幅率も可変である。ここではローパスフィルタのシャ断周波数は 250 kHz, 増幅器の電圧増幅率は 1.5 倍に設定して測定した。この位相検出器の回路図を図 4 に示す。

図 4 位相検出器の回路図

Fig. 4. Circuit diagram of a digital phase comparator.

トカマクプラズマの電子密度計測への適用に際しては、ビート信号の出力不足、検知器の増幅器雑音や外的雑音の影響が考えられる。従って、位相検出器の前段にバンドパスフィルタと増幅器をそう入して雑音のシャ断と信号波の増幅を行なって、位相検出器の誤動作を防ぐようにした。今回用いたフィルタと増幅器の回路図は図5、図6であり、電圧利得は1 MHzで30 dBである。なお、この増幅器の利得はともに可変であり、異なるプローブ信号と参照信号の出力をほぼ同じ電圧値の信号として、位相検出器の波形整形部へ入力するように利得を調整して用いた。

〈3.3〉 位相検出器の特性 位相検出器の性能としては、

- ① 動作の正確さ
- ② 位相差の検出可能な範囲
- ③ 時間分解能

などを明らかにする必要がある。①については、カウンタは入力パルスの立上りで動作するので、波形整形回路のパルス整形の性能に主として依存する。この回路の性能を調べるために、正弦波（周波数 700 kHz、電圧 600 mV）を入力したときの出力波形を観測した。

図7(a)はその一例であるが、極めて良好な方形波パルスに整形されている。このことは、出力を反転させても基準レベルを変えても同様であるが、入力電圧が小さい場合(同図(b))や雑音信号が入った場合(同図(c))には、不安定不規則なパルス波になる。この

図 5 フィルタの回路図

Fig. 5. Circuit diagram of a band pass filter.

図 6 増幅器の回路図

Fig. 6. Circuit diagram of the amplifier.

ときには整形されたパルス波中に含まれている立上り部によってカウンタが誤動作を起こすことになる。すなわち、正確なカウンタ動作を得るためには、入力信

(a) 適正信号入力

(c) 雑音を含む信号入力

(b) 小信号入力

図 7 波形整形部の出力波形

Fig. 7. Output waveform of the pulse shaping circuit.

図 8 位相変位量と出力電圧

Fig. 8. Output voltage vs. a phase shift.

号電圧にしきい値があり、雑音信号を除去することの必要性がわかった。このために著者らは、バンドパスフィルタと増幅器を波形整形部の前段に用いて、動作の正確化を図った。正常動作に必要な波形整形部への最小入力電圧は約 400 mV であり、前置フィルタ、増幅器部への入力としては約 20 mV が必要である。この電圧を得るためのビート出力に対応したレーザ出力は、遠赤外検知器の感度 4.7 mV/1 μ W (laser) を考慮して 4 μ W になる。なお、前置フィルタ・増幅器の利得を上げれば数十 nW 程度のレーザ出力に対し

ても正常動作が十分可能である。

次に、②の検出可能な位相差は、原理的には 0~15 フリンジであるが、実際の装置としては D/A 変換器の特性、フィルタ・増幅器の利得や雑音などによって制限される。パルス幅の可変なパルス発生器を用いて位相検出特性を調べた。この場合、カウンタはパルスの立上りで動作するので、入力1の立上りと入力2の立下りを同期させておき、その後パルス幅を変えて等価的な位相差をもたせて測定した。図8はその測定例であり、位相シフト量に比例した出力電圧が検出され

図 9 位相変位量と出力電圧の関係

Fig. 9. Output voltage vs. a phase shift.

た。

1/16~6 フリンジ (1/16 間隔) の位相変位量に対する出力電圧の測定結果を示したのが図 9 であり、両者は非常に良い直線関係をもつことが確認できた。この直線性から検出できる最小の位相差は、位相検出器の出力電圧の最小読み取り可能値で決まる。本検出器の出力電圧には、カウンタへオフセット的に加わっている電圧が重畳されており、微小分分離が困難である。またローパスフィルタ、出力増幅器の雑音による制限もあり、検出可能な出力電圧は約 5 mV である。信頼できる最小位相差としては 2×10^{-2} フリンジになる。なお、1 フリンジあたりの出力電圧は 0.4 V、出力インピーダンスは 50Ω である。

より広域の位相シフトに対する検出特性を明らかにするために、周波数の異なる二信号を用いて観測した。その例が図 10 である。(a) 図は入力 1~800 kHz、入力 2~1 MHz を入力した場合で、位相差 (遅れ) が大きくなるにつれて出力電圧は増加し、15 フリンジに達するとカウンタは元へもどり、その後はまた位相差と共に出力も増加することを繰り返す。(c) 図は入力 1~1.2 MHz、入力 2~1 MHz を入力した場合で、位相差 (進み) と共に出力電圧は減少し、15 フリンジになると元へもどり、その後はまた同様の变化を繰り返す。(b) 図は二信号の周波数が同じで位相差を生じない場合である。4 ビットのカウンタを使用しているため、16 カウントを越えると元へもどるが、この間の 1 カウントは 16 カウント分に対応しており、出力電圧は 15 倍の値として検出される。従って、カウンタの初期値をこのような動作状態に設定すれば、1 フリンジ以内の微小な位相変化が 15 倍の感度で測定できる。

③の時間分解能は、波形整形部の IC (μ 760 HC) とカウンタ (74193) の動作時間およびローパスフィルタの帯域幅で制限される。 μ 760 HC と 74193 の応

図 10 周波数の異なる二信号間の位相差検出の例

Fig. 10. A phase shift between two signals with a different frequencies.

答時間は 20 ns であるが、立上りと立下り時間を考慮すると、動作時間の限界は 40 ns (25 MHz) である。またローパスフィルタのシャ断周波数は 250 kHz である。従って、位相検出器としての時間分解能は、このシャ断周波数で制限されて 4μ s である。

4. トカマクプラズマの電子密度測定

今回開発した遠赤外レーザ干渉計システムを用いて、JIPPT-II トカマク装置で発生させた高温プラズマの電子密度を測定した。遠赤外レーザ干渉計の検出感度は 2×10^{-2} フリンジであり、一方 He-Ne レーザ変位計の感度は、遠赤外のフリンジに換算して 2.5×10^{-2} である。従って、このシステムの感度は両者の

図 11 He-Ne レーザ干渉計および遠赤外レーザ干渉計の出力の観測例

Fig. 11. Output of the He-Ne laser and FIR laser interferometer.

差を読み取るので 2.5×10^{-2} フリンジになり、電子密度としては $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ にあたる。

図 11 は、遠赤外レーザ干渉計と He-Ne レーザ変位計の出力をオシロスコープに表示した例である。位相検出器の出力電圧は、1 フリンジあたり (a) 図では 0.4 V, (b) 図では 6 V (16 カウント分) である。これらの波形から直接プラズマ装置の変位量と、この変位分を含んだプラズマによる位相シフト量を読み取ることができ、後者から前者を差し引けば実質的な電子密度の値が求められる。

また電子計算機によって精度良く能率的にデータ処理を行ない、同時にマイクロ波干渉計による測定値とのクロスチェックを行ないながら、電子密度の時間変化を測定した。代表的な測定例を図 12 に示す。プラズマ半径は 15 cm, 測定点は中心からプラズマの径方向 (トーラスの内側側) へ 2.5 cm の所である。(a) 図は位相検出器の出力で、装置の振動を含んだ位相変化を示しており、(b) 図は遠赤外レーザの位相変位に換算した He-Ne レーザ変位計の出力である。(c) 図は (a) 図から (b) 図を差し引いた電子密度の時間変化、(d) 図は 2 mm 波干渉計で測定した電子密度を示している。両者の値は 10% 以内ではほぼ一致しているが、細部の相違はプラズマの測定位置が異なるためであると考えられる。

(a) 遠赤外レーザ干渉計による位相変化
(b) He-Ne レーザ干渉計による装置の変位置
(c) 装置の振動成分を除去した電子密度の時間変化
(d) 2 mm 波干渉計で測定した電子密度の時間変化

図 12 JIIPT-II トカマクプラズマの電子密度の時間変化の測定例⁽⁶⁾

Fig. 12. Typical electron density of the JIIPT-II tokamak plasma.

5. 結 論

レーザ干渉計におけるプローブ信号の微小な位相変位量を高時間分解能で精度良く、しかもデータ処理の容易な電圧信号として検出できる位相検出器を開発した。その応答周波数は 25 MHz, 検出感度は 2×10^{-2} フリンジ, 時間分解能は 4 μs , 入力インピーダンスは 1 MHz で 12 k Ω , 最小動作電圧は約 0.4 V, 出力インピーダンスは 50 Ω である。

二光束変調形 118.8 μm CH_3OH レーザ干渉計にこの位相検出器を適用して、名古屋大学プラズマ研究所の JIIPT-II トカマクプラズマの電子密度の時間変化を測定することに成功した。今回測定された平均電子密度は $\sim 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ であり、マイクロ波干渉計による測定結果との比較から、測定値の信頼性を確かめることができた。従って、本遠赤外レーザ干渉計は、特にマイクロ波干渉計が適用できなくなる電子密度 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ の領域で、時間変化の速いプラズマに対して有効な測定方法の一つであることが明らかになった。

更に全体の運用が簡便で、より信頼性の高い電子密度の標準的な測定手段として使用できるように諸々の改良を加えている。

なお、本研究は名古屋大学プラズマ研究所の共同研究として行なわれたものである。位相検出器の開発は関西大学 村上雄亮君、林 寛君と共に行ない、藤沢隆章助手の協力を得た。レーザ干渉計の開発には大阪産業大学 網脇恵章助教授、大阪大学 武田佳宏君、東京理科大学 篠崎 仁君、中部工業大学 牧野信吾君らの、プラズマの電子密度測定には名古屋大学プラズマ研究所 JIIPT-II 実験グループ、フライホイール電源運転グループの協力を得た。ここに以上の方々に深く感謝する。

(昭和 56 年 2 月 20 日受付, 同 56 年 8 月 10 日再受付)

文 献

- (1) D. Véron: *Opt. Commun.*, **10**, 95 (1974)
- (2) S.M. Wolfe, et al.: *Appl. Opt.*, **15**, 2645 (1976)
- (3) 高井, 他: 昭 53 電気関係学会関西支部連大, G 10-8
- (4) C. A. J. Hugenholtz & B.J.H. Meddens: Rijnhuizen Report, 76-100 (1976)
- (5) M. Yamanaka, et al.: *J. IR and MM Waves*, **1**, 57 (1980)
- (6) A. Nishizawa, et al.: 5th Int. Conf. IR and MM Waves Digest, 197 (1980)
- (7) 西沢, 他: 核融合研究, **45**, 5, 477 (昭 56)
- (8) P. Brossier & R. A. Blamken: *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-22**, 1053 (1974)
- (9) 小泉, 他: 応用物理学会講演予稿集, 29 aA 11 (昭 53)