「レーザー干渉測定の問題点と

微小フリンジシフト検出の改良」*

武田 進, 船橋昭昌, 安田明生**

(名大工)

ABSTRACT

Some problems in laser interferometric measurements are discussed. Improvements are described of the technique, for detecting the small fringe shift, which was proposed by one of authors.

A measurement is performed of the electron density in a decaying plasma by using an interferometer of a Ne-He laser, which works at the visible light of 0.63μ . The plasma is produced in a 20 cm tube by a high-current pulsed discharge. The fringe shift due to the decay of electron density is observed with two photomultipliers, which are located at positions about 6 m away from the discharge tube. The two signals from the photomultipliers, are differentially amplified to eliminate the effect of lights from the discharge tube and gap switch. The minimum electron density detected in the present report is $9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ for the plasma length of 20 cm. The value corresponds to about a $\frac{1}{200}$ fringe. The decay curve of the electron density determined by the laser interferometer used here reasonably connects with that measured by the 70-GHz microwave transmission method. This fact shows that the present method detecting the small fringe shift has a sufficient reliability.

* Problems in Laser Interferometric Measurements and Improvements in Detection of Small Fringe Shift.

** S. Takeda, A. Funahashi, and A. Yasuda
(Department of Electrical Engineering,
Nagoya University, Nagoya)

「レーザー干渉測定の問題点と微少フリンジシフト検出の改良」

1. 緒言

この報告に於いては、先ず現在実用化されている種々のレーザー干渉計によるプラズマ測定の問題点を概略し、次いで我々が先に提案した光学干渉計による微少フリンジシフトの検出方法を、Ne-He レーザーを光源とした場合に適用し、幾分の改良を行なった結果について報告する。この実験では、プラズマ及びスイッチからの光の影響を除去し、測定系の機械的振動の影響を消去し、常にフリンジの最大感度のところで観測された再現性の良い、フリンジシフトに対応するシンクロスコープのトレースを得ることが出来た。その結果、 $1/200$ の微少フリンジシフトを検出し、 20 cm の長さに対して $9 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ の密度まで測定できた。また別に 70 GHz 帯のマイクロ波透過法を用いて $6.5 \times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$ から $5 \times 10^{12}\text{ cm}^{-3}$ なる範囲の電子密度を測定し、レーザー干渉計によって測定された密度の下降となめらかに接続することを確めた。

2. 問題点

プラズマの電磁波に対する屈折率を測定することから、その電子密度 n_e を決定する方法は n_e が高くなるにつれて、使用周波数の上昇を必要とする。現在商品化されている波長 2 mm のマイクロ波を用いても磁界の影響がない限り $2.4 \times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ で cut off となる。それ以上の密度に対しては、反射波の位相角を測定する方法があるが、プラズマ内部の n_e を知るためには導波管をプローブとして挿入する必要がある。もし高温プラズマ中でこれを使用することを望まず、あくまで透過波を用いようとするならば、更に周波数を上げて遠赤外、赤外もしくは可視光線を用いなければならない。

1958 年 Alpher と White¹⁾ は水銀灯光源より発する可視光線を利用して、Mach-Zehnder 干渉計により初めて、衝撃波で出来るプラズマに於ける 10^{17} cm^{-3} 程度の n_e を測定した。一方イタリアの Ascoli と Rasetti²⁾ は定常高周波放電中のプラズマに対して、Jamin 干渉計により、プラズマの厚さ 1 cm 当り、 $2.4 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ の n_e を測定している。その後多くの人達により光による干渉測定が行なわれて来たが、その中でも 1963 年に Brown ら³⁾ が水銀灯光源より発する $300\text{ }\mu$ の遠赤外線で定常グロー放電中に於いて 1 cm 当り $4 \times 10^{13} \sim 3 \times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ なる n_e の検出に成功しており、特にこの n_e の測定値はマイクロ波空洞共振器法、Langmuir プローブ、及び測定された移動度から決定された n_e の各々の値と比較して良い一致をみたのは注目値する。

最近は可視光、赤外及び遠赤外領域で coherent な光源であるレーザーが発明されて干渉計

の調節は著しく簡単になり、その強度も強いので S/N 比を改善することができるので、広く用いられるようになった。これについては Ashby ら⁴⁾ の報告以来多くの論文が報告されており、特にこのレーザー干渉計を使って、分光学的な方法でも、マイクロ波透過法でも検出が困難である $10^{14} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の範囲の密度を測定しようと数多くの努力がなされている。レーザー干渉計を使って低密度を測定するのに二つの方向があり、第一は遠赤外線を利用する Brown ら³⁾ の思想を受けつぐもので、第二はレーザー光源の波長を長くせずに可視領域のレーザーを用いて、フリンジの微少シフトを検出して、測定可能密度をなるべく下げようとするものである。この微少フリンジシフトの検出についてはいくつかの提案^{5,6)} がある。可視光線を用いると、赤外、遠赤外線の場合と較べて肉眼でフリンジの様子を観察しながら、容易に測定系を調節でき、また写真撮影により、二次元の分布を直視できるという著しい長所がある。

一方通常の光源からの可視光線を用いて、中性ガスの屈折率を求めてガス分析することは古くから実用化されており⁷⁾ 最小検出感度は $1/1000$ フリンジにも達している。一方プラズマに対する測定に於いては、プラズマ装置及び、測定系を rigid にして機械的動揺を少なくすることが困難なこと、多くの高密度プラズマは定常でないこと、レーザーの出力にも振動が重なっていること、及びプラズマからの光が強いこと等によって、最少検出感度は普通の方法では中性ガスの分析の場合と較べてかなり悪い。特にレーザー光源を用いると、その固有周波数の出力振動が新しい問題として登場し、レーザー自身の安定度の改良も必要となってくる。

3. 微少フリンジシフト検出の改良

測定されたフリンジシフトから密度の値を決定するのに際して、必然的に伴う装置及び測定系の動揺のため、フリンジの最大感度のところで必ずしも測定を行うことができず、このため低密度の値を決定する時に著しく不利になってしまう。この欠点を改良してフリンジの最大感度のところでプラズマを作り、フリンジのシフトを観測する方法を先に我々は提案した⁸⁾。しかしその時は光源の光に対してプラズマからの光がかなり強く、たとえかなり半値巾の狭いフィルターを使用しても充分信号の S/N 比を上げることができず、プラズマから放出される光の寄与を単に差し引いて密度を求めたため精度は充分でなかった。その時は 5463 Å の水銀灯を光源とし 20 cm の長さのプラズマに対し、 $10^{16} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ の間を変化する密度を測定し、8 mm のマイクロ波の反射及び透過の測定結果と比較してほぼ合理的であることを示した。

今回の実験に用いた装置の概略は、光源として水銀灯の代りに Ne-He レーザーを使用した点

「レーザー干渉測定の問題点と微少フリンジソフト検出の改良」

を除けば殆んど前に報告したものと同じであるが、今回は検出器の光電子倍增管を2個使用し、これらをプラズマ発生部からかなり遠ざけた上で、これらの光電子倍增管の出力を差動させた。この様な操作によってプラズマ及び火花スイッチからの光の影響を事実上無視できる程小さくすることができた。実験装置の概略を第1図に示す。測定に用いたNe-Heレーザーは市販のNEC製LD-685である。又レーザー光のビームの直径は約5mm程度である。Mach-Zehnder干渉計の一方の光路に放電管(内径約2.0cm,長さ20.0cm)を入れてフリンジを作り、これを干渉フィルター(中心波長 0.63μ ,半値巾35Å,透過率55%)に通した後、ハーフミラーで二つに分け、二つの光電子倍增管PM1,及びPM2で観測する。なおPM1,PM2の前面には、フリンジに平行な巾約1mmのスリットSがとりつけられており、この細いスリットを経て光はそれぞれの受光面に入る。またプラズマ等からの光を軽減する意味で、PM1,PM2はプラズマ発生部から約6m遠ざけて置いてある。ついで干渉計を軽くたたくことによって故意にフリンジを移動させ、これに対するPM1,及びPM2の出力を同時にシンクロスコープで観測する。両者の出力波形の振幅が等しくなるように、シンクロスコープの利得もしくはそれぞれの電源電圧を調節し、次に両者の出力が丁度逆位相になるように一方の光電子倍增管の位置を細かに調節する。この様にしておいてから放電管中にプラズマを作り、PM1,及びPM2の出力を差動させればレーザー光以外のプラズマ等からの光を打消すことができる。また一方第1図に示す様に、PM1の一方の出力は2個の乾電池及び直流増巾器を経てパルス発振器の入力に接続されている。このパルス発振器の出力には入力信号の大きさがあらかじめ設定されたレベルになった時1個のパルスが出る様になっている。直流増巾器は、PM1からの信号すなわちパルス発振器の入力を適当な大きさに増巾し、パルス発振器を正常に動作させるために用いる。なお乾電池 B_1 はPM1の信号に含まれる直流分のため直流増巾器が飽和することがない様に、この直流分を打消すためのバイアスである。また B_2 はパルス発振器の入力信号に適当な直流分を与えるもので、これを変化させることによって、PM1の信号の振幅の丁度半分のところでパルス発振器から一個のパルスを得る様に調節できる。この出力パルスでシンクロスコープを掃引すると同時にプラズマを作れば、常にフリンジの最大感度の点で密度を測定することができる。

また第1図に示す様に、別に70GHz帯(波長4mm)のマイクロ波を放電管の横からホーンアンテナを経て入射させ、透過法により密度の値を決定した。

実験は $6.3\mu\text{F}$ のコンデンサー放電によって作られたプラズマに対して行なった。第2図は光電子倍增管によって観測されたフリンジの自由な動揺の様子で、上のトレースはPM1の出力波形で

第1図 実験装置の概略

第2図 フリンジの動揺の様子，sweep:2ms/div

上のトレースは光電子倍增管PM1からの信号，
下のトレースは上のトレースに光電子倍增管PM2の
出力信号を逆位相にして互いに差動させたもの。

ある。それにもう一本の光電子倍增管PM2の出力を逆位相にして互いに差動させたものが下のトレースである。この図から分る様に光電子倍增管を二本使用することによってレーザーの雑音を減らすことが出来たので，S/N比の改良が得られた。第3図(a)，(b)の2つの波形は以上述べた手続により観測されたプラズマの密度変化に基づくフリンジシフトの波形である。実験条件はHe，圧力2.5 Torr，コンデンサーの充電電圧5 kVである。プラズマの再現性を示す意味で二つの観測波形を掲げた。この第3図(a)(b)から，常にフリンジの最大感度のところで観測されていることが分る。この第3図に於て検出可能な最小フリンジシフトは約1/200である。一方第4図の二つの波形はこの様な操作をしないで，フリンジの勝手な位相の点で観測したものである。第5図はレーザー光が存在しない時のプラズマ等からの光を二本の光電子倍增管を差動させた状態で，第3，4図と同じ利得で観測したもので，この様に極めて少なく，フリンジシフトの検出には殆んど支障のないことが分る。第3図(a)の観測結果及び，良く知られているフリンジシフトZと電子密度 n_e の関係式

$$n_e \text{ (cm}^{-3}\text{)} = 2.24 \times 10^{13} \frac{Z}{\lambda \text{ (cm)} L \text{ (cm)}}$$

(a)

(b)

第3図 (a) (b) 観測されたフリンジ波形, sweep: $20 \mu\text{s}/\text{div}$

我々の提案した方法により最大感度のところで観測されている。

「レーザ干渉測定の問題点と微小フリンジシフト検出の改良」

(a)

(b)

第4図 (a) (b) 観測されたフリンジ波形, sweep: $20 \mu\text{s}/\text{div}$ 。

我々の提案した方法によらないもの。

第5図 レーザー光を切ってプラズマ等からの光による二本の
光電子倍增管PM1及びPM2の出力を差動させて観測
した波形，sweep：20 μ s/div。

(ここで λ (cm) はレーザー光の波長， L (cm) は放電管の長さである。) を使って， n_e の値を算出した*ものが第6図の○印である。但しここで，密度の立上りの部分は除き，プラズマが充分安定であると思われる下降の部分のみを示した。ここで最小密度 $9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ は $1/200$ のフリンジシフトに対応している。また一方第6図の●印で示した n_e の下降曲線は，70 GHz帯のマイクロ波透過法から求めたものである。この様にレーザー干渉法からの測定値が，マイクロ波透過法からの測定値となめらかにつながることは，現在の方法を用いて検出された $1/200$ の微小フリンジシフトが，かなりの精度を持っていることを示している。

4. 結 言

第2節の問題点でも述べたように可視光領域におけるレーザー干渉計は，赤外及び遠赤外レーザーのそれに較べて明確な利点があるので，可視光レーザーで微小フリンジシフトを検出して，低密

* この実験条件では，中性粒子数及び励起原子数の変化による影響は無視できた。

第6図 電子密度の下降

度を測定することは意味がある。従来の方法による最少検出フリンジシフトは $1/10$ フリンジと言われており、これは炭酸ガスレーザー（波長 10.6μ ）を用いた場合 1 cm 当り $2.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ の密度に相当する。この密度の値は、波長 0.63μ の Ne-He レーザーに対しては $1/150$ のフリンジシフトに対応していることから、以上述べて来た我々の方法を使用すれば炭酸ガスレーザーに匹敵する低密度を、可視光の Ne-He レーザーを使っても検出できることが分る。また炭酸ガスレーザーにこの方法を適用すれば、その最少検出密度を 1 cm 当り 10^{14} cm^{-3} 程度まで下げることが可能となる。

参 考 文 献

- 1) R.A. Alpher and D.R. White, Phys. Fluids 1, 452 (1958).
- 2) U. Ascoli-Bartori and F. Rasetti,
Nuovo Cimento 13, 1296 (1959).
- 3) S.C. Brown, G. Bekefi, and R.E. Whitney,
J. Opt. Soc. Amer. 53, 448 (1963)
- 4) D.E.T.F. Ashby and D.F. Jephcott,
Appl. Phys. Letters 2, 13 (1963).
D.E.T.F. Ashby, D.F. Jephcott, A. Malein,
and F.A. Raynor, J. Appl. Phys. 36 29 (1965).
- 5) E.B. Hooper and G. Bekefi,
Appl. Phys. Letters. 7, 133 (1965).
- 6) J.B. Gerardo, J.T. Verdyen, and M.A. Gusinow,
J. Appl. Phys. 36 3526 (1965).
- 7) 辻 二郎, 難波 進, 応用物理 24 397 (1955).
- 8) 武田 進, 南 一男, 松岡良輔, 核融合研究 15 661 (1965).
S. Takeda and K. Minami, Japan. J. Appl. Phys. 5 696 (1966).