2 mm マイクロ波干渉計によるBSG プラズマの測定 (BSG-4)*

藤田順治・岡本幸雄・宮本健郎

川崎 温・井上信幸・鈴木康夫

アダチケイゾー, 内田 俊二郎**

(名古屋大学プラズマ研究所***)

(昭和41年10月26日受理)

Abstract

A 2 mm microwave transmission interferometer is used to measure the electron density, collision frequency and electron temperature in order to study the expanding plasma of BSG I device. The electron density is above $2.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ at the peak and the microwave beam is cut off. The density decay below cut off is obtained from the phase shift and the density profile measured by floating double probes. Oversized waveguide of 10 Gc/s, standard pyramidal horns of 25 db gain and teflon lenses about 60 mm in focal distance are used.

* Measurements of BSG Plasma with a 2 mm Microwave Interferometer (BSG-4)

** Junji Fujita, Yukio Okamoto, Kenro Miyamoto, Sunao Kawasaki, Nobuyuki Inoue, Yasuo Suzuki, Keizo Adati, Taijiro Uchida.

*** Institute of Plasma Physics, Nagoya University.

Fig. 2

ここで、 $\nu/\omega_p \lesssim 0.01$, $\omega_p^2/\omega^2 = n/n_c \lesssim 0.5$ であれば α は、

$$\begin{aligned} \alpha &\simeq \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \frac{\nu}{\sqrt{\omega^2 - \omega_p^2}} \\ &= \frac{\pi}{\lambda} \frac{n}{n_c} \frac{1}{\sqrt{1 - n/n_c}} \frac{\nu}{\omega} \end{aligned} \quad (9)$$

と近似でき、衝突周波数 ν は次式で表わすことができる。

$$\nu = \frac{\lambda}{\pi} \frac{n_c}{n} \sqrt{1 - \frac{n}{n_c}} \omega \alpha \quad (10)$$

従ってマイクロ波の減衰量から α を得れば衝突周波数が求められる。

一方、完全電離プラズマでは、衝突周波数 ν は、電子温度 T_e と電子密度 n を用いて次式³⁾ のように表されるので、得られた n と ν から逆に T_e を推定することもできる。

2 mm マイクロ波干渉計によるBSGプラズマの測定 (BSG-4)

$$\nu \simeq \nu_{ci} = 3.64 n T_e^{-3/2} \ln \left(1.25 \times 10^4 \frac{T_e^{3/2}}{n^{1/2}} \right) \quad (11)$$

§ 3 実験装置

(i) 立体回路

Fig. 3.

位相差 $\Delta\phi$ を測定するためのマイクロ波干渉計のブロックダイアグラムを第3図に示す。プラズマ発生装置の外部磁界とマイクロ波の電界方向とを平行にすることによって、マイクロ波の伝搬に対する磁場の影響を逃れた。また、回路損失を少なくするため、オーバーサイズの導波管(10 G/s 用)、テフロン誘電体レンズなどを用いた。フィリップスの資料によれば、オーバーサイズ導波管の効果は第1表の通りである。われわれのプラズマの径は少なくとも5 cm以上あることが探針測定からわかっているので、第4図に示すような簡単な形状の誘電体レンズを試作して、マイクロ波ビームの発散を少なくするとともに、ビームを平行にして、プラズマスラブに対する平面波入射の近似

が使えるようにした。レンズの設計には次式を用い，屈折率 n はテフロンに対し 1.4 とおいた。

$$\text{焦点距離 } L = \frac{A}{n-1} \frac{n \cos \theta - 1}{\sin \theta} \quad (12)$$

$$\text{レンズの厚さ } t = \frac{A}{n-1} \tan \frac{\theta}{2} \quad (13)$$

Fig. 4

マイクロ波 周波数 (G c/s)	導波管損失 (db/m)		角型導波管		10 Gc 導波管	
			理論値	実測値	理論値	実測値
70			1.75	3.5 ~ 5.3	0.155	0.4
140			5.50	11.1	0.227	0.6

第1表 オーバーサイズ導波管と標準導波管の

単位長さあたりの損失量

2 mmマイクロ波干渉計によるBSGプラズマの測定(BSG-4)

マイクロ波ソースは、フィリップス社製、DX-247 反射型クライストロンを用いた。最大出力は55 mWである。クリスタルからの出力は直接シンクロスコープで観測した。

(ii) プラズマ発生装置

実験に供したBSGI型装置のブロックダイアグラムを第5図に示す。予め 10^{-7} Torr 程度に排気された真空容器(直径12 cm, 長さ約3 mのガラス管)内に、パフにより約0.5 atm-cmのヘリウムガスを導入し、Bコイルによる θ ピンチにより 10^{22} m^{-3} , 十数万度のプラズマをB部に発生させる。このプラズマが、弱い定常磁場S部に膨張し、Kコイルによるミラー磁場によって止められ熱化する。Bコイルの電流はプラズマのはじめてピンチする第3半周波でクローバーさ

Fig. 5

れ全体としてはミラー磁場の容器となる。この時の磁場の強さはS部で 0.1 Wb/m , ミラー比10である。マイクロ波干渉計による測定の対象はこのS部におけるプラズマの電子密度の時間変化である。

§4 実験結果

S6ポートでの電子密度の時間変化を、ミラー磁場のあるときとないときについて測定した。干渉計の代表的な出力波形を第6図aおよびbに示す。このフリンジシフトの数と、探針測定で得られた密度分布とを用いて電子密度の時間変化を求めると第7図のようになる。ミラー磁場があると

2mm Microwave Interferometer Responses to an
expanding Plasma of BSG I Device (1mV/div.)
(A): with Mirror 10k Γ /1k Γ (B): without Mirror /1k Γ

Fig. 6

Fig. 7

き、 $250\mu\text{s}$ あたりで密度が急激に上昇しているのは、ミラー磁場によって生じた衝撃波のフロントの通過に伴い、プラズマの流れがランダム化されて密度が不連続的に上昇しているためである。このことは他の探針測定や、ループによるデリアマグネティックシグナルの測定によっても確かめられている。密度の立上り部分の時間変化は急激すぎて測定にかゝらなかった。しかし、その後の約 $50\mu\text{s}$ にわたって、干渉計の出力波形はほとんど零になっていること、また、その後の減衰部分の電子密度からも、この部分はカットオフになっていると考えられる。このことを確かめるために、マイクロ波の透過の信号を、探針電流をモニターにして干渉計の出力と比較した。この結果は第8図に示すように、カットオフの終る点ではっきりした折れまがりとなって現れ、カットオフであることが確認された。

次に、この透過の信号の減衰量、また干渉計出力信号の減衰量から、衝突周波数を求めてみた。さらに、この実験条件では、電子と中性分子との衝突周波数 ν_{en} は、たとえヘリウムのバックグラウンドが 10^{-3} Torr あったとしても $\nu_{en} \simeq 2.4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ であることを考え、電子-イオンの衝突が支配的であるとすれば、第(11)式を用いて電子温度 T_e を算出することもできる。

Transient Plasma Event
 (A) Interferometer Response : 1mV/div.
 (B) Transmission Signal : 1mV/div.
 (C) Double Probe Current : 50mA/div.
 Sweep : 50 μs /div.

Fig. 8

Fig. 9

この結果は第9図に示す通りで、探針特性から得られた電子温度より1桁近く低い。このことは、中心で密度が高く、周辺で下るような密度分布を持ったプラズマは、マイクロ波の透過に対して凹レンズ的な作用を及ぼすにもかかわらず、マイクロ波透過の減衰量から単純に1次元的な減衰係数 α を求めたことや、プラズマの境界での散乱などを一切無視したことにより、みかけ上減衰量が実際より大きく見積られたためであると考えられる。

第7図から電子密度の減衰の時定数は $\approx 700 \mu\text{s}$ で、ミラー磁場のあるなしによらないことがわかる。これは、ミラー磁場によって、プラズマの初期保持量は増すが、その後は管壁への拡散と再結合による損失が支配的であることを示している。

§ 5 結 言

以上述べた2, 3の測定例から明かなように、2 mmマイクロ波干渉計が、BSG装置S部における電子密度の測定に非常に有用であることが示された。残された問題は、密度の立上り部分や、ショックフロントの通過に伴う密度の急激な時間変化などを正確に求めること、マイクロ波の減衰量に対するより精度の高い解析などである。カットオフ領域でのプラズマのふるまいを含めて、これらの問題を解決するためには、マイクロ波反射法、探針法、光学的方法などによる多角的な測定が必要である。これらの結果については、他の機会に更めて発表する。

参 考 文 献

- 1) T. Uchida, S. Hamada, K. Miyamoto, J. Fujita, N. Inoue, S. Kawasaki and S. Katsumata: Nuclear Fusion 5 (1965) 63.
- 2) M. A. Heald and C. B. Wharton: Plasma Diagnostics with Microwaves (John Wiley and Sons, Inc., New York 1965).
- 3) L. Spitzer, Jr.: Physics of Fully Ionized Gases (Interscience Publishers, New York, 1962).

Figure Captions

Fig. 1 Plane electromagnetic wave incident on plasma slab.

Fig. 2 Central plasma density versus corresponding normalized microwave phase coefficient.

- 1) Rectangular distribution.
- 2) Regular trapezoidal distribution
- 3) Cosine distribution.
- 4) Triangular distribution.
- 5) Cosine-squared distribution.

λ : the wave length

d : the path length

N : the number of fringes

n_c : the critical cutoff density

n_0 : the center density

Fig. 3 Block diagram of the 2 mm microwave transmission interferometer.

Fig. 4 Geometry of dielectric lens.

Fig. 5 Schematic drawing of BSG I experimental device.

Fig. 6 Interferometer responses to an expanding plasma of BSG I device. (1 mV/div.)

(A):with mirror field of $10k \Gamma / 1k \Gamma$, (B):without mirror field.

Fig. 7 Electron density decay with time at port S-6 of BSG I device.

Fig. 8 Interferometer and transmission signals showing cut-off of microwave beam with plasma.

藤田・岡本・宮本・川崎・井上・鈴木・アダチ・内田

- (A) Interferometer response: 1mV/div.
- (B) Transmission signal : 1mV/div.
- (C) Double probe current : 50mA/div. Sweep: $50\mu\text{s/div.}$

Fig. 9 Collision frequency and electron temperature obtained from the attenuation of microwave signal.