赤外 $He-Ne$ レーザー干渉計による θ ピンチ
プラズマの密度測定 (B. S. G. - 1) *

宮本 健郎, 藤田 順治, 川崎 温, 井上 信幸,
勝又 三郎, 内田 岱二郎 (名古屋大学プラズマ研究所)

(1965年4月19日受理)

Abstract

Two wavelength He - Ne gas laser interferometer is used to measure the plasma density produced by θ pinch. The laser beam passes through the plasma in the direction perpendicular to the magnetic field. The product of the plasma density n and the thickness d is estimated to be $n \cdot d = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ in a case of our θ pinch plasma experiment.

* Density Measurement of Pinch Plasma Using Infrared He - Ne Laser Interferometer (B. S. G. - 1)

** Kenro Miyamoto, Junji Fujita, Sunao Kawasaki, Nobuyuki Inoue, Saburo Katsumata, Taijiro Uchida.

*** Institute of Plasma Physics, Nagoya University.

赤外He-Ne レーザー 干渉計による θ ピンチプラズマの密度測定(B. S. G. -1)

1. 緒 言

最近レーザーのプラズマ計測における重要性が次第に広く認められてきた。特にマイクロ波による測定が不可能な高密度プラズマの密度測定にガスレーザー干渉計が用いられている。^{1), 2), 3)} Ashby 及び Jephcott¹⁾ は $0.63\ \mu$ 及び $3.39\ \mu$ の二波長 He-Ne ガスレーザー干渉計によって可視光感度の光電子倍增管を用いて、赤外光によってプラズマ密度を測定した。レーザー装置から出たレーザー光がプラズマ中を往復するように外部平面反射鏡を置き、レーザー装置の semiconfocal resonator 中の平面鏡とでプラズマの中にはさんだ Fabry-Perot 干渉計を形成し、プラズマの密度変化に応じて Fabry-perot の反射率が変化するのを検出する(第1図参照)。この報文においては、 $0.63\ \mu$ 及び $3.39\ \mu$ の二波長 He-Ne ガスレーザー干渉計を用いて θ ピンチプラズマの密度を磁場に対して直角方向から測定を試みた。

Fig. 1

2. He-Ne レーザー干渉計

レーザー装置は熔融石英に多重干渉膜をつけた semiconfocal resonator (ミラー間隔 1 M) を有する He-Ne レーザーで $3.39\ \mu$ 及び $0.63\ \mu$ を同時発振する。ミラーの反射率は $0.63\ \mu$ で 99.5% , $3.39\ \mu$ で $6\% \pm 1\%$ で出力は各々 5 watt , 0.5 watt の程度で光子の数で比較すれば大体同じオーダーと見做せる。励起は直流放電による(日本電気製)。

Ge フィルターを置いて 3.39μ の光を熔融石英窓をとおして、プラズマ中を通過させ、Al 蒸着の平面鏡を置き、光軸上にそって可動とする。検出器は 0.63μ の光のみを通過させるフィルターを着けた RCA 7102 のフォトマルで cascade follower を通して、シンクロスコープに出力波形を画かせる。

さて、プラズマの、周波数 ω の光に対する屈折率 N は、電子密度を n として

$$N = \left[1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\omega_p^2 = 4\pi n e^2 / m$$

(ω_p はプラズマ周波数、 $e \cdot m$ は電子の電荷及び質量) となり、したがって Fabry-Perot のミラー間の光路長の変化 ΔNd は $\omega_p / \omega \ll 1$ として

$$\Delta Nd = \frac{\omega_p^2}{2\omega^2} = 4.45 \times 10^{-14} \lambda^2 \Delta n d \quad (2)$$

を得る(単位は c.g.s.)。但し d はプラズマの厚さであり、 λ は波長を表わす。外部ミラーに平面鏡をおいた場合、光路長変化 ΔNd とレーザー干渉計の出力のフリンジ数 j との間には $\Delta Nd = \lambda j / 2$ が成り立つ。^{*}この関係はミラーをマイクロネジで移動させ、その移動量とフリンジ数とから確められた。又光路長変化と光電子倍增管の出力波形は第 2 図に示される(正弦波形からずれている)。したがって(2)式より

$$\Delta n d = \frac{1}{\lambda(\mu)} \times 10^{16} j \quad (cm^{-2}) \quad (3)$$

* Gerardo 及び Verdeyen²⁾ は 1.15μ の He-Ne ガスレーザー干渉計において外部ミラーに凹面鏡を用いて Semiconfocal Fabry-Perot を形成して $\Delta Nd = (\lambda/4)$ ($j/2$) の関係が成立することを観測している。しかし我々の 3.39μ 及び 0.63μ の He-Ne ガスレーザー装置においては $\Delta Nd = (\lambda/2)(j/2)$ の関係が成立している。これは、 3.39μ の光の利得が大きいために(ミラーの反射率 6%) ブリュースター窓の影響が無視出来、Laguerre-gaussian モードが出来ているものと思われる。この場合の共鳴条件は⁴⁾

$$2 \frac{\Delta Nd}{\lambda} = \Delta q + \frac{1}{2} \Delta p + \frac{1}{4} \Delta \ell \quad (\Delta q, \Delta p, \Delta \ell \text{ は整数})$$

となり、 Δp による変化を観測していたことになる。しかし出力波形はミラーの設置状態、放電管の状態等の変動の影響を受けやすく、再現性に問題がある。

赤外He-Neレーザー干渉計による θ ピンチプラズマの密度測定(B.S.G.-1)
 が求められる。但し波長 λ はミクロンで表わす。 $\lambda = 3.39 \mu$ の場合 $\Delta n d = 3.3 \times 10^{16} j$ で
 あるので 10^{16} ケ/ccのプラズマが3.3cmの厚さあれば1フリンジ検出出来る。

Fig. 2

3. プラズマ密度の測定

B.S.G-I 装置⁵⁾の θ ピンチプラズマの密度測定を行なった。装置のダイアグラムは第3図に
 示される。パフよりHeガスを真空中に入れ(又は最初からHeガスを充填することも出来る),

Fig. 3

直径 2.1 cm , 長さ 64 cm , 12 ターンの θ ピンチコイルにコンデンサー放電を行い, プラズマを生成する。放電管の内径は約 1.2 cm である。

最初 He ガスを約 10^{-2} mmHg 充填し, 容量 $1\text{ }\mu\text{F}$ のコンデンサーを 32 KV に充電して, クローバーなしに放電 (放電電圧の周期 $19\text{ }\mu\text{sec}$) したとき出来たプラズマの密度測定を行った。第4図にフォトマルの出力波形を示す。これらのことから放電電圧の第4半周期始めからプラズマが出来始め, それから4半周期間 $n \times d \sim 3.3 \times 10^{16}\text{ cm}^{-2}$ (1フリンジに相当) のプラズマが続き, 放電電流の減衰と共に密度がおちることが判る。

Fig. 4

次にパフにより He ガスを真空中に打ち込み (気圧は 10^{-2} mmHg のオーダー), 容量 $8\text{ }\mu\text{F}$, 充電電圧 30 KV のコンデンサーをクローバーなしに放電 (放電電圧の周期 $54\text{ }\mu\text{sec}$) したときのプラズマの密度測定を行った。第5図に示される如く, 第3半周期に preionize し, 第4半周期始めにピンチし, $n \times d \sim 1.6 \times 10^{16}\text{ cm}^{-2}$ (半フリンジに相当) まで増えてやがて減り始める。第5半周期のピンチにおいては最大 $n \times d \sim 6.6 \times 10^{16}\text{ cm}^{-2}$ (2フリンジに相当) になっていることが判る。

赤外 He-Ne レーザ干渉計による θ ピンチプラズマの密度測定 (B.S.G.-1)

Fig. 5

Fig. 6 (a)

Fig. 6 (b)

最後に容量 $40\ \mu\text{F}$ のコンデンサー, $25\ \text{KV}$ の充電電圧で θ ピンチさせ第 6 半周期にクローパーしたときのプラズマの振舞を第 6 図(a)に示す。もし光路長の変化に対する出力波形が $1/30$ フリンジ/ msec のおそい場合(第 2 図)と θ ピンチプラズマの観測波形のように変化の速い場合と同じであることを仮定するならば*それからプラズマの $n \times d$ の時間的变化を書くことが出来る。それを第 6 図(b)に示す。

結 語

$0.63\ \mu$ 及び $3.39\ \mu$ の He-Ne ガスレーザー干渉計によって磁場に垂直方向に θ ピンチプラズマの密度測定を試みたが, 調整もあまり困難ではなく, 再現性もよくプラズマ高密度の有力な測定手段であることを確認した。最後に我々の目的にかなうレーザー装置の製作に努力された日本電気の小林春洋氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) D.E.T.F. Ashby and D.F. Jephcott
Appl. Phys. Lett. 3 13 (1963)
- 2) J.B. Gerardo and J. T. Verdeyen
Appl. Phys. Lett. 3 121 (1963)
- 3) R.F. Gribble J.P. Craig and A.A. Dougal
Appl. Phys. Lett. 5 60 (1964)
- 4) G.D. Boyd and H. Kogelnik
Bell Sys. Tech. Jour. 41 1347 (1962)
- 5) T. Uchida, S. Hamada, K. Miyamoto, J. Fujita, N. Inoue
S. Kawasaki and S. Katsumata
Nuclear Fusion 5 No.1 (1965) (in press)

* 文献 1) によれば, $1\ \text{Mc}$ まで応答することが報告されている。

Figure Caption

- Fig. 1. Arrangement of He-Ne laser interferometer
- Fig. 2. Signal of the photomultiplier when the external mirror of the laser interferometer is moved. One fringe corresponds to the movement of $(3.39/2) \mu$. (0.1 volt./div., 20 msec/div.)
- Fig. 3. Arrangement of B.S.G. experimental devices
- Fig. 4. a) Signal of condenser discharge voltage for θ pinch coil (condenser capacity $1 \mu\text{F}$, charged voltage 32kv) Time sweep is 20 μsec per division.
b) Output of the laser interferometer (0.2 volt/div.) 20 $\mu\text{sec}/\text{div.}$)
- Fig. 5. The upper trace is the signal of the laser interferometer when the condenser with $8 \mu\text{F}$ charged up to 30kv is discharged for θ pinch plasma production (0.2 volt./div. 50 $\mu\text{sec}/\text{div.}$). The lower one is the signal of the discharge voltage (50 $\mu\text{sec}/\text{div.}$)
- Fig. 6. a) The upper trace is the signal of the laser interferometer when to condenser with $40 \mu\text{F}$ charged up to 25 kv is discharged and is crowbarred at 6th half cycle (0.1 volt./div. 50 μsec). The lower one is the signal of the discharge voltage with same time sweep to the upper one.
6) The upper one is the product of the plasma density and the thickness calculated from the Fig. 6-a) and the lower one shows the variation of the external magnetic field for θ pinch plasma production.