CO₂レーザーによるTP-Dプラズマの計測(Ⅱ)

(大阪大学工学部) 中 塚 正 大*
(大阪工業奨励館) 井 沢 靖 和**
(理 研) 豊 田 浩 一***
(大阪大学工学部) 横 山 昌 弘*
(") 山 中 千代衛*

(45年5月15日受理)

Abstract

By using 10.6 μm infrared CO₂ laser radiation, measurement of steady TP-D plasma has been carried out with interferometry and scattering method. Electron density of TP-D plasma was normalized by Rayleigh scattering of pure air as a measuring standard. Measured electron density by interferometry and scattering method as a function of discharge current shows fairly good agreement.

Diagnostics of TP-D Plasma by CO₂ Laser (Ⅱ)

Masahiro Nakatsuka*, Yasukazu Izawa**, Koichi Toyoda***,
Masahiro Yokoyama* and Chiyoe Yamanaka*

* Department of Electrical Engineering, Osaka University,
Osaka

** Industrial Research Institute, Osaka Prefecture, Osaka

*** The Institute of Physical and Chemical Research, Saitama

1 まえがき

CO₂ レーザーの 10.6 μm 赤外光を用いて、TP-D 定常プラズマを対象として、干渉、散乱法による密度、温度を測定する計画¹⁾で実験をおこなった。予備的な実験結果については既に報告したが、²⁻⁷⁾ 今回はその後得られた密度測定の結果について述べることにする。

2 CO₂ レーザーによる干渉計測

10.6 μm 帯の CO₂ レーザー光を光源として、マイケルソン型干渉計によって、定常プラズマ (TP-D I) の干渉測定を行なった。この干渉計測の目的は散乱計測とのクロスチェックにある。測定部は前回と同じく陽極から 3 cm のプラズマ部で、使用ガスは H_e であった。

定常プラズマと CO₂ レーザーの連続発振の組合せは、検知器が半導体光電導効果を用いた光量の変化分を検出するものであるために、種々の工夫を必要とする。実験に用いた方法は、(1)マイケルソン型干渉計の参照光路に回転型移相器を挿入し、フリンジ変化を強制的に行なわせ、プラズマの有無によりフリンジ位置の検出を行なうもの、⁷⁾ (2)レーザー出力にチョッパーをかけ、移相器を固定したまま同期検波方式を兼用し、フリンジシフトを読みとるものとの 2 つの方法を検討した。

第 1 の方法は前回と同様な装置で実験を行なったので省略し、ここでは第 2 の同期検波を用いた方法について説明する。第 1 図にその概略を示す。

第1図 Block diagram of CO₂ laser interferometry with PSD technique

CO₂レーザーによるTP-Dプラズマの計測 (III)

CO₂ レーザー光を2 KHzのチョッパーで断続し、ビームスプリッターB.S.2で2つに分け、一方をプラズマ中を通し、他方を参照光とした。Ge: Au 検知器よりの干渉信号をロックインアンプに導き、レコーダーで観測した。一方、CO₂ レーザー光の出力をビームスプリッターB.S.1でモニターし、干渉信号と同時にレコーダーで観測できるようにした。ロックインアンプの外部同期はチョッパーの回転を豆球とフォトダイオードで検出した信号を用いた。参照光路には両面の傾き約5分のNaCl板をウェッジとして挿入し、移相器として用いた。ウェッジを駆動速度、 $v = 6\text{mm/min}$ で動かすことにより、 $\Delta N = 2nv\theta/\lambda \approx 2.5 \text{ fringe/min}$ のフリンジシフトを得ることが出来、1フリンジの大きさも確認される。ここで n は屈折率、 v は駆動速度(mm/min) θ は傾き角、 λ は波長である。

第2図に模型的にロックインアンプの出力を示す。

第2図 Recording chart of interference output with lock-in amplifier

ウェッジを駆動し、1フリンジの大きさを確認した後、フリンジシフトの最も大きく出る位置にウェッジを固定する。その後にTP-Dの放電電流を切り、フリンジシフトを観測する。なお、干渉による受信光の変調度は、信号、参照両光路の光強度より決定され光学系による諸々の損失係数、反射係数などにより定められる一定値をとる。

この方法ではランダムなプラズマの振動及び機械的振動などを同期検波方式により除去することが可能であり、且つ入射レーザーパワーをモニターすることにより、パワー変動による見かけのフリンジ変化を較正できる。

測定はTP-Dプラズマの放電電流を種々変えて行かない、夫々放電電流 50A においてフリンジシフト, 0.015, 電子密度 $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 60A においてフリンジシフト, 0.023, 電子密度 $2.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 70.5 A においてフリンジシフト, 0.032, 電子密度 $3.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ の値を得ている。測定値の分散 σ は 50 A において 0.011, 70.5 A で 0.01 であった。

3 CO₂ レーザーによる散乱計測

以前の報告において、大電流領域で迷光レベルの 5% 程度の散乱光の検出が可能であることを示した。7) 今回は空気によるレーリー散乱を利用して、電子密度の測定を定量化したので報告する。測定装置は第 3 図に示すとおりである。

第3図 Block diagram of electron density measurement by laser light scattering

前回と同じく同期検波方式により、液体H_e 温度に冷却したGe_e:Cu 検知器により散乱光を検出しレコーダーでモニター信号と同時に観測した。散乱光測定における雑音の多くは、プラズマ容器などによるCO₂ レーザー光の散乱である。迷光レベルを低くするために、第3図に示すようなガラス

CO₂ レーザーによるTP-Dプラズマの計測(II)

製のホーンによる光トラップを設け、これにより迷光レベルは以前の約 $1/10$ にすることが可能となった。

トムソン散乱によって電子密度を決定するためには、入射光強度 I_0 および散乱強度 I_s の絶対測定が必要であるが、こゝでは測定系を較正するために、空気などレーリー散乱断面積の判明している気体のレーリー散乱光を規準として電子密度を求めることとした。

散乱光強度 I_s は

$$I_s = K I_0 n \sigma d\Omega dL$$

で与えられる。こゝで K は全光学系の損失係数、 n は散乱粒子密度、 σ は散乱断面積、 $d\Omega$ は散乱観測立体角、 dL は観測者から見た散乱体積でのレーザー光の進行方向の長さである。同一光学系を用いて、トムソン散乱とレーリー散乱を観測すると

$$n_e = \frac{(I_s/I_0)_T}{(I_s/I_0)_R} \cdot \frac{\sigma_{air}}{\sigma_e} \cdot \frac{dL_{air}}{dL_p} \cdot n_{air}$$

$$= 2.75 \times 10^{13} \left(\frac{I_{sT}}{I_{sR}} \right) \quad (\text{cm}^{-3})$$

より電子密度を求めることができる。こゝで T, R はトムソン散乱及びレーリー散乱を示す。但し、 $\frac{dL_{air}}{dL_p} = 25$ であり、立体角は同じとして計算した。計算に用いた数値は、電子のトムソン散乱断面積 $\sigma_e = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ 、1 気圧の空気の粒子密度 $n_{air} = 2.69 \times 10^{19} \frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3}$ である。 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ に対する空気のレーリー散乱断面積は、ルビーレーザー光 ($\lambda = 6943 \text{ \AA}$) に対して測定された値⁸⁾ を λ^{-4} 則によって計算して得られた $\sigma_{air} = 2.72 \times 10^{-32} \text{ cm}^2$ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) の値を用いた。

実験において純粋な空気を得るために、ダストフィルターおよびシリカゲルを通し、プラズマ容器に空気を導入した。実験室内空気による散乱光強度は、上記の処理を行なった純粋空気による散乱強度の約 3 倍であった。これはルビーレーザーでの散乱強度比約 20 倍⁹⁾ に比べてかなり小さい値である。これは実験室内空気の汚染程度の差と、塵埃や水蒸気粒子によるミー散乱断面積が $\lambda = 6943 \text{ \AA}$ に対し、 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ではかなり小さいと考えられることによるものと思われる。

TP-D プラズマの放電電流 70.5A と 83A において散乱測定により、夫々電子密度、 $2.9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、 $8.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ の値を得ている。

現在までに得られた平均電子密度の値を第 4 図に示す。

第 4 図 Measured electron density by interferometry and scattering method as a function of discharge current

干渉による測定と散乱による測定値は TP-D プラズマの放電電流の増大に対する電子密度の増加傾向に少しの違いがあるが、それぞれの値はかなりよい一致を示している。

4 まとめ

前回に引き続き CO_2 レーザーを用いて、同期検波方式を干渉、散乱計測に適用し、TP-D プラズマの電子密度の測定を行なった。散乱計測においては空気のレーリー散乱を利用して電子密度を測定することに成功した。得られた値はクロスチェックとして用いた干渉計測により得られた電子密度とより一致を示していることが確かめられた。

CO₂レーザーによるTP-Dプラズマの計測Ⅲ

今後の問題はCO₂レーザーの出力を安定化させ、11) 測定精度を上げると共に光ヘテロダイン法 10, 11) を用いて微弱な散乱光を検出し、散乱光スペクトル分布より温度測定を行う他、CO₂レーザー光による光相関 12) の測定などを考えている。

本研究はプラズマ研究所との共同研究として行なわれたもので、実験にあたり熱心に御協力頂いたプラズマ研究所、石井和重氏に厚く感謝します。

参 考 文 献

- (1) 横山・井沢・槽谷・中塚・TP-D like plasmas 研究会(1969年2月)
- (2) 中塚・豊田・井沢・横山・山中 物理学会分科会 11a-N-10(1969)
- (3) 横山・中塚・井沢・豊田・槽谷・田口・山中 電気関係学会, 関西支部連合大会
S4-6 (1969)
- (4) K. Nakatsuka, Y. Izawa, H. Kasuya and M. Yokoyama, Annual Review, Inst. Plasma Phys. P.60 (1969)
- (5) 中塚・井沢・豊田・田口・横山・山中 電気四学会連合大会 143 (1970)
- (6) 中塚・井沢・豊田・田口・横山・山中 日本物理学会 4PGE11 (1970)
- (7) 中塚・井沢・豊田・横山・山中 核融合研究 25, 37 (1970)
- (8) T.V. George, L. Goldstein, L. Slama and M. Yokoyama, Phys. Rev. 137. A369 (1965)
- (9) C. Yamanaka, M. Yokoyama, S. Nakai, T. Yamanaka and Y. Izawa, Tech. Rep. Osaka Univ. 16 233 (1965)
- (10) F. Goodwin and T. A. Nussmeier, IEEE QE-4, 612 (1968)
- (11) 三浦・古浜・福島 量子エレクトロニクス研究会 QE 69-61
(1970-02)
- (12) A. M. Gondhalekar (doctoral thesis, Victoria University of Manchester 1968)