HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ボックスカー積分器を用いたサンプリング方式によるアフターグロー・プラズマのプローブ測定
Author(s)	藤田, 文行; 高橋, 貢; 山崎, 初男
Citation	北海道大學工學部研究報告, 139, 1-7
Issue Date	1988-02-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42086
Type	departmental bulletin paper
File Information	139_1-8.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第139号（昭和63年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 139 (1988)

ボックスカー積分器を用いたサンプリング方式による アフターグロー・プラズマのプローブ測定

藤田文行　高橋貢*　山崎初男

（昭和62年9月30日受理）

Probe Measurement of Afterglow Plasma by the Sampling Method Using a Boxcar Integrator

Fumiyuki FUJITA, Mitsugu TAKAHASHI and Hatsuo YAMAZAKI

(Received September 30, 1987)

Abstract

Since the electron density of an afterglow plasma rapidly varies with time, it is difficult to apply the conventional probe methods to this plasma. Thus, we developed a new probe measurement system in which a boxcar integrator was used for data sampling. In order to guard the probe measurement system against the rush current from the plasmas at discharge, we constructed a protection circuit using a surge absorber. A microwave measurement was also performed to confirm the validity of the new probe method. Both results agreed well.

1. はじめに

ラングミューア・プローブは，プラズマ中の電子温度や密度を測定する有効な診断法として発達してきた。しかし，繰り返しパルス放電によるアフターグロー・プラズマをプローブで測定しようとすると，プローブ特性の取得の間に，プラズマのパラメータが時間的に変化してしまう。また，パルス放電中の突入電流のために，プローブ測定回路が破損する恐れがある。このため，アフターグロー・プラズマに対するプローブ法の適用例は比較的少ない。しかし，ラングミューア・プローブ法は光学的測定法やマイクロ波法などに較べて，空間分解能が格段に優れており，この方法をアフターグロー・プラズマに適用することによって，電子密度空間分布の時間変化を測定したり，拡散係数などの輸送係数が求められる可能性がある。

アフターグロー・プラズマは，プラズマのパラメータが時間と共に変化するので，定常プラズマ[1]とは違った測定法を工夫しなければならない。まず第一に考えられる方法は，測定時間を短縮することである。アフターグロー・プラズマは10^{-5}sec程度の時定数で減衰するので，これに較べて二桁ほど短い時間でプローブにのこぎり波電圧を印加することが考えられる。これには，高速で線形性の良い回路を作製しなければならない。さらに，プローブの回りにシースが形成されるよりも速くプローブ電圧を変えると，プラズマが応答しきれないこともある。

原子工学科基礎原子核工学講座
* 現在，三菱電気㈱

繰り返しパルス放電の初期の測定法[2]は以下の様なものであった。プローブ電位を固定しておき，オシロスコープの画面に写るプローブ電流信号の時間変化を書き写す。この操作を種々のプローブ電位に対して繰り返す。得られた一群のデータから，ある時刻におけるプローブ電圧—電流特性曲線のグラフを描く。これには，多くの時間と労力が必要であった。

測定時間やデータ処理時間を短縮するため，タイムサンプリング法が開発された[3]。サンプリングの装置は，輝度変調可能な2入力オシロスコープと，放電後の任意時刻にゲートパルスを発生できる発振器からなる。2入力オシロにプローブ電圧信号と電流信号を入力し，XY モードで使う。輝度変調用入力に，放電後の一定時刻のゲートパルスを入れれば，オシロの画面に輝点が現われる。そこで，プローブ電圧をゆっくり変化させると，この輝点はプローブ特性を描く。

ディジタル計算機の発達に伴い，タイムサンプリングにディジタル技術を利用することも行なわれるようになった[4]。また，上に述べた測定法をサンプリングオシロスコープで実現した例もある[5]。

パルス放電中の突入電流は，放電時にプローブが高電場に晒されるために発生する。これを避けるために放電形式そのものを工夫した例がある。Johnson と Malter は，定常放電にパルス電圧を重畳している[6]。Hosea は，P. I. G. reflex discharge machin を使用することによりプローブに高圧が掛からないようにした[3]。Smith 等は，マイクロ波放電を採用した[7]。Wunderer は，プローブの置かれている場所を0電位に保ち続ける様に，陽極と陰極の両方に電圧を加えている[4]。Tichy[8]は Johonson と同じ方法で，また松村等[9]は Smith の方法を採用している。

パルス放電の方法を特に工夫せず，プローブ測定回路に保護回路を挿入することで，突入電流の影響を避ける方法もある。Blagoev ら[10]はトランジスタによるスィッチングによって，放電時の突入電流を阻止している。Monchicourt 等[11]は，リレーを用いることによって，放電中プローブと測定回路を切り離している。トランジスタスィッチングでは，トランジスタの非線形性によってプローブ電流が歪む心配がある。また，リレーはチャタリングが避けられず，Monchicourt の実験では，放電停止後約数 100 μsec の間測定不能であった。

本研究の目標は，放電の形態を特に工夫しなくても有効なプローブ測定法を開発することである。すなわち，電極に高電圧の繰り返しパルスを掛けるだけの放電管におけるプローブ測定が目的である。このため，プローブ測定回路に挿入する保護回路を工夫し，データ収集方式にボックスカー積分器を使用する新しいタイムサンプリング法を開発した。

今までの保護回路のほとんどがプローブと測定回路の間に能動素子を直列に接続していたのに対して，本研究では受動素子であるサージアブソーバーを並列に組み込んだ。これにより，パルス放電停止後約 30 μsec からプローブ測定開始可能となった。

タイムサンプリングのために，ボックスカー積分器を使用した。この装置は，ゲートパルス入力時のみの信号を時間平均して出力できるので，S/N 比の向上を計れる。また，データの収集・処理のために，パーナルコンピュータを使用した。大量のデータ処理が迅速に行なえるようになったので，アフターグロー・プラズマの詳細な研究が可能になった。

プラズマ診断法のうちで現在最も信頼されているマイクロ波干渉法による測定も合わせて行ない，プローブ法での測定結果と比較した。得られた電子密度は互いに実験誤差の範囲内で良く一致し，本研究で開発された測定法の信頼性が確認された。

2. 実　　験

2. 1 放電体系

放電体系の模式図を図1に示す。パルス発生器は，出力インピーダンスが50Ωのパルスフォーミングネットワークである。この出力を1：4のパルストランスで昇圧して，放電管の陰極へ供給した。放電用の高圧パルスは，幅5μsec繰り返し50 ppsの負パルスである。図のA点からの信号を放電電圧のモニターとした。

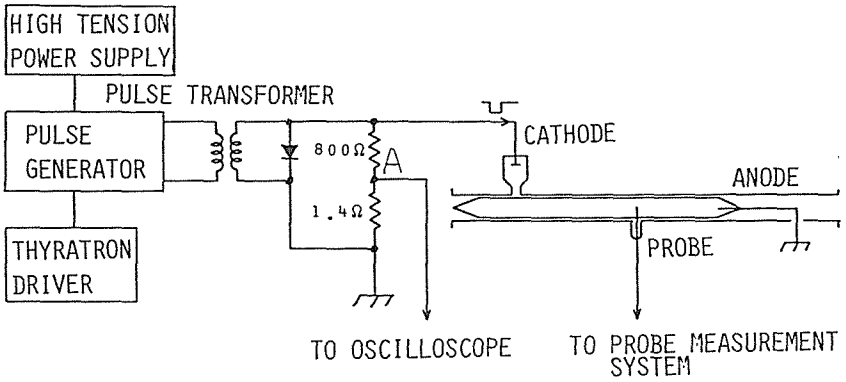


図1　放電体系

放電管は，直径20 mmφ，長さ40 cmのパイレックスガラス円筒である。マイクロ波測定も行うため，放電管は導波管の中に置かれた。その両端はマイクロ波の反射を防ぐために，円錐形とした。陽極は針状タングステン，陰極はタングステンのコイルである。プローブは放電管の径方向を向き，陽極から15 mmの位置に取り付けられた。直径0.1 mmφ，長さ4.6 mmのタングステン円柱プローブで，表面積は$1.45\times10^{-6}m^2$である。

2. 2 プローブ測定体系

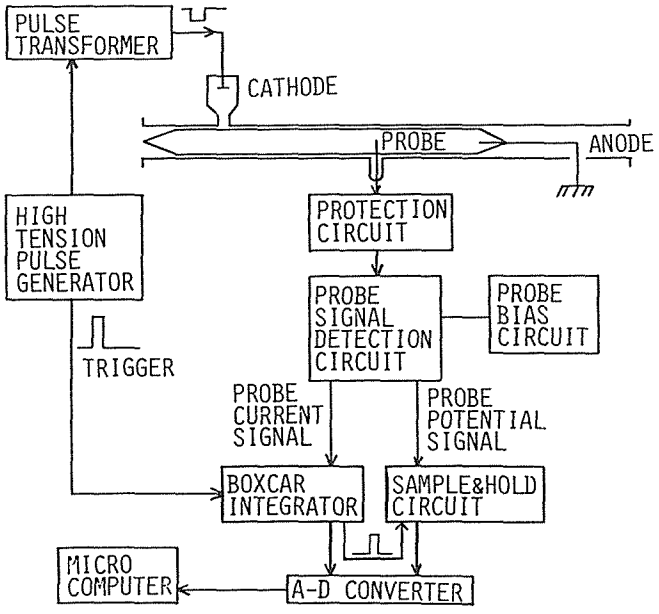


図2　プローブ測定体系のブロック図

図2にプローブ測定体系のブロック図を放電体系も含めて示す。保護回路，プローブ信号検出部，サンプルホールド回路はまとめてシールドして，プローブの近くに設置された。

プローブ信号検出部では，プローブ電流 I_p が電圧信号に変換され，プローブバイアス電圧 V_p と共に出力される。I_p 信号はボックスカー積分器へ，V_p 信号はサンプルホールド回路へ転送される。ここで，パルス放電停止後のある時刻におけるプローブ電圧および電流がサンプリングされ，さらに直流信号に変換される。これらの信号はA/D変換されて，パーソナルコンピュータに入力される。収集されたデータからディジタル処理により電子温度と密度が算出される。

プローブ信号検出回路とその保護回路を図3に示す。保護回路として，サージアブソーバー(KHエレクトロニクス：トランゾープ）をプローブと接地の間に挿入した。このサージアブソーバーは，双方向性のツェナーダイオード特性を持つ半導体素子で，本実験では±20 V 以上の電圧が掛かると，1 nsec 以内に短絡が起こるものを使用した。これによって，放電時の過大入力を接地へ逃がすことが出来る。プローブとサージアブソーバーとの間に $R_1=200\,\Omega$ の抵抗を入れてある。これは，パルス放電時にプローブを流れる電流を全放電々流の5%以内に抑えて，プローブと陰極の間で直接方電するのを防ぐためである。信号検出回路に使用したオペアンプは，すべて741型である。

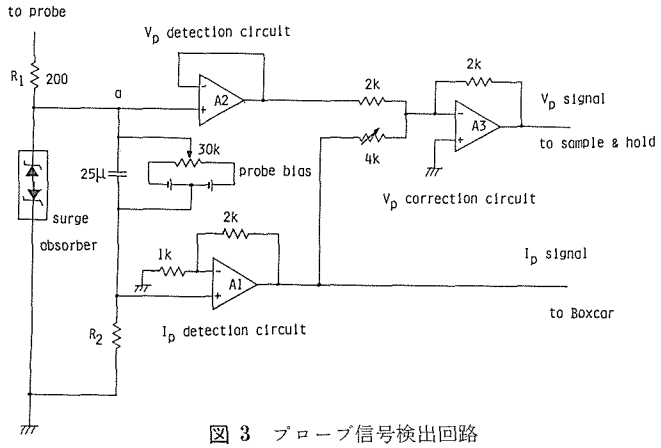


図 3　プローブ信号検出回路

I_p 信号検出部では，$R_2=1\,\mathrm{k}\Omega$ でプローブ電流を電圧に変換し，非反転増幅器で増幅した後，ボックスカー積分器へ信号を転送する。

V_p 信号検出部では，図のa点の電位をボルテージフォロアで検出する。この電位は R_1 の存在により，プローブ電位 V_p そのものにはならない。a点の電位は R_1 での電圧降下 I_pR_1 だけ V_p より低い。この補正を加算器A3で行い，サンプルホールド回路へ出力する。サンプルホールドに使用したICは，DATEL SHM LM-2である。サンプリング命令はボックスカー積分器のゲートパルスで行った。ICへの入力信号は，ゲートパルスが入力した時刻の電圧としてサンプリングされ，次のゲートパルスが入力されるまで保持される。

I_p 信号をサンプリングするために，ボックスカー積分器（NF回路設計ブロック BX-530A）を使用した。この測定器の機能は雑音に埋もれた繰返し信号を加え合わせることにより，雑音成分を除去して信号波形を再生することである。通常の使い方はAUTOスキャンモードで入力波形を再現することであるが，本研究においてはマニュアルデイレイモードで使用した。デイレイタイムを固定して，放電開始からの一定時間後にプローブ電流信号をパルス放電の繰り返し毎に幅5 μsec

でサンプリングし，加え合わせて平均化し直流信号にして出力する。これは放電ジッターや雑音による I_p 信号のゆらぎを相殺するためである。この状態でプローブバイアス電圧をモータードライブでゆっくり変えると，任意の時刻の I_p-V_p 特性を得ることが出来る。

サンプルホールド回路とボックスカー積分器の出力は12ビットのA/Dコンバータ(Sord HC-AIO)に入力される。この出力はパーソナルコンピュータに転送され，フロッピーディスタに記録される。

2．3　データ処理

収集されたデータは，パーソナルコンピュータにより以下の手順に従ってディジタル処理され電子温度および密度が算出される。[12,13]

（1）　プローブ特性曲線を片対数プロットする。

（2）　片対数グラフの直線部の傾きを最小自乗法で求める。

（3）　$\mathrm{d}(\ln I_p)/\mathrm{d}V_p = e/(kT_e)$ から電子温度 T_e を求める。ここで，e は電子の電荷，k はボルツマン定数である。

（4）　特性曲線の一階差分のグラフ V_p-$\mathrm{d}I_p/\mathrm{d}V_p$ 曲線を作る。

（5）　この曲線の極大値を求め，対応する I_{po} の値

$$n_e = \frac{I_{po}}{eA_p\left(\frac{kT_e}{2\pi m_e}\right)}$$

に従って電子密度 n_e を求める。I_{po} を電子飽和電流と呼ぶ。ここで，A_p はプローブの表面積，m_e は電子の質量である。

2．4　マイクロ波測定

プローブ測定による結果の妥当性を確認するため，マイクロ波干渉法による電子密度測定も合わせて行なった。図4にマイクロ波測定の立体回路を示す。[14] クライストロンで発振させたマイクロ波をマジック **T** で二分割して，一方は内部に放電管を持つ導波管に導き，もう一方は基準路を通す。プラズマ中を透過したマイクロ波は，その伝播定数が変化している。二つの経路を通ってきたマイクロ波を再びマジック **T** で重ね合わすと，干渉を起こす。この干渉波形をクリスタルダイオードで検波し，オシロスコープで観測する。観測された干渉パターンから位相の変化を読み取り，電子密度を算出する。

この方法で得られる電子密度は，放電管の径方向に平均化された密度である。ラングミューアプローブで得られる電子密度は放電管の軸上での値なので，マイクロ波測定で得られた電子密度を放電管軸上での値に換算する必要がある。アフターグロー・プラズマは，放電停止後短時間のうちに基本モードに移行する。円柱放電管の場合，電子密度分布は0次ベッセル関数になる。従って，径方向に平均化した電子密度 $\bar{n}$ は

$$\bar{n} = \frac{\int n(r)\,dS}{\int dS} = \frac{n_e \int J_o\left(\frac{\alpha r}{R}\right) dS}{\pi R^2} = 2.31\, n_e$$

となる。ここで，n_e は放電管軸上の電子密度，R は放電管半径で，本実験では $R=10$ mm である。プラズマのあるときとないときのマイクロ波の位相変化量 $\Delta\phi$ と n_e とには，本研究で用いた放電管について，

$$n_e = -5.02\times10^{16}\Delta\phi \quad [\mathrm{m}^{-3}]$$

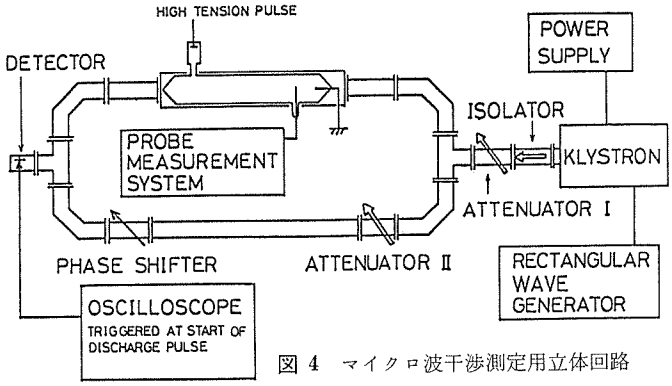
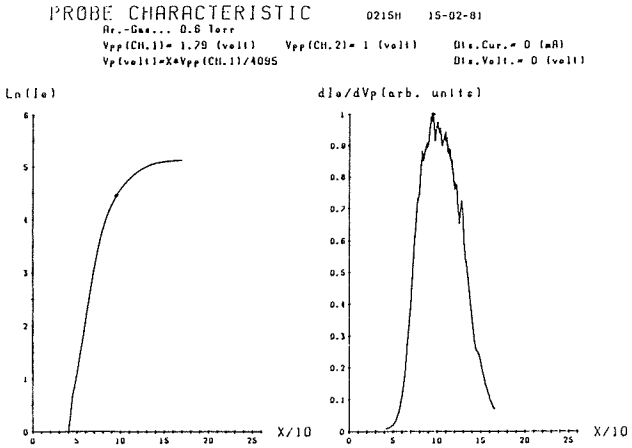


図 4　マイクロ波干渉測定用立体回路

という関係がある。

3. 測 定 結 果

放電電圧 4 kV, 0.6 Torr の Ar ガス放電に関するプローブ測定のデータの一例を, 図 5 に示す。



(a) 片対数プロット　(b) 一階差分

図 5　プローブ特性曲線の一例

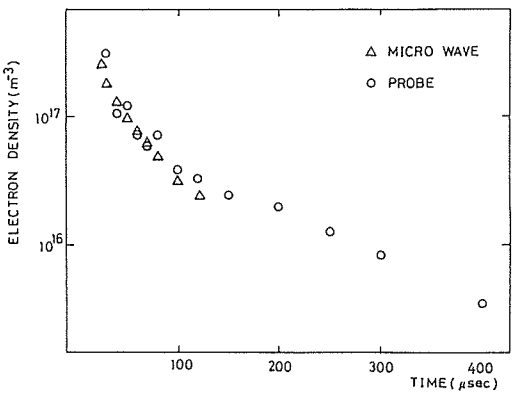


図 6　マイクロ波法とプローブ法によるアルゴンアフターグローの電子密度の時間変化

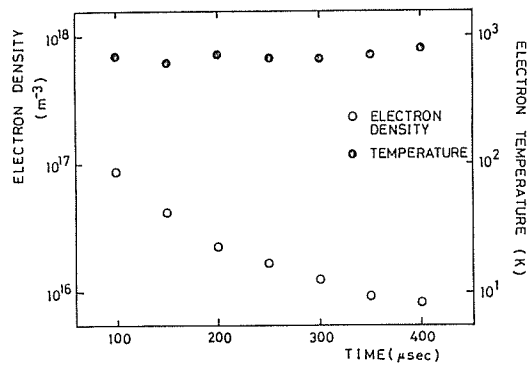


図 7　プローブ測定によるアルゴンアフターグローの電子密度・温度の時間変化

図5-aは，プローブ特性を片対数プロットしたグラフであり，図5-bは一階差分のグラフである。放電停止後の各時刻におけるプローブ特性曲線から，電子温度，密度を算出した。プローブ測定の結果とマイクロ波測定の結果とを比較したグラフを図6に示す。横軸は放電停止後の経過時間であり，縦軸は電子密度を表わす。放電停止後約20 μsecから測定可能となっている。この時刻まで，電子密度が大きくマイクロ波のカットオフになっているためである。100 μsec以降では，電子密度が小さいため，マイクロ波の位相変化が検出できない。それに対して，プローブでは約400 μsecまで測定可能であった。プローブで測定した電子温度と密度の時間推移を図7に示す。アフターグロー・プラズマでは，放電停止後100 μsec以降で電子温度がほとんど変化しないことが分かる。

4. 結　　論

本研究によって開発された新しいタイムサンプリング方式によるプローブ測定法は，マイクロ波干渉法の測定結果との一致も良く，その有効性が確認できた。プローブ測定法は，マイクロ波法より電子密度の測定範囲が広く，二桁程度の密度変化を追跡できた。

この方式では，放電ジッターや雑音の影響を除去するために，ボックスカー積分器でプローブ電流信号の平均操作を行った。このため，計測に10分程度時間を要するが，S/Nの良いデータを取得でき，プラズマの輸送係数を精度良く測定できる可能性がある。

高圧パルス発生器の改良に御尽力いただいた，基礎原子核工学講座の本間技官に感謝いたします。さらに，サージアブリーバーの入手に際して御協力いただいた，同講座の成田助教授に深く感謝いたします。

引 用 文 献

1) Langmuir I.: The Collected Works of Irving Langmuir, vol. 4, (1961), Pergamon Press
2) Pigacke D. R. et. al.: Stanford Electro. Lab., TR-0253-5, (1964)
3) Hosea J. C.: J. Appl. Phys., **37** (1966), 2695
4) Wunderer B. M.: J. Phys. E, 8 (1975), 938
5) Sugawara M. et. al.: J. Phys. D, **19** (1986) 1213
6) Johnson E. O. and Malter L.: Phys. Rev., **80** (1950), 58
7) Smith D. et. al.: J. Phys. D, 8 (1975)141
8) Tichy M.: Czech. J. Phys., **B27** (1977), 1027
9) 松村昭作 et. al.: 電気学会プラズマ研究会資料, EP-77-2 (1977)
10) Blagoev A. B. et. al.: Sov. Phys.-Tech Phys., **17** (1973), 1359
11) Monchicourt P. et. al.: Revue de Physique Appl., **14** (1979), 451
12) Chen F. F.: "Electric Probes," in Plasma Diagnostic Techniques (Huddlestone R. H. and Leonard S. L., Eds.), (1965), Academic Press
Swift J. D. and Schwar M. J. R.: Electric Probes for Plasma Diagnostics, (1971) Illife Bookes
13) 藤田文行 et. al.: 北大工学部研究報告, 115号（昭58）81
14) Golant V. E.: Sov. Phys.-Tech. Phys., **5** (1961), 1197