

GAMMA10 における周波数通倍型干渉計の開発

嶋 頼子^{a)}

筑波大学研究推進部研究企画課(プラズマ研究センター)

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

周波数通倍器を用いた干渉計を製作し、GAMMA10 で使用している干渉計の更新を行った。この干渉計の構成と、プラズマ実験での適用結果について述べる。

キーワード：干渉計、プラズマ

1. はじめに

プラズマ研究センターでは磁場によるプラズマ閉じ込め装置 GAMMA10 により、プラズマ閉じ込めの実験を行っている。プラズマの電子密度の計測は、プラズマの状態を知る上で大変重要であり、常に安定した計測が求められている。GAMMA10 では、プラズマの電子密度を計測する方法として、主に 70GHz の電磁波をプローブ波とする干渉計を用いている。

しかしながら、高周波回路である為に測定が不安定になることが多く、システムの改良が常に行われてきた。本報告では、周波数通倍器を用いた干渉計の開発について報告する。

2. 電子密度計測

2.1 干渉計

プラズマの電子密度を測定する方法に、マイクロ波をプラズマ中に透過させてその位相の変化を計測する干渉法がある。マイクロ波を用いることの利点は、プラズマに非接触でプラズマの内部を乱すことなく測定できる点である。プラズマ研究センターでも密度計測には干渉計を使用している。

図 1 に干渉計の概念図を示す。プラズマ中を伝搬した透過波とプラズマ中を伝搬しない参照波との位相差から伝搬経路の密度の積分値を算出する。図 2 は GAMMA10 の真空容器の全体図とセントラル部の断面を示している。プラズマ断面の中心から距離

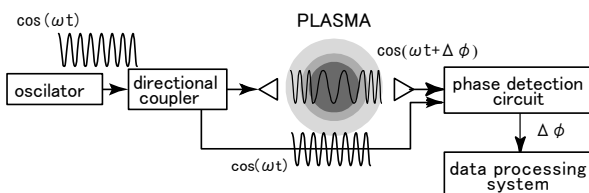


図 1. 干渉計の概念

y だけ離れたところに x 軸に平行にマイクロ波を入射させる。X₁ から X₂ に電磁波がプラズマ中を伝搬したことによる位相の変化量^[1] $\phi(y)$ は

$$\phi(y) = \int_{x_1}^{x_2} (k_0 - k_p) dx = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{x_1}^{x_2} (1 - N) dx \quad (1)$$

とあらわされる。ただし、 k_0 は真空中の波数、 k_p はプラズマ中の波数である。入射電磁波の電場が外部磁場と平行 (O-mode) に入射した場合の屈折率は

$$N = \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2(r)}{\omega^2} \right)^{1/2} = \left(1 - \frac{n_e(r)}{n_c} \right)^{1/2} \quad (2)$$

で与えられる。ただし $\omega_{pe}/2\pi$ は電子プラズマ周波数、 $\omega/2\pi$ は入射波の周波数、 n_e は x の位置での電子密度、 $n_c = m_e \epsilon_0 \omega^2 / e^2$ は屈折率が 0 となるときの密度でカットオフ密度と呼ばれている。ここで ϵ_0 は真空中の誘電率、 m_e は電子の質量、 e は電子の電荷である。プラズマの密度が入射波に対するカットオフ密度よりも十分小さいとき、 $\phi(y)$ は次式のようにになる。

$$\phi(y) \cong \frac{k_0}{2n_c} \int_{x_1}^{x_2} n_e(r) dx \quad (3)$$

$\int_{x_1}^{x_2} n_e(r) dx$ は電子密度を伝搬経路で積分したもの

で線密度という。干渉計では、この線密度を測定することが出来る。

電子密度の分布が軸対称であるとき、線密度の半径方向の分布を計測することにより、アーベル変換を用いて線密度 $\phi(y)$ から電子密度の分布を求めることができる。

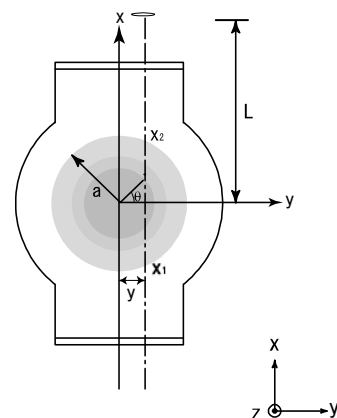


図 2. 干渉測定における
プラズマ中の光路の幾何学的配置

^{a)} E-mail: yoriko@prc.tsukuba.ac.jp; Tel: 029-853-7464

2.2 GAMMA10 における干渉計

GAMMA10 は東西に 27 メートルの長い装置で、各部の電子線密度計測の為に 9 カ所に干渉計を設置している。

プラズマによる位相変化を検出する方法としては、 $\cos \phi(y)$, $\sin \phi(y)$ を含む干渉信号を測定し、計算機により $\arctan \phi(y)$ を求める計算直視法と干渉信号 $\cos(\omega t + \phi(y))$ を測定し、位相比較器^[2]により $\phi(y)$ を検出する位相直視法がある。現在プラズマ研究センターでは、電子回路の構成が簡単な計算直視法を利用している。

プラズマに入射する透過波の周波数の選択は、カットオフ周波数を考慮しなければならない。セントラル部における典型的な密度分布の時のカットオ

$$n_e(r) = 2.0 \times 10^{18} \{1 - (r/0.18)^2\} [m^{-3}] \quad (4)$$

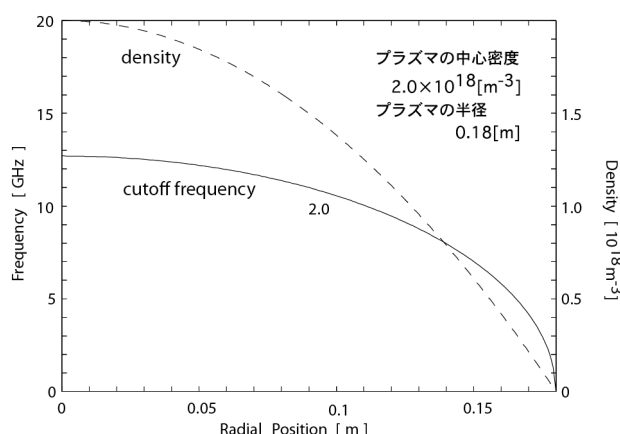


図 3. セントラル部のカットオフ周波数

フ周波数を図 3 に示す。図 3 の横軸にプラズマの半径を示す。中心付近の電子密度が一番高くなり、カットオフ周波数は 13 GHz 程度となっている。従って、透過波の周波数としては、13 GHz よりも十分高い周波数を選択する必要がある。現在、入射周波数として 70 GHz のものを選んでいる。光源は、数年前はクライストロン発振器を使用していたが、現在は半導体を用いた IMPATT 発振器が主流となっている。しかし、70 GHz の発振器が手に入りにくくなっていること、また、70 GHz に対し中間周波数(IF 信号)として 150 MHz の変調をかけていることから、測定が不安定になることも多く、調整もほとんどのパーツが導波管であり、一度構築すると組み替えが困難であることから、新型の干渉計の開発を進めていた。

3. 通倍型干渉計

今回開発したのは、発振源として周波数安定性に優れた Phase Locked Dielectric Resonator Oscillator (PLDRO) 17.5 GHz と IF 信号源として Temperature-Compensated Crystal Oscillator (TCXO) 37.5 MHz を利用することにより、70 GHz の発振器の入手の問題をクリアした。また、IF 信号を 150 MHz になるように設計し、現在のシステムとの入れ替えをやすくした。システムを図 4 に示す。

PLDRO の出力はデバイダーにより 2 つに分けられ、一方はそのまま 4 通倍され 70GHz となりプラズマを透過しない参照波として利用する。他方は TCXO の 37.5 MHz と合わされた後 4 通倍され 70.15 GHz となり、プラズマ中に入射する透過波となる。透過波はプラズマ中を透過することにより、プラズマによる位相差の情報を含む。プラズマを透過した透過波と参照波をミキサーに入力することに

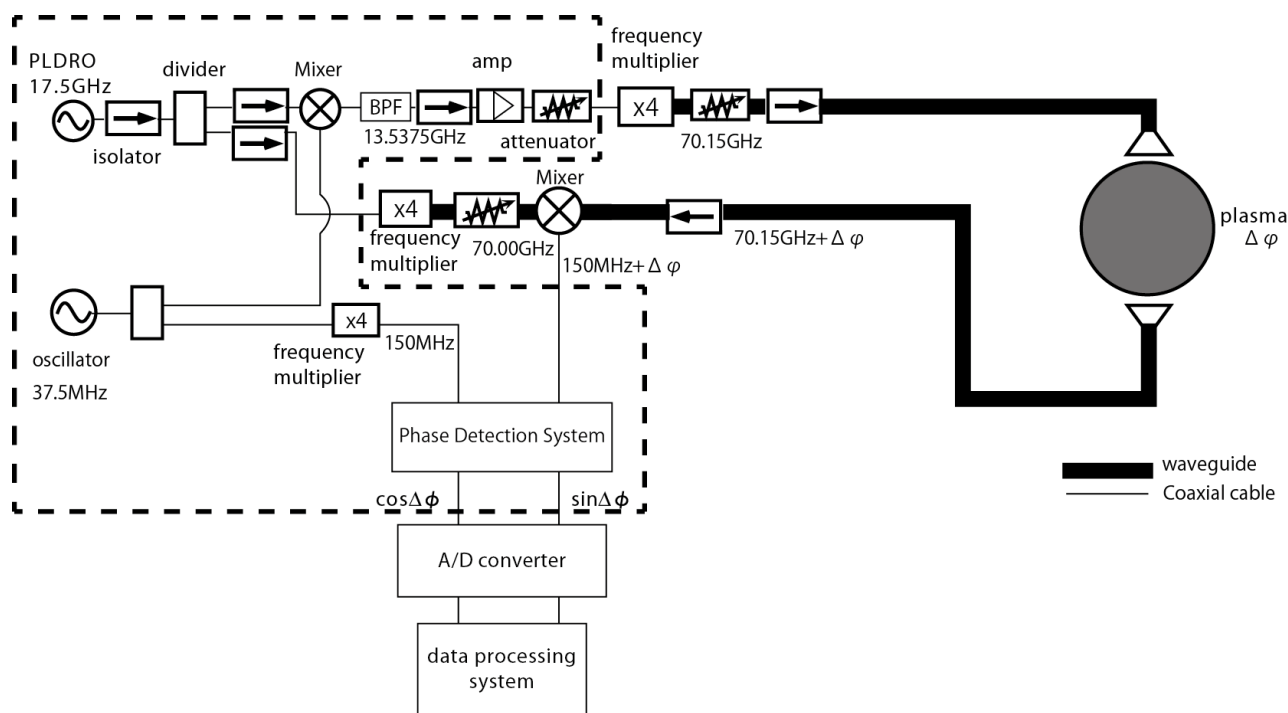


図 4. 通倍型干渉計のシステム

より、その差周波 150 MHz に位相情報が載せられる。また、TCXO の 4 通倍された 150 MHz の出力は位相検出回路の Lo 入力となる。位相検出回路の出力としてプラズマの位相情報を含んだ $\cos\phi(y)$, $\sin\phi(y)$ を得ることが出来る。

4. GAMMA10 での適用

4.1 west barrier 部への設置

製作した干渉計を GAMMA10 の西側、west barrier 部へ設置した。設置場所を図 5 に示す。

通倍型システムのパーツ数は多くなるが、ほとんどが 18 GHz 以下の物品であるため、小型で同軸ケーブルを用いることができ、扱いやすい回路となったため図 4 の破線部はアルミのケースに納めた。

本システムの設置前はアップコンバーター方式の干渉計^[3]が付けられていたが、システムの入替は立体回路部がほとんど無いため、30 分程度で終わった。設置された干渉計を図 6 に示す。

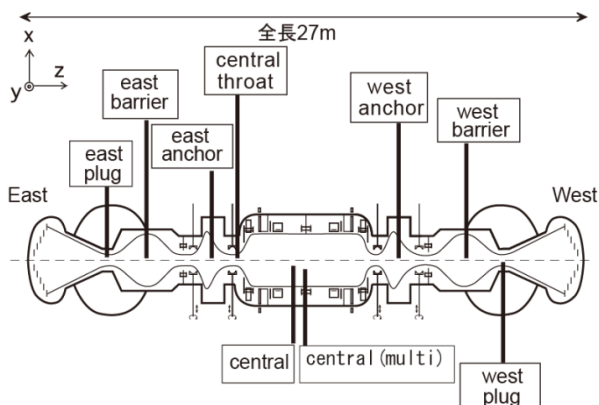


図 5. GAMMA10 に設置されている干渉計

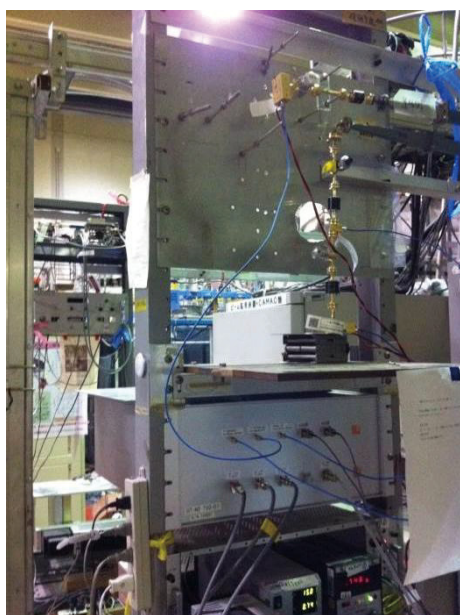


図 6. west barrier 部に設置した様子

4.2 計測結果

図 7 に本システムで計測した west barrier 部の線密度信号を示す。得られた $\sin\phi$, $\cos\phi$ を極座標表示したものを a) に示す。原点を中心とした、きれいなリサージュを描いており、正しく計測出来ていることが分かる。このリサージュの位相変化から線密度を導出したものが b) である。さらに線密度を周波数解析したものを c) に示す。s_NBI (スロッシング中性粒子ビーム入射) 加熱の時に、低周波の揺動が発生しているのがわかる。

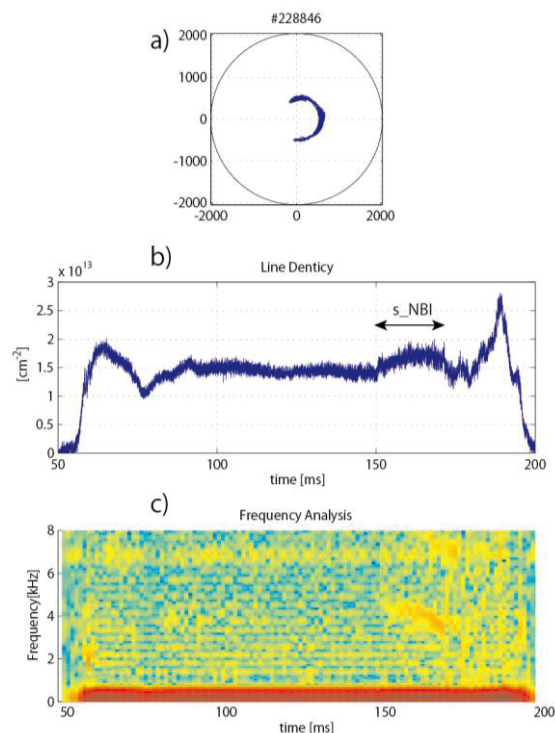


図 7. 計測結果

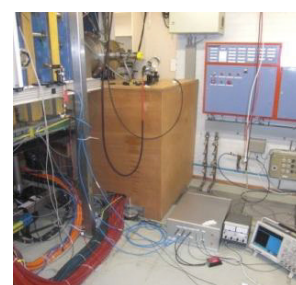
5. PILOT-PSI での使用

10 月に本システムをオランダに輸出し DIFFER 研究所の Pilot-PSI 装置での密度計測を行った。本装置はほとんどの部品がアルミケースに収めてあり、Pilot-PSI へのアクセスはセミリジッドケーブルで行える。輸出先でも簡単に設置することができ、プラズマ線密度、線密度揺動計測を行うことができた。

図 8 にオランダでの設置の様子と計測中の様子を示す。



現地研究者による作業



測定中の様子

図 8. PILOT PSI での測定

6. まとめ

通倍型の干渉計を開発し、GAMMA10 での計測についてまとめた。従来の方法に比べ、低い周波数の発振器を用いることから、安定した計測のできる干渉計を作成することが出来た。今後、GAMMA10 の干渉計は随時本システムに変えていく予定である。また、小型で扱いやすいシステムであるので、装置の持ち運びがしやすく、他の実験装置での計測もできる。

今回は、オランダに輸出して使用したが、その際筑波大学の輸出管理にのっとり様々な資料を用意する必要があった。輸送自体にも、書類が必要になることもあり、研究推進部の輸出管理マネジャーの指示のもと、今回は無事輸出を行うことができた。

今回の経験として、装置の輸出が想定される場合には、購入元・メーカー等すべての情報をそろえておくこと、十分な期間(最低 2 ヶ月以上)をとってから各部署に連絡しておく必要があることが分かった。

参考文献

- [1] 間 瀬 淳 , プラズマ・核融合学会誌 74,NO.12(1998,December)pp.1382-1390.
- [2] 伊藤康彦, ミリ波干渉計用位相検出回路の設計及び製作, 筑波大学技術報告 NO.12 (1992) 87-93.
- [3] 嶋 頼子, ヘテロダイン型干渉計の製作と GAMMA10 への適用, 筑波大学技術報告 NO.20 (2000) 29-34.

Development of the Multiplied Interferometer System in the GAMMA10

Yoriko Shima

Plasma Research Center, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577 Japan

Keywords: Interferometer, Plasma