

磁気フィルターによる電子エネルギー分布の空間的制御

酒井 広隆*・繁山 直樹**・福政 修***
内藤 裕志***・崎山 智司***

Spatial Control of Electron Energy Distribution Function by Using a Movable Magnetic Filter

Hiroataka SAKAI, Naoki SIGEYAMA, Osamu FUKUMASA
Hiroshi NAITOU and Satoshi SAKIYAMA

Abstract

With the use of both a movable magnetic filter and a plasma grid, the technique to control plasma parameters (including the electron energy distribution function) spatially in a multicusp plasma source has been investigated experimentally. The magnetic filter field makes plasma parameters vary abruptly across the filter, so that the plasma source is divided into two region, i.e. a source plasma region (high density plasma with energetic electrons) and a diffused plasma region (low temperature plasma without energetic electrons). The source plasma is suited for production of the reactive species, and the diffused plasma is suited for deposition of thin films. But the strength of the magnetic filter has great influence on controlling plasma parameters. Therefore, it is necessary to select the most suitable filter field, for controlling plasma parameters. It is also confirmed that, by changing the plasma grid potential, the plasma parameters in the diffused plasma region are controlled well.

1. はじめに

プラズマCVD (Chemical Vapor Deposition) 法は、現在、半導体産業を中心として、機能性薄膜の作成に重要な役割を演じている手法であり、比較的低温で緻密な薄膜が生成できるなどの利点を持ち、特に注目されている¹⁾。このプラズマCVD法は、現在、薄膜生成法として広く用いられているが、その複雑な反応機構の解明はまだ不十分である。このため、有効な制御法が確立されてなく、プラズマの持つ豊かな反応性と可制御性が十分に活用されていないのが現状である。その反面、今日、高集積化、高機能化及び高信

頼性を兼ね備えた半導体デバイスが要求されており、高品質で均一な膜を再現性、制御性良く生成するため、プラズマCVDに適したプラズマの制御法を確立する必要に迫られている²⁾。

ところで、プラズマCVDではプラズマ中における材料ガス(CH₄やSiH₄等の反応性ガス)の分子の様々な反応により膜生成を行っており、その反応は主に次に示すように、

- (1) 材料ガスの分子と高速電子とが衝突し、ラジカル、イオンなど活性種を生成するラジカル生成過程
- (2) 生成されたラジカルの基板への輸送過程
- (3) 基板表面での膜成長過程

という三段階の過程に分かれている²⁾³⁾。この(1)の反応では、高速電子との衝突により材料ガスの分子を解離させラジカルを生成しており、ラジカルなど活性種の組成は電子エネルギー分子や電子密度に強く依存している。また成膜域では基板は常に電子やイオンに

*大学院電気工学専攻

**大学院電気工学専攻 (現三菱重工)

***電気工学科

さらされており、成膜と同時に基板の損傷を防ぐ必要がある。このため、良質な薄膜を再現性、制御性良く得るためには電子エネルギー分布を含めたプラズマパラメータを空間的に制御することが必要となっている。

我々は反応性プラズマの制御という立場に立ち、磁気フィルターやプラズマグリッドの電位変化が電子エネルギー分布やプラズマパラメータに及ぼす影響について実験的に検討を行なっている^{4)~6)}。ここでは、まず代表的な希釈ガスである H_2 や Ar のみのプラズマに対して、磁気フィルターやプラズマグリッドの電位がプラズマパラメータに及ぼす影響について検討を行った。その結果、可動型磁気フィルターやプラズマグリッドによりプラズマパラメータを空間的に制御できることが分かったので報告する。

2. 実験装置及び測定

Fig. 1 に実験装置の概略図⁷⁾を示す。放電容器は直径162mm、長さ300mmのステンレス製円筒型容器である。また容器外周にはプラズマ閉じ込めのため、フェライト永久磁石(表面磁束1 KGauss)を並べ、16極の直線カusp磁場を構成している。

この容器を接地して陽極とし、熱陰極(タングステン、直径0.5mm、長さ100mmを2本使用)との間の直流アーク放電によりプラズマを生成している。

磁気フィルターは54mmの間隔で、平行に並べた2本の水冷式のステンレス製パイプで構成されており、全体が軸方向に可動である。そして、パイプ内に挿入する永久磁気により容器軸線に垂直な磁場を形成しプラズマ空間を二領域に分離することが可能となっている。

またパイプ内に挿入する磁石を交換することにより、フィルター磁場強度を自由に変化できるようになっている。磁石としては円筒型のサマリウムコバルト磁石(SmCo)、並びにフェライト磁石(ferrite)の2種類を用いた。各磁石での容器軸線上における磁場強度をFig. 2に示す。その磁場強度はSmCoで最大35Gauss, ferriteで最大15Gaussである。磁場の広がり、半値幅でそれぞれ2.2cm, 3.0cmであり、局所的な磁場が形成されている。

プラズマグリッドは放電容器左端に容器とは絶縁して設置されたフランジであり、プラズマに対して独立にバイアス電位を印加できるようになっている。なお、次節に示す結果のうち、磁気フィルターによるプラズマパラメータの制御に関しては、グリッドを容器(陽極)と同電位として行なった実験結果である。

実験はプラズマCVDの代表的な希釈ガスである H_2 , Ar について行った。そしてプラズマパラメータ(電子密度 n_e , 電子温度 T_e , 空間電位 V_s , 浮遊電位 V_f)の測定は軸方向に可動なラングミュアプローブにより行い電子エネルギー分布関数はドゥルベステインの方法⁸⁾により、プローブ電流の二次微分波形から算出した。

3. 実験結果及び考察

3.1 磁気フィルターによるプラズマパラメータの制御

3.1.1 磁気フィルターの効果

Fig. 1 に示すプラズマ源は安定かつ均一なプラズマを生成することができる。このプラズマ源において磁気フィルターの効果を確認するため、フィルターをプラズマグリッドから上流10cm ($L_f=10$ cm) の位置に固

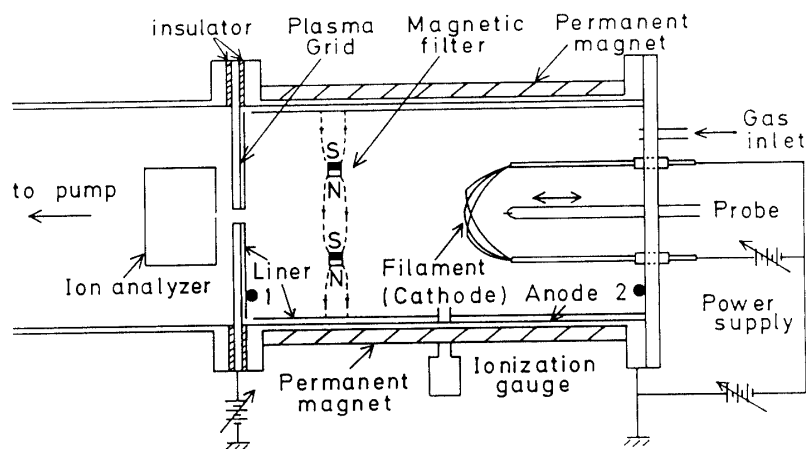


Fig. 1 Schematic diagram of the multicusp plasma source equipped with a movable magnetic filter and a plasma grid.

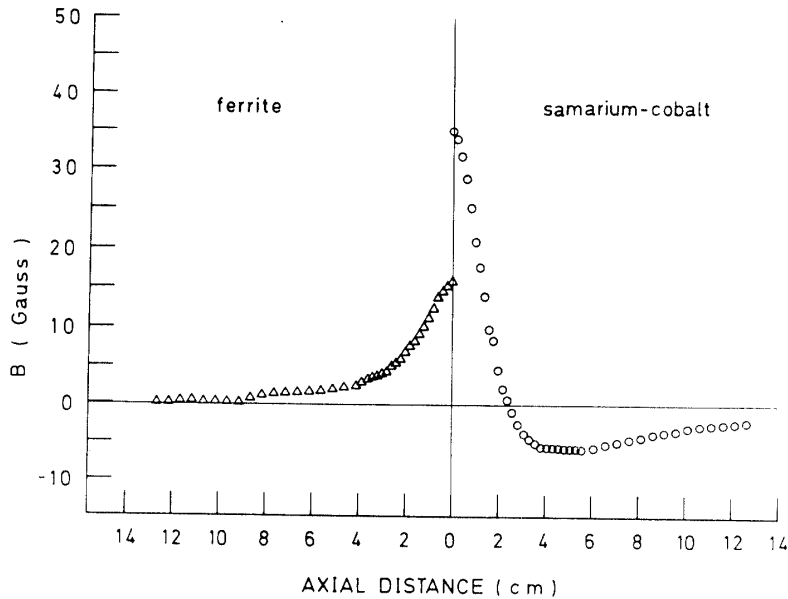


Fig. 2 The two field intensities for the two different magnets along a direction parallel to the axis of the source chamber.

定し、このときのプラズマパラメータの変化を測定した。なお磁石材料としてはSmCoを使用した。

Fig. 3 (a) ~ (d) は H_2 及び Ar プラズマにおけるプラズマパラメータの軸方向分布である。放電条件は放電電圧 $V_d=80V$ 、放電電流 $I_d=2 A$ 、圧力 $P=3.1 \times 10^{-3} Torr$ 一定とした。図中の M.F. は磁気フィルターの設置位置、L はプラズマグリッドからの距離を示している。電子密度 n_e 、電子温度 T_e 、空間電位 V_s 、浮遊電位 V_f は全て、磁気フィルターの上流側 ($L > 10cm$) では高い値に維持されているが、フィルターを境として、下流側 ($L < 10cm$) では大きく減少しており、プラズマ空間が二領域に分離されている。

このことは電子エネルギー分布関数の変化にも顕著に現われている。Fig. 4 (a), (b) はそれぞれ H_2 及び Ar における電子エネルギー分布関数の軸方向分布である。 H_2 、Ar プラズマのどちらも、磁気フィルターの上流側で多く存在する電子の高エネルギー成分 (例えば $10eV$ 以上) は下流側では著しく減少している。即ち、磁気フィルターは高速電子のみを選択的に反射している。このため、磁気フィルターによりプラズマ空間は高温、高密度なラジカル生成に適した領域と、低温で、しかも高速電子が少ない成膜に適した領域の二つに分離されている。しかも、これらの二領域はフィルター位置により容易に変えられることが判明した。つまり、可動型磁気フィルターにより、プラズマパラメータの空間的制御が可能となることが分かる。

また、 H_2 及び Ar プラズマのどちらに対しても同様

の結果が得られており、磁気フィルターの効果は粒子種には依存しないことも分かる。

以上の結果から明らかなように、磁気フィルターによって高速電子のみが選択的に反射されているが、この現象はまだ理論的には明確でない。そこで、我々は実験パラメータを参考にしながら、粒子シミュレーションによっても磁気フィルターの役割について検討を行った⁹⁾¹⁰⁾。そして、粒子シミュレーションにおいても、実験結果と定性的に一致する結果が得られている。電子が磁気フィルターを通り抜ける機構は揺動電場 E とフィルター磁場 B との $E \times B$ ドリフトが支配的であり、有限ラーマー半径効果のため高エネルギー電子ほどドリフト速度が小さくなることが選択的反射の原因と考えられる。

3.1.2 磁場強度依存性

磁気フィルターはフィルターが作り出す磁場により、高速電子を選択的に反射し、プラズマの制御を行っている。従って、フィルターの磁場強度が変化すると、その制御特性にも影響が大きく出てくるものと考えられる。そこで我々はフィルター磁場強度の及ぼす影響について検討を行った。

ここでは Fig. 2 に示したように、SmCo (強磁場) と Ferrite (弱磁場) の二種類の磁石を用いている。それぞれの軸線上での磁場強度は最大 $35Gauss$ 、 $15Gauss$ であり、大きく異なっている。

Fig. 5 (a) ~ (d) に強磁場、弱磁場フィルターを用

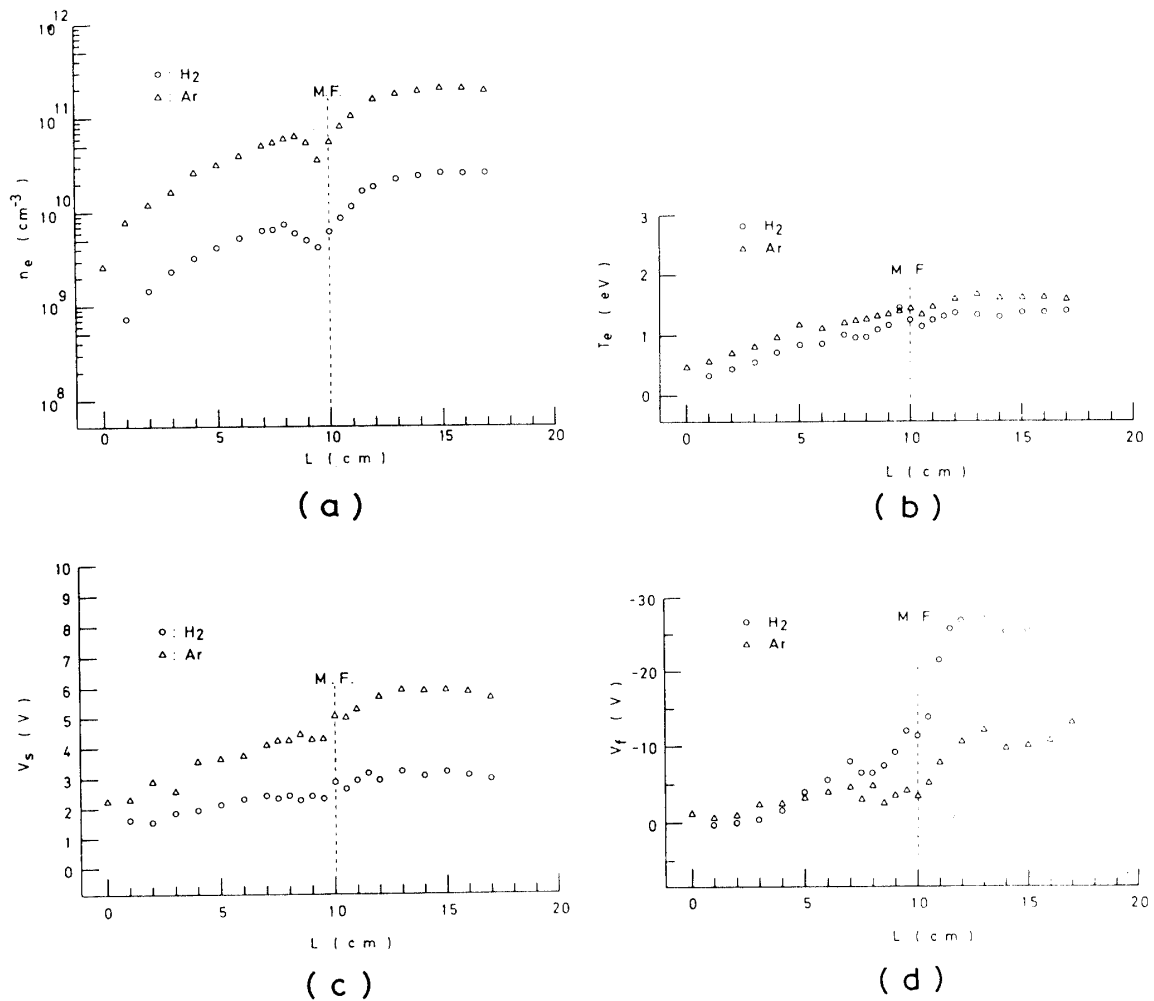


Fig. 3 Axial variations of plasma parameters, (a) electron density n_e , (b) electron temperature T_e , (c) plasma space potential V_s , and (d) floating potential V_f , in H₂ plasma and Ar plasma. Experimental conditions are as follows : $V_d=80V$, $I_d=2 A$, $P=3.1 \times 10^{-3} \text{Torr}$, and $L_f=10\text{cm}$.

いた場合のプラズマパラメータの軸方向分布を示す。実験はH₂について行っており、放電条件は3.1と同一条件である。強磁場フィルターと弱磁場フィルターではプラズマパラメータの様子が大きく異なっている。強磁場フィルターではフィルター付近でプラズマパラメータが大きく変化しており、高温・高密度なラジカル生成領域と低温で高速電子が少ない成膜域とにプラズマ状態が空間的に分離されている。しかし、弱磁場フィルターではこの変化が少なく、プラズマの空間的分離が明確でないことが分かる。

電子エネルギー分布関数にも同様の特性が見られる。Fig. 6は、弱磁場フィルターでの電子エネルギー分布関数の軸方向分布である。Fig. 4 (a)と比較すると、弱磁場フィルターではフィルターの前後での電子エネ

ルギー分布関数の変化が少なく、磁気フィルターによる高速電子の選択的反射があまり行われていないことが分かる。

このようにフィルター磁場強度の違いはプラズマパラメータの制御に大きく影響しており、磁気フィルターによりプラズマの制御を行う場合には、適切な磁場強度のフィルターを選択する必要があるものと考えられる。

3.2 プラズマグリッドによるプラズマパラメータの制御

これまでは磁気フィルターの効果について検討してきたが、我々はプラズマグリッドの電位変化によるプラズマパラメータの制御も試みており、その結果につ

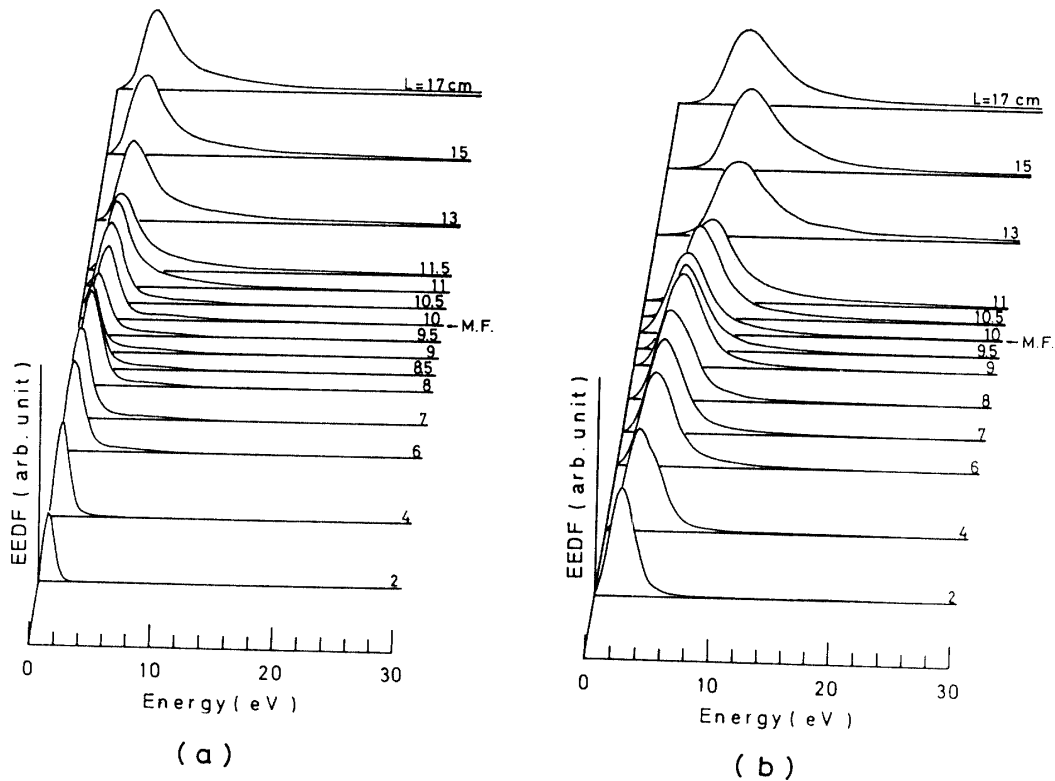


Fig. 4 Axial variations of the electron energy distribution functions, (a) H_2 plasma and (b) Ar plasma. They are corresponding to the result shown in Fig. 3.

いて述べる。

Fig. 7 (a) ~ (d) は $L = 1$ cm の位置でのプラズマパラメータのグリッドバイアス (V_b) 依存性である。この $L = 1$ cm という位置は、成膜域、つまり基盤の設置位置に相当している。実験は H_2 について行っており、磁気フィルター (SmCo) 設置位置は $L_f = 5$ cm、放電条件は $V_d = 80$ V, $I_d = 2$ A とし、 $P = 1.8 \times 10^{-3}$ Torr, 3.1×10^{-3} Torr, 5.3×10^{-3} Torr の三通りについて実験を行った。

グリッドバイアス V_b を変化する時、 V_b が正になると、 n_e は急激に減少し、 T_e , V_s は増加し V_f も負に増加している。この変化の理由としてはプラズマグリッドを正にバイアスしていくと、壁への電子損失が増加する (壁へは低速の電子が流出しやすくプラズマ中に比較的高速の電子が残存する) ためと考えられる。

このようにプラズマグリッドの電位変化によりプラズマパラメータが制御できることが判明したが、次にグリッドの影響がどの程度までプラズマ中に浸透するかを検討する。

Fig. 8 (a) ~ (d) にグリッドバイアスを変化させた時のプラズマパラメータの軸方向分布を示す。 $L = 0$ cm

がプラズマグリッドの設置位置である。放電条件は $L_f = 5$ cm, $V_d = 80$ V, $I_d = 2$ A, $P = 3.1 \times 10^{-3}$ Torr とし、 $V_b = 0$ V, 1.3 V, 2.5 V の三通りについて測定した。 V_b を変化していくと、 $V_b = 0$ V の時に比べ正バイアスでは、 n_e は減少し、 T_e , V_s は増加し、 V_f は負に増加しており、Fig. 7 に示したグリッドバイアス依存性と同様の結果が得られている。また、その変化量はグリッド近傍になる程、大きくなっている。しかし、磁気フィルターの上流側 ($L < 5$ cm) ではほとんど変化がなく、このため、プラズマグリッドが影響するのはグリッド近傍の成膜域のみであり、ラジカル生成域には影響しないことが分かる。

以上のように、プラズマグリッドを用いることにより、ラジカル生成には影響を与えず、基板周辺のプラズマのみを制御することが可能となっている。このことは膜生成においては、非常に有益であると考えられる。

4. おわりに

磁気フィルター付プラズマ源を用いて、磁気フィル

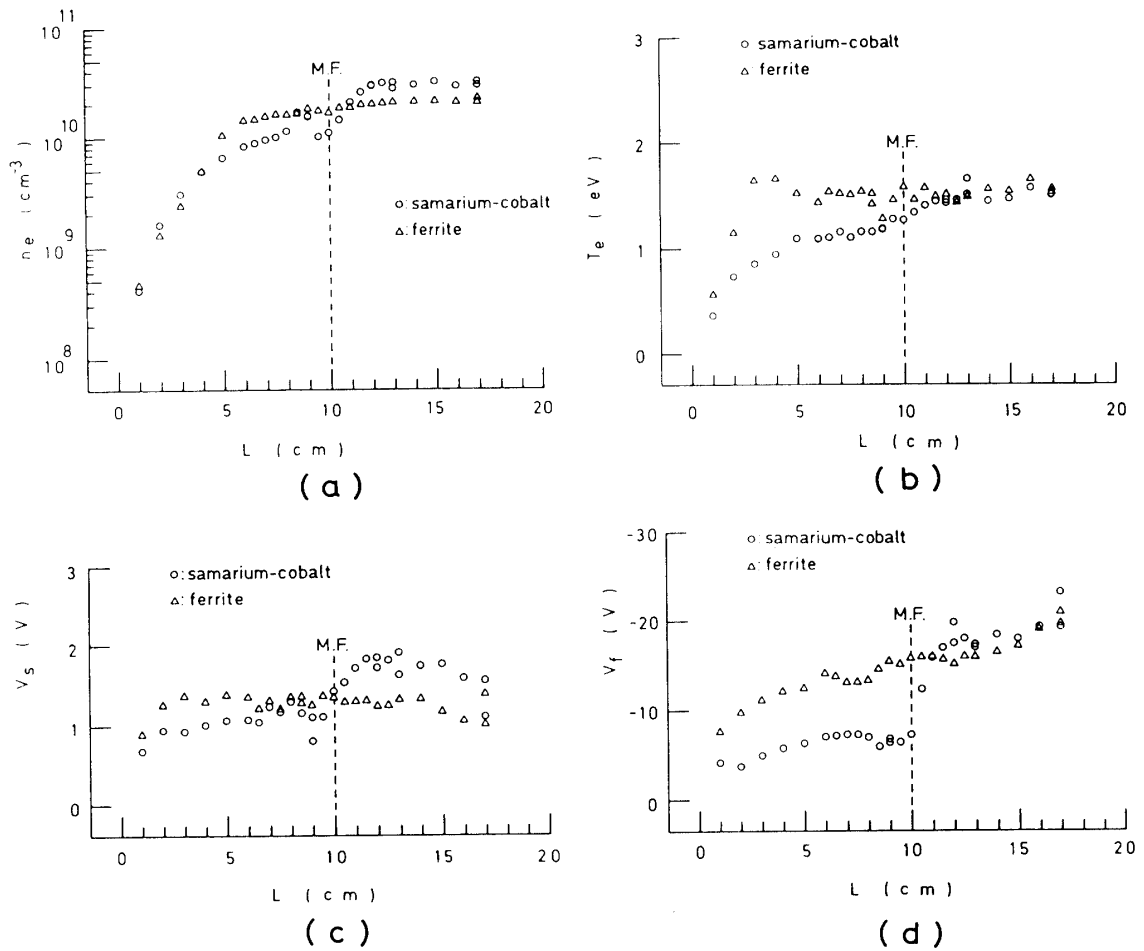


Fig. 5 Axial variations of plasma parameters, (a) n_e , (b) T_e , (c) V_s , and (d) V_f , when the two different magnets are used for the magnetic filter. Experimental conditions are the same as those in Fig. 3.

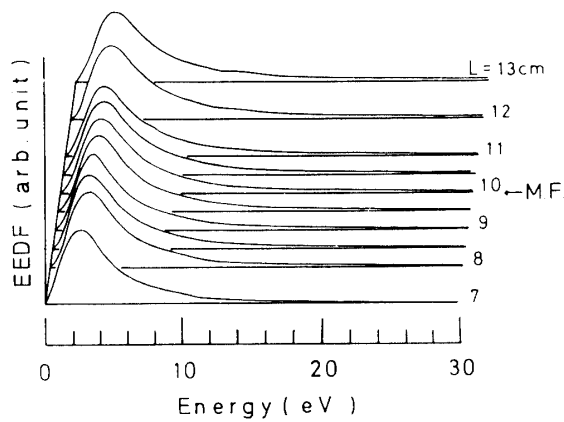


Fig. 6 Axial variation of the electron energy distribution function, when the filter of ferrite magnet is used. Experimental conditions are the same as those in Fig. 3.

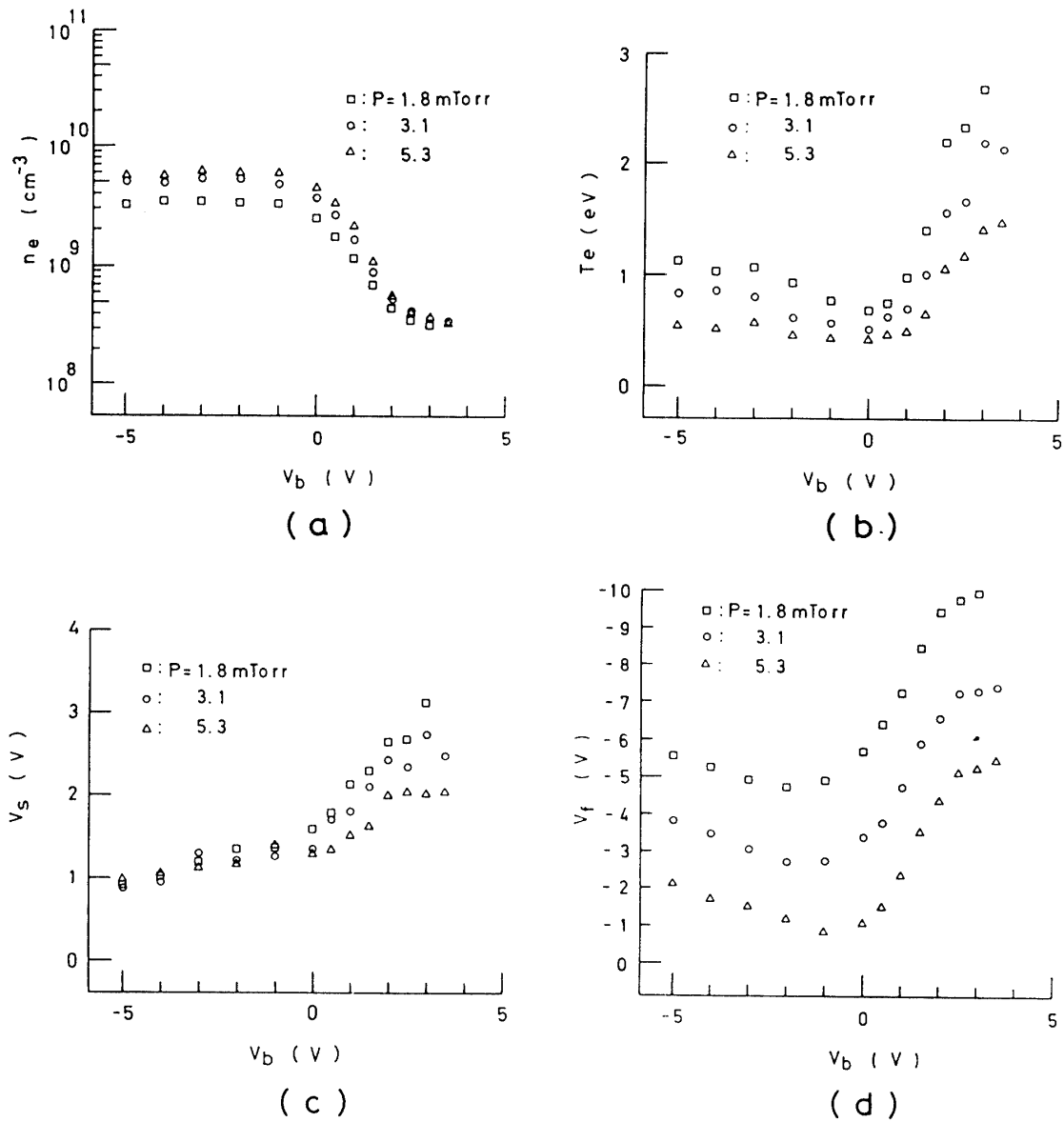


Fig. 7 Plasma parameters, (a) n_e , (b) T_e , (c) V_s , and (d) V_f , measured at $L=1$ cm, as a function of the grid bias voltage V_b . Hydrogen gas pressure P is parameter. Experimental conditions are as follows : $V_d=80$ V, $I_d=2$ A, and $L_f=10$ cm.

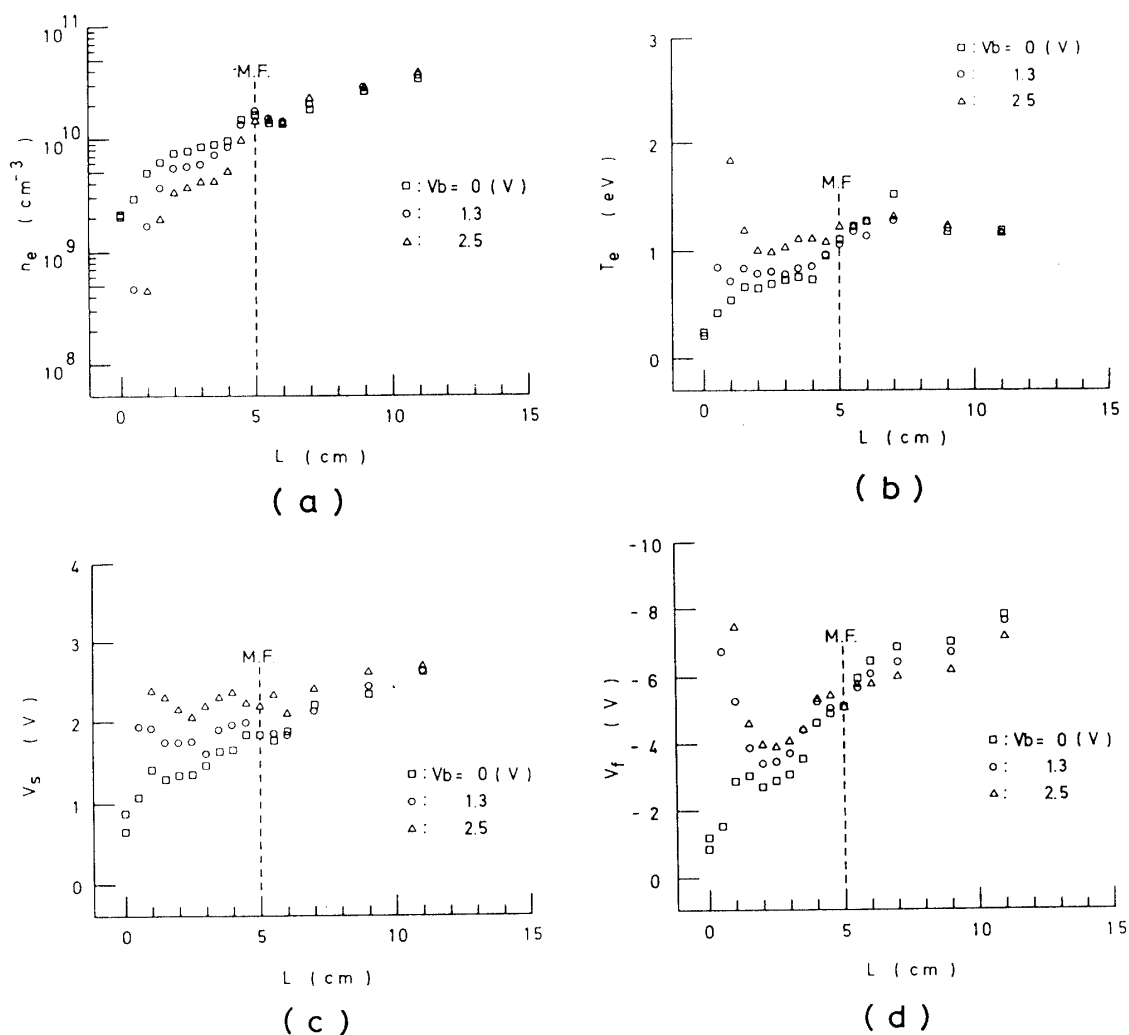


Fig. 8 Axial variations of plasma parameters, (a) n_e , (b) T_e , (c) V_s , and (d) V_f , for three different grid bias voltages. Experimental conditions are as follows : $V_d=80\text{V}$, $I_d=2\text{ A}$, $P=3.1 \times 10^{-3}\text{Torr}$, and $L_f=5\text{ cm}$.

ターやプラズマグリッドが希釈ガスだけのプラズマに対して及ぼす影響について実験的検討を行った。

以下に得られた結果を要約する。

- (1) 磁気フィルターを用いることにより、高速電子が選択的に反射され、プラズマ空間を高温・高密度なラジカル生成領域と、低温で高速電子の少ない成膜域とに分離できる。
- (2) プラズマ空間の分離の様子はフィルターの磁場強度に大きく影響される。このため、磁気フィルターによる制御には適切な磁場強度を選択する必要がある。
- (3) プラズマグリッドにより成膜領域のプラズマパラメータの制御が可能である。

以上の結果より、磁気フィルターやプラズマグリッドを組み合わせることで、プラズマパラメータの精密

な空間的制御が可能であることが判明した。

また、これまででは、 H_2 や Ar などの希釈ガスだけのプラズマに対して検討を行ってきたが、今後は CH_4 のような材料ガスを用い、実際の反応性プラズマに対しても、磁気フィルターやプラズマグリッドによる制御が可能であるか、そして、そのプラズマ制御と成膜とがどのように関係するかを検討していく予定である。

謝 辞

本研究は平成元年度の文部省科学研究費（重点領域研究「反応性プラズマの制御」）の援助を受けて行われた。ここに記して感謝する。また実験に御協力頂いた平成元年度卒業研究生の大庭 巧氏・細田雅之氏、

並びに聴講生の高木英幸氏に感謝する。

参考文献

- 1) 明石和夫, 服部秀三, 松本修 編: 光・プラズマプロセス, 日刊工業新聞社, (1986) P.100.
- 2) 板谷良平: 電気学会雑誌, **110**, 167 (1990).
- 3) 松田彰久: 真空, **31**, 18 (1988).
- 4) 繁山, 福政, 水野: 日本物理学会 第44回年会, 29a-A-2 (1989年3月).
- 5) 繁山, 酒井, 崎山, 内藤, 福政: 日本物理学会 秋の分科会, 4a-P-4 (1989年10月).
- 6) 繁山, 酒井, 崎山, 内藤, 福政: 日本物理学会 第45回年会, 2a-Q-8 (1990年4月).
- 7) 繁山, 水野, 渡部, 崎山, 福政: 山口大学工学部研究報告, **40**, 213 (1989).
- 8) M. J. Druyvesteyn: Z. Phys., **64**, 790 (1930).
- 9) 内藤, 西村, 福政: 日本物理学会 第45回年会, 2a-Q-9 (1990年4月).
- 10) 西村祐晃: 平成元年度卒業研究論文 (1990年2月).

(平成2年4月14日受理)