



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ラングミューア・プローブによるプラズマの迅速測定
Author(s)	藤田, 文行; 中島, 健; 山崎, 初男
Citation	北海道大學工學部研究報告, 115, 81-88
Issue Date	1983-07-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41801
Type	departmental bulletin paper
File Information	115_81-88.pdf



ラングミューア・プローブによるプラズマの迅速測定

藤田 文行 中島 健* 山崎 初男

(昭和58年 3月31日受理)

Quick Measurement of Plasma by Langmuir Probe

Fumiyuki FUJITA, Ken NAKAJIMA and Hatsuo YAMAZAKI

(Received March 31, 1983)

Abstract

A quick measurement and data processing system has been developed for Langmuir probes. It is available for measurement of a plasma which contaminates the probe surface rapidly. This system consists of an ion bombardment circuit for cleaning the probe surface, a sweep circuit (a millisecond and longer), fast A/D converter with IC memory, and a personal computer.

The system was used for the measurement of electron temperature and density of a negative glow plasma, produced by abnormal glow discharge.

It was found, in this plasma, that the effect of probe contamination can be neglected within a few seconds after the stop of ion bombardment.

1. 序 論

プラズマ中に挿入した小さな電極（プローブ）とプラズマの間の電位差を変化させてプローブに流れる電流を測り、その電流－電圧特性（プローブ特性）から電子温度や電子密度などのプラズマ・パラメータを測定する方法をラングミューア・プローブ法という。この方法は I. Langmuir と Mott-Smith¹⁾ によって1924年に開発されて以来、プラズマの研究に大きな貢献をしてきた。空間分解能にすぐれ、製作・取扱いも簡便なので、現在でも幅広く利用されている。

この測定法を実際に用いてみると、いくつかの問題に気付く。まず第一に、プローブ付近のプラズマの電位や状態がプローブ特性を取る間一定でなければならないが、これらが往々変動する。第二に、プローブの表面状態がプローブ理論で仮定しているものと異なり、その状態自身も時間的に変動する。第三に、得られたプローブ特性を曲線に描き、測定値を得るまでの労力が大きい。

第一の問題に対する解決策の一つは、プローブ特性を短時間で取ってしまうことである。第二の問題に対しては、従来も行なわれていたことではあるが、電子またはイオン衝撃によりプローブ表面を清浄化することである²⁾。短時間に特性が取れるなら、清浄化直後汚染の進まないうちに片付けることができる。第三の問題に対しては、マイクロコンピュータの利用によるデータ処理で対処できる³⁾。ICの普及により電子回路の製作が容易になり、マイクロコンピュータの能力が向上した今日、上記の対策を実行することは現実的なコストで可能である。

我々は、上述の解決策に沿ったプローブ測定システムを開発した。すなわち、データ取得時以外はプローブを衝撃し続けて清浄化に努め、ミリ秒オーダーのプローブ電圧掃引により、短時間でデータを取得する。このとき、高速の A/D 変換器によってデジタル量としてプローブ特性を得て、メモリに収める。デジタル量として取得したプローブ特性は、あとでパーソナル・コンピュータで演算処理し、プラズマ・パラメータを算出する。

我々は、このシステムを負グロープラズマを対象にして試用した。負グロープラズマは、少数の高速電子群による電離でプラズマが維持されている。その電子温度は、陽光柱プラズマに較べてはるかに低温である。オイルフリーの真空装置を用いない限り、負グロープラズマによるプローブ汚染は、陽光柱プラズマに較べて非常に速い。このような悪い条件下でも、このシステムは有効に働き、多数のプラズマ・パラメータを能率良く得ることができた。

2. 測定原理

ラングミュア・プローブ法が適用できるプラズマの条件を以下に示す。

- (1) プラズマの寸法がプローブに較べて充分大きい。
- (2) 電子とイオンは各々 T_e , T_+ という温度を持つマックスウェル分布をしている。ただし、 $T_e \gg T_+$ である。
- (3) プローブの周囲に形成されるシースの内部では、電子と他の粒子との衝突がない。

数 Torr (数百 Pa) のガス圧のとき、荷電粒子の平均自由行程は 10^{-1} mm 程度である。一方、プローブを 10^{-2} mm より小さな寸法で製作するのは困難である。従って、1 Torr 程度のガス圧を持つプラズマが上記の条件を満たす上限である。

円筒形プローブに流れる電子電流は、軌道理論によると、電子に対する減速電場のとき

$$I_e = \frac{1}{4} e n_e A_p \langle v_e \rangle e^{\eta} \quad (1)$$

加速電場のとき ($V_p > V_s$)

$$I_e = \frac{1}{4} e n_e A_p \langle v_e \rangle \left[\frac{A_p}{a} \operatorname{erf}(\Phi^{\frac{1}{2}}) + e^{\eta} \left\{ 1 - \operatorname{erf}(\eta + \Phi)^{\frac{1}{2}} \right\} \right] \quad (2)$$

と導出されている⁴⁾。ここで、

$$\Phi = \frac{a^2}{l^2 - a^2} \eta$$

$$\eta = \frac{e(V_p - V_s)}{K T_e}$$

$$\langle v_e \rangle = \left(\frac{8 k T_e}{\pi m e} \right)^{\frac{1}{2}}$$

a : プローブ半径, e : 電子の電荷, m_e : 電子の質量, n_e : 電子密度,

l : プローブ中心からシースエッジまでの距離, A_p : プローブ表面積, T_e : 電子温度,

$\langle v_e \rangle$: 電子の平均の速さ, V_p : プローブ掃引電圧, V_s : プラズマの空間電位

である。

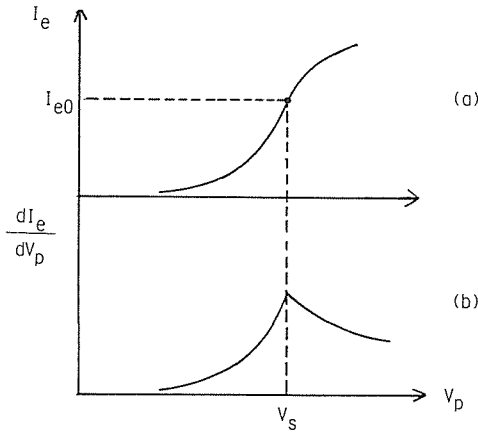


図1 プローブ特性曲線と微分特性

図1-aは、(1)、(2)式で与えられるプローブ特性の概略を示したものである。プラズマの空間電位 V_s のところが変曲点となる。図1-bはその微分特性を示す。これは、 $V_p = V_s$ のとき最大値を持ち、このとき $I_e = 1/4 en_e A_p \langle v_e \rangle = I_{e0}$ となる。

プローブに流れる電流 I_p は、電子電流 I_e およびイオン電流 I_+ の和であるから、データ処理をする場合、プローブ電流 I_p からイオン電流 I_+ を差し引く必要がある。

(1)式の両辺の対数をとって、 V_p で微分すると

$$T_e = \frac{e}{k} \left(\frac{d \ln I_e}{d V_p} \right)^{-1} \quad (3)$$

となる。従って、プローブ特性の V_p に対する片対数プロットを行ない、直線部の傾きから電子温度 T_e が求まる。

図1-bよりプローブ特性の微分曲線が最大となる $V_p (= V_s)$ を見出して、そのときの電子電流の値 I_{e0} と(3)式から、電子密度 n_e は

$$n_e = \frac{I_{e0}}{e A_p \left(\frac{k T_e}{2 \pi m_e} \right)^{1/2}} \quad (4)$$

となる。

3. 測定装置

図2は測定装置のブロック図である。測定時以外、プローブはイオン衝撃回路につながれていて、洗浄を受けている。切換スイッチで測定回路につながれたあと、遅延パルス発生器の遅延パルスにより測定が開始される。遅延時間の調節により測定開始時刻を任意に選べるようにした。これは、プローブ清浄化のために加えていた高電圧の影響がおさまるのを待つためと、衝撃停止後の汚染の進行状況を見るためである。スイッチを手動で測定部へ切り換えてから時間 T_d 後に出る遅延パルスが、ファンクション・ジェネレータを起動してランプ状電圧を発生させる。この電圧がプローブ掃引電圧となる。約2Vを1msecで立ち上げる。

プローブ電圧はボルテージ・フォロアで検出され高速A/D変換器付メモリ（波形記憶装置：エヌエフ Model WM-812）へ入力される。また、プローブに流れ込んだ電子電流は電圧に変換され、さらに差動増幅器でプローブ掃引電圧とDCオフセット電圧が取り除かれる。データは波形記憶装置に入力され、A/D変換後デジタル量として記憶される。その後、パーソナルコンピュータへ転送され、同時にグラフィックディスプレイに波形を描く。

使用したパーソナルコンピュータはSord M223 Mark IIである。プログラム言語には、BASICおよびアセンブラを採用した。図3に波形記憶装置へのデータ取り込み手順のタイムチャートを示す。図4は作製した測定回路と遅延パルス発生器である。

図5にデータ処理プログラムのフローチャートを示す。このプログラムは2章で述べた手順に

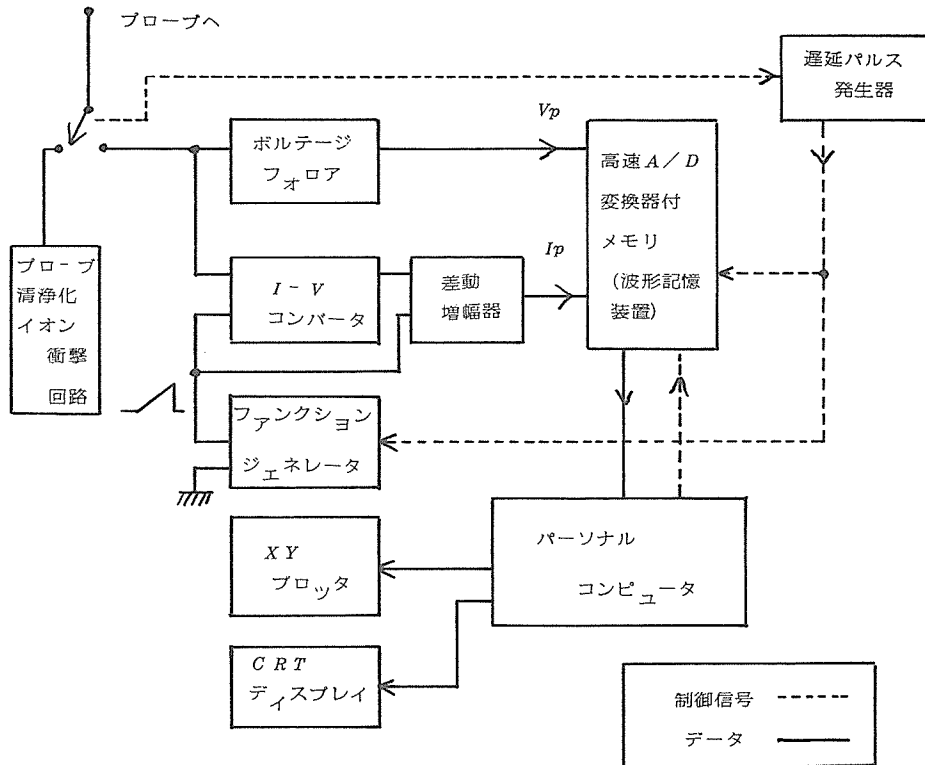


図2 測定装置のブロック図

従っている。ただし、単純移動平均によるデータの平滑化処理を含む。プローブ特性の変曲点を求める微分操作は、数値差分によった。プローブ特性の片対数プロットの傾きを最小自乗法で求め、電子温度を算出した。

このデータ処理は対話形式で行なわれる。これは、処理の各過程でのチェックに有効である。まず、プローブ表面積、アンプゲイン、平滑化の中、差分中をパーソナルコンピュータに入力して、特性曲線をXYプロッタに描かせる。次に、対数特性と差分曲線を描かせ、変曲点を探させた後、最小自乗区間を入力し、電子温度・密度を算出させる。

4. 測定結果および考察

4.1 放電管

図6に放電管(6 cm ϕ $\times$ 1 m)を示す。陰極はステンレスパイプを束ねた逆ブラシカソードである。He ガスを導入して放電させた。陰極から4 cm 離れた所にニッケル製リング状陽極があり、この陽極の後方に負グロープラズマが形成される。He ガス圧は0.2~0.5 Torr、放電電流は8~20 mAである。使用したプローブは、直径0.2mm、長さ4mmの白金円柱で、放電管の径方向に移動できる。

4.2 測定結果

図7-a は、XYプロッタに描かせたプローブ特性曲線の1例である。図7-b に片対数プロット1階差分のグラフを示す。

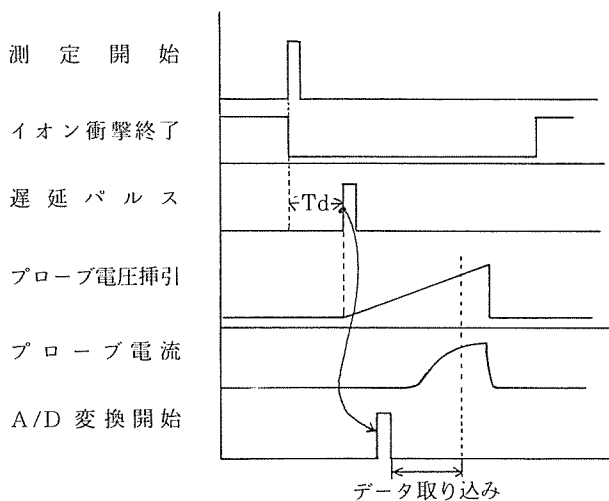


図3 データ取り込み手順のタイムチャート

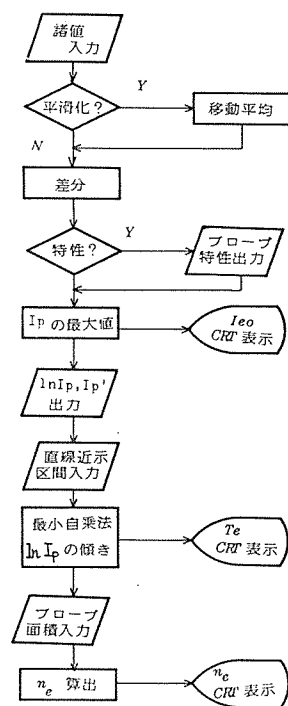


図5 データ処理プログラムのフローチャート

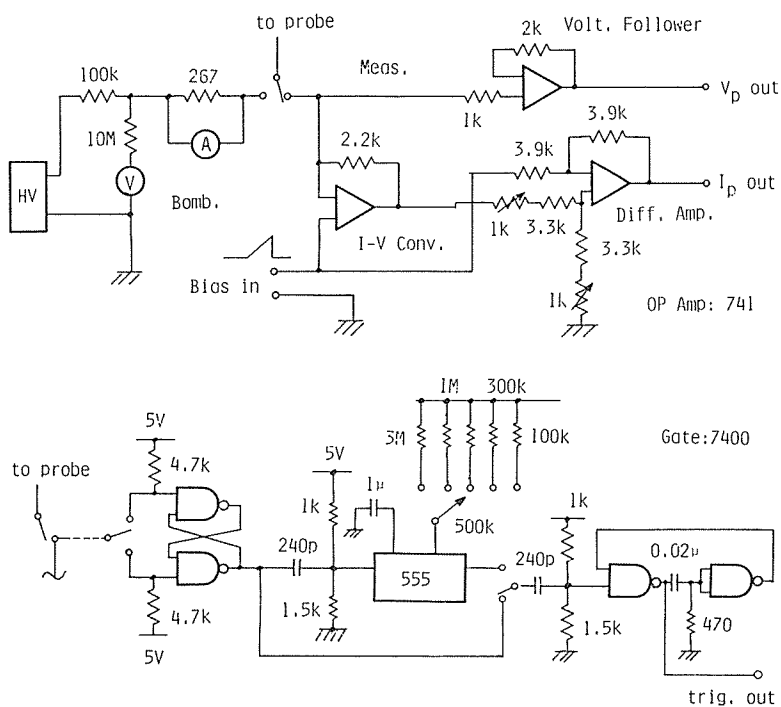


図4 測定回路と遅延パルス発生器

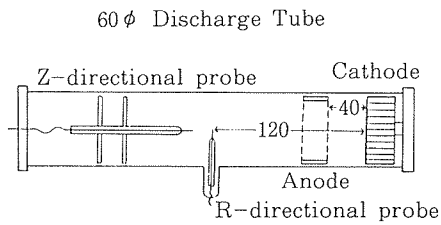
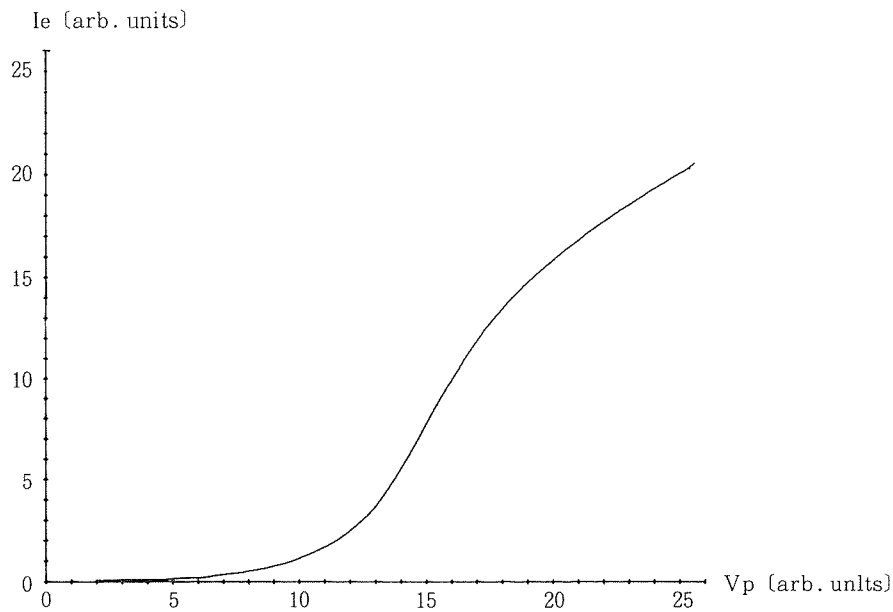


図6 放電管



PROBE CHARACTERISTIC DATA04
He-Gas... 0.56 Torr at $R=30$ (mm) $Z=117$ (mm)
 V_{pp} (CH.1) = 1 (volt) V_{pp} (CH.2) = 3.5 (volt) Dis. Cur. = 11.5 (mA)
 V_p (volt) = $X * V_{pp}$ (CH.1) / 255 Dis. Volt. = -659 (volt)

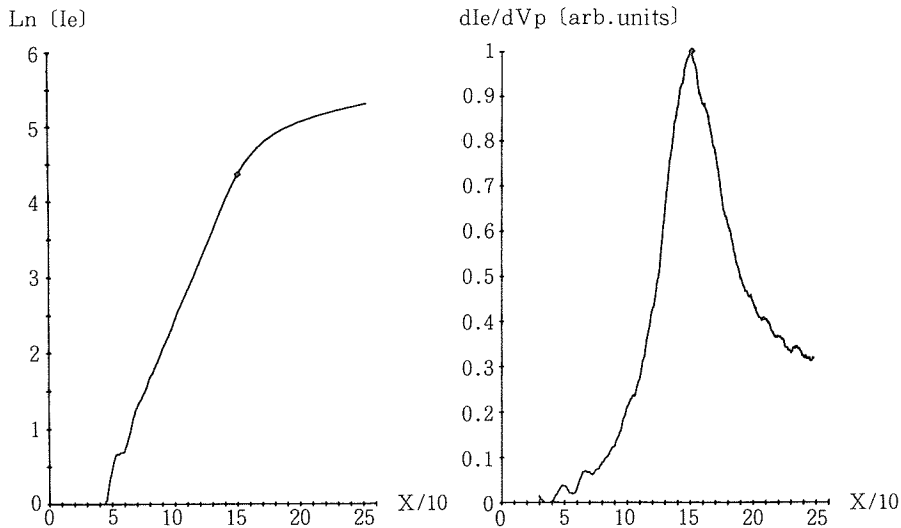


図7 プローブ特性の実測例

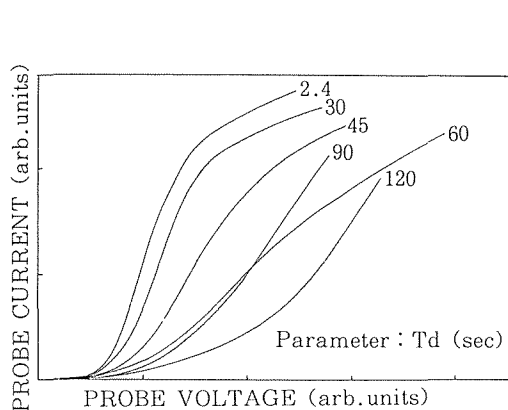


図8 汚染によるプローブ特性の変化

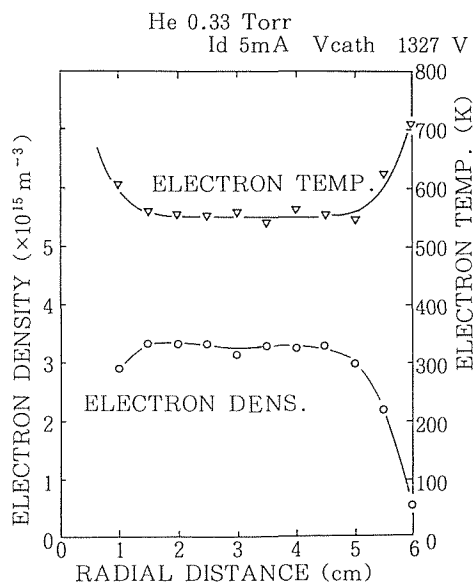


図9 負グロープラズマの電子密度・温度空間分布

プローブ衝撃停止後、測定開始までの遅延時間 T_d を変えたときのプローブ特性の変化の様子を図8に示す。プローブ衝撃停止後数秒すぎると、プローブ特性の立ち上がりがなまって、電子温度を高く見積ることになる。この結果から、 T_d が数秒以内であれば、プローブ汚染の影響をさげられることがわかった。

作製した回路で、この負グロープラズマの電子温度・密度の径方向分布を測定した例が、図9である。放電管中心部で温度も密度も平坦となった。これは、プラズマの空間再結合が大きいことと、陰極からの高速電子が径方向にほぼ一様なためと考えられる。

4.3 測定誤差の要因と対策

本実験における測定誤差の要因として、(1)プローブ表面積の測定精度、(2)プローブ表面状態の変化(特に汚染)、(3)プラズマのゆらぎ、(4)その他の雑音、(5)A/D変換時の量子化誤差、などが考えられる。

(1)については、プローブ作製後顕微鏡によってプローブ直径と長さを測定して、誤差をできるだけ小さくすることに努めた。(2)については、測定前に十分なイオン衝撃を行ってプローブの清浄化を計り、迅速な測定によってこれをまぬがれた。

負グロープラズマは、もともとゆらぎの少ないプラズマであるが、(3)、(4)に対する対策は以下の様に行った。(i)回路のシールド・雑音源の除去を行い、プラズマ以外で発生する雑音の信号への混入を防いだ。(ii)波形記憶装置内蔵のローパスフィルターにより10kHz以上の信号をカットした。これでプラズマのゆらぎのうち高周波成分を落とした。(iii)迅速測定を行ったので、低周波ゆらぎは問題とはならない。(5)については、移動平均によってデータの平滑化を計った。

5. 結 論

汚染の進行が速いプラズマに対するプローブ測定を目的として、イオン衝撃によるプローブ表

面の清浄化と迅速測定を行う測定回路を開発した。さらに、この回路を高速の波形記憶装置およびパーソナルコンピュータと組み合わせて、プラズマの迅速測定・データ処理システムを構成した。

このシステムは、1 データの取得に約 1 msec, データ転送に約 1 sec, 対話形式でデータ処理をし特性曲線を XY プロットに描かせて電子温度・密度を算出するのに約 20 分/data という性能を持つ。コンピュータを使ってデータの平滑化・演算処理を行うので、グラフからの数値の読み取りなどに對する個人差のための再現性の問題も解決された。

負グロープラズマの汚染の進行に伴うプローブ特性の変化を調べ、我々の装置の場合、プローブのイオン衝撃停止後、5 秒以内なら汚染の影響は無視できることが分かった、また、ラングミューア・プローブの空間分解能の良さという特長を生かして、電子温度・密度の詳細な空間分布を短時間で測定できるようになった。

引 用 文 献

- 1) Langmuir, I. and Mott-Smith, H.M.: Gen. Elec. Rev. 27 (1924) 449, 583, 161, 726, 810.
- 2) Thomas, T. L. and Battle, E. L.: J. Appl. Phys. 41 (1970) 3428.
- 3) Wunderer, B. M.: J. Phys. E, 8 (1975) 938.
- 4) Huddlston, R. H. and Leonard, S. L.: Plasma Diagnostic Techniques, (1965) p. 130, Academic Press.