

機関番号：33910

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540487

研究課題名（和文） 周波数シフトプローブの高性能化に関する研究

研究課題名（英文） Investigation on development of advanced frequency shift probe

研究代表者

中村 圭二 (NAKAMURA KEIJI)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：20227888

研究成果の概要（和文）：

電子密度のモニタが可能で、プラズマへの擾乱を最小限に抑制可能な平板型周波数シフトプローブに着目し、プローブ周囲に形成されるシースによる影響を調べた。またシース効果を抑制して測定精度を向上させるとともに、電子温度の算出方法などについて検討した。スリット幅が異なる2種類のプローブについてシミュレーションと実験を行ったところ、シースを考慮せずに算出した電子密度は、真の電子密度に比べて低めに見積もられ、シース幅が厚くなるにつれてその傾向が顕著となった。しかしスリット幅を広くすると、シース効果が緩和されて測定精度が向上した。さらにスリット幅が異なる2つのプローブを用いることで電子温度の算出も可能となることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

This paper reports plane-type frequency shift probe for electron density measurements in reactive processing plasmas. The sheath effects were investigated by electromagnetic field analysis with FDTD simulation, and the calculated characteristics were confirmed experimentally. The FDTD simulation revealed that the sheath formed around the probe leads to underestimation of electron density, in comparison to the real density given as an initial condition in the simulation. However, an increase in a slit width of the probe antenna suppressed the density underestimation, and effective for improvement of accuracy of the density measurement. Furthermore, combination of two probes with different slit width enabled measurements of not only electron density and electron temperature by considering the sheath effects.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：プラズマ工学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：周波数シフトプローブ、マイクロ波共振器プローブ、電子密度、電子温度、シース

## 1. 研究開始当初の背景

超L S Iなどの電子デバイスでは大容量化などの要求が強く、0.1ミクロン以下の超微細加工などに関連した技術開発が盛んに進められている。量産レベルで所望の特性を得るにはプラズマを常に一定の状態に保つ精密な制御が必要であり、それに対応できる高感度なプラズマモニタリング法の開発が進められている。特に電子は、ラジカルやイオンなどのプロセスに不可欠な粒子を生成する上で主要な役割を果たすため、密度や温度などの電子状態のモニタリング技術が重要である。

しかし実プロセス装置に適用する場合、プラズマに対する擾乱が小さく、かつ絶縁膜などが堆積しても安定に動作できる電子密度のモニタリング技術はあまりなく、また電子温度のモニタリング方法に至ってはほとんど未開発な状況にあった。従って、それらの性能を有する電子状態のモニタリングツールの開発が切に望まれている。

## 2. 研究の目的

本研究では、電子密度モニタ用周波数シフトプローブの機能拡張を図り、電子温度のモニタリングに応用する技術開発を行う。また絶縁膜の堆積や放電圧力など、周波数シフトプローブが動作可能なプラズマ条件を明らかにする。

## 3. 研究の方法

従来、我々は、絶縁膜が堆積する反応性プラズマでの絶対電子密度法として表面波プローブを独自に開発するとともに、シース効果を考慮して電子密度と電子温度の両方を計測できるデュアル表面波プローブ法を考案したが、1Torr以上の高い圧力領域で信号強度が減衰したり、プローブ先端が突起状の構造で機械的強度が弱くプラズマに擾乱を及ぼす等の課題があり、実プロセス装置への適用は困難であった。

そこで表面波プローブの問題を克服する新しいプローブとして、周波数シフトプローブを開発している。周波数シフトプローブは、マイクロ波共振器プローブとも呼ばれ、マイクロ波領域で動作する共振器を有している。共振周波数は共振器周囲の誘電率に依存しており、無磁場プラズマの場合、誘電率は電子密度に依存する。その性質を用いて電子密度をモニタするのが周波数シフトプローブである。また周波数シフトプローブは、1Torr以上の高い圧力範囲に対応でき、プローブヘッドが平板状のため機械的な強度が強く、プラズマへの擾乱も極めて小さいなどの特徴を有しているため、実プロセス装置におけるモニタリングツールとして非常に有用である。本研究では、電子密度だけでなく、電子

温度のモニタリングも可能な新しい電子状態モニタリングツールとして、周波数シフトプローブの機能を拡充する手法を用いた。

電子密度と電子温度の両方の情報を得るのに、プローブ周囲に形成されるシースの効果を利用する。一般的に、シースの厚さはデバイス長に比例すると言われており、そのデバイス長は電子密度と電子温度の関数として与えられるので、共振周波数も電子密度と電子温度の2つの変数で決まる。同じ厚さのシースで覆われた2つのプローブにおいて、共振周波数に対するシース厚依存性が異なる場合、シース厚に対して鋭敏なプローブではわずかな厚みのシースがプローブ周囲に形成されても共振周波数は変化するが、シース厚に対して鈍感なプローブだとシース厚によらず共振周波数はあまり変化しない。従ってシース厚に対する各プローブの共振周波数の影響を予め見積もっておけば、2つのプローブで測定される共振周波数を同時に満足する電子密度と電子温度を一義に決めることが出来る。

本研究では、そのようなシース厚依存性をプローブに持たせる方法として、プローブ内のマイクロ波共振器におけるスリットの幅を変化させる方法と、プローブ周囲を厚みの異なった誘電体板で覆う方法を用いた。

前者においては、密度一定で電子温度が低くなるとシースが薄くなるため、幅が狭いスリットでもスリット内部までプラズマは拡散しやすくなる。従って共振部スリットの幅が異なる周波数シフトプローブでは、電界強度が高いスリット内部でのプラズマ密度は電子温度（シース厚）によって変わり、プラズマによって生じる共振周波数のシフト量もシース厚によって異なる。

一方、後者においては、プローブの周辺媒質における実効的な誘電率が、プローブを被覆する誘電体板に強く依存する性質を用いる。プローブを被覆する誘電体板が厚くなると、周辺媒質の実効誘電率はほぼ誘電体板で決まるため、誘電体板とプラズマの間に形成されるシースの影響は小さくなり、シース厚による共振周波数に及ぼすシースの効果は極めて小さくなる。それに対して、誘電体板が薄くなると、実効誘電率に及ぼす誘電体板の影響は相対的に小さくなるため、共振周波数はシース厚によって変化ようになる。

このように共振周波数のシフト量は電子密度と電子温度の2つのパラメータによって決まることになるので、スリット幅が異なりシースに対する依存性が違う2つの周波数シフトプローブの共振周波数を用いれば、逆に未知の電子密度と電子温度を求めることができる。

シース効果を含んだプローブ特性を明らかにするため、シースを考慮したプローブモ

デルについて、有限差分時間領域 (FDTD: Finite Differential Time Domain) の電磁界シミュレーションを商用ソフトウェア (MW-Studio, CST 社製) により行い、シースを考慮しない場合との違いを調べた。また図 1 に示すような装置を用いて実験的な検証も行った。直径 315mm、高さ 220mm の円筒型ステンレス製真空容器に、 $\phi 6.35\text{mm}$ 、肉厚 0.8mm の銅パイプに絶縁被覆した 1 ターンアンテナを容器内部に設置し、13.56MHz の高周波放電によって圧力 1-20mTorr の誘導結合型アルゴンプラズマを生成した。スリット幅によりシース厚依存性を持たせる場合には、スリット幅が 1 mm および 5 mm の 2 つのプロープは、容器底面から 60mm の位置に対向させて設置し、各プロープの共振周波数はネットワークアナライザのスカラ測定で得られる反射係数スペクトルから測定した。また電子密度の真値を得るための参照用プロープとして表面波 (SW) プロープを用いた。

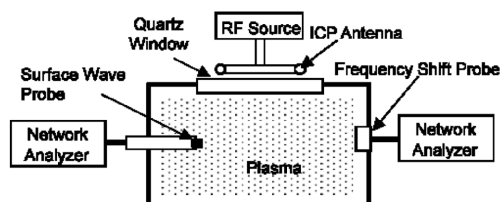


図 1 実験装置の概要

#### 4. 研究成果

(1) 共振周波数ならびに公式算出電子密度に及ぼすシースの影響

まずプロープに取り付けたマイクロ波源の周波数を変化させたときの反射係数スペクトルを、真空 (プラズマ無) の場合、プラズマ有でシースを無視 (シース幅=0 mm) した場合、プラズマ有で幅 0.2mm のシースを考慮した場合の 3 通りについて調べた。いずれの場合もある特定の周波数で反射係数が共鳴的に減少し、スリットの開放端で特に電界が強くなったことから、共振現象が生じていることがわかった。一方、プラズマがない場合には共振周波数は 1.756GHz であるのに対して、プラズマがある場合にはいずれも共振周波数は高くなった。また、プラズマがある場合でも、シースを無視したときの共振周波数は 2.347GHz であるのに対して、シースを考慮している場合には 2.260GHz と低くなっている。これは、シースが存在している場合には、スリットの内部をはじめプロープ周辺の電子密度が低くなり、プラズマによる実効的な誘電率の変化がシースを考慮しないと比べて、小さくなるためと考えられる。

次に、プロープに設けたスリットの幅をパラメータとして、シース幅  $d$  に対する共振周波数の依存性を調べたところ、いずれのスリット幅においても、シース幅が大きくなるにつれて共振周波数は低くなっていくが、スリット幅を大きくした方が、シース幅に対する共振周波数の減少の割合が小さくなっていることがわかった。スリット幅が大きくなると、シース幅増加しても、スリット内の平均的なプラズマ密度はあまり低くならないため、プラズマによる共振周波数のシフト量も相対的に小さくなったと考えられる。またスリット幅が 1 mm の場合、シース幅に対する共振周波数の変化の割合は、シース幅が 0.45-0.5 mm 付近以上で緩やかになった。シース幅が 0.5 mm 以上になると、スリット内部は常にシースが占めている状態となり、プラズマの有無により生じる実効的な誘電率の変化が小さくなったためと考えられる。

一方、シースがない時の電子密度は、上記で得た共振周波数を用いて一義に求めることが出来る。それを公式算出電子密度と定義し、そのシース幅依存性を図 2 に示す。シース幅が 0 mm の場合、スリット幅に関わりなく、シミュレーションで与えた設定電子密度 ( $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ) と同じ値となっており、公式電子密度の妥当性が示唆されている。それに対して、シースが存在してシース幅が厚くなると、公式算出電子密度は設定電子密度よりも低く見積もられている。しかし、スリット幅が狭いプロープ (slit1) に比べて、スリット幅 (slit5) が大きいプロープの方が、シース幅の増加に伴う公式算出電子密度の減少割合が小さくなっており、これは、スリット幅が広い周波数シフトプロープの方がシースの影響を受けにくいことを示唆している。

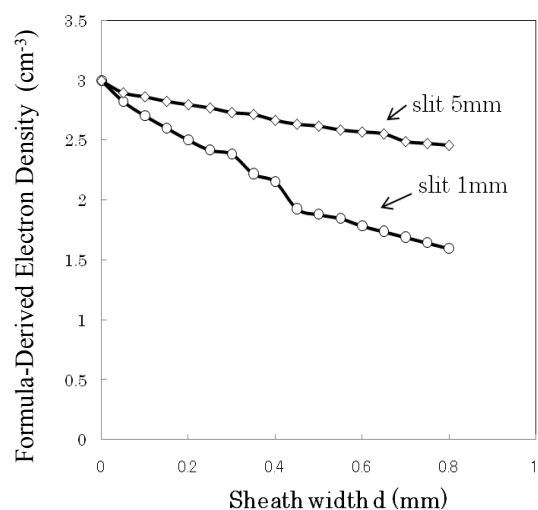


図 2 スリット幅をパラメータとした公式算出電子密度に及ぼすシース幅の影響

## (2) 表面波プローブとの比較による検証

スリット幅が異なる2つの周波数シフトプローブを用いて、アルゴンガス圧力を3mTorr一定で、放電パワーを200W~500Wと変化させて生成した誘導結合型プラズマの電子密度を、公式算出電子密度として算出し、参照用表面波プローブで得たデータと比較した。

図3に示すように、表面波プローブ、スリット幅1mmおよび5mmの2つの周波数シフトプローブとも、電子密度の算出値は放電パワーと共に増加している。しかし、表面波プローブで得た電子密度の値に比べて、いずれのスリット幅の周波数シフトプローブとも電子密度は低く見積られており、スリット幅が1mmの場合約20%、スリット幅が5mmの場合は約10%程度低く算出された。即ち、スリット幅が広い周波数シフトプローブは、スリット幅が狭い周波数シフトプローブより表面波プローブの測定結果と近くなっており、周波数シフトプローブのスリット幅を広くすると、より真値に近い値となる。

これらのことから、スリット幅が大きい周波数シフトプローブを用いると、表面波プローブで求めた電子密度により近い値が算出でき、シミュレーションで得た特性によく一致した。従って、周波数シフトプローブのスリット幅を大きくすることは、シースの影響を抑制して測定精度の向上に有効であることが示唆された。

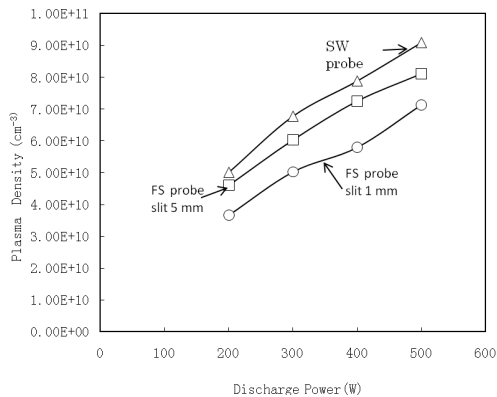


図3 表面波プローブおよび周波数シフトプローブ（スリット幅：1mm, 5mm）で得られた電子密度の放電パワー依存性

## (3) 電子温度計測への拡張

スリット幅が1mmと5mmの2つの周波数シフトプローブでは、共振周波数に対するシース厚依存性が異なることから、それらの周波数シフトプローブを用いて電子温度の算出を試みた。図4に求めた電子温度の放電パワー依存性を示す。なお参照用プローブとしてラングミュアプローブを用いた。

放電パワーによらず、ラングミュアプロー

ブおよび周波数シフトプローブ（FS Probe）とも、電子温度として約4-5 eV程度で一定となり、両者は比較的よく一致していることがわかる。そのことから、シース厚依存性が異なる2つの周波数シフトプローブにより電子温度を算出できることがわかった。

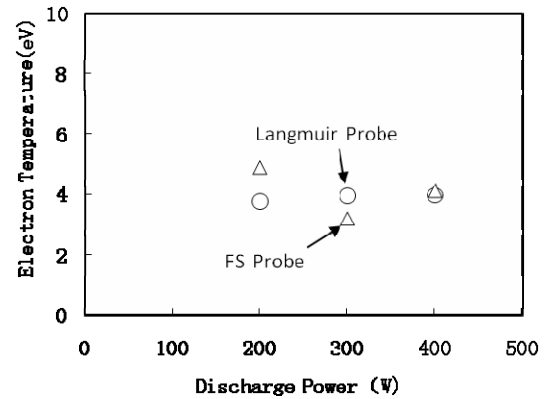


図4 ラングミュアプローブおよび周波数シフトプローブで得られた電子温度の放電パワー依存性

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計6件）

① Y. Guo, K. Nakamura and J. Zhang, Y. Nakano and H. Sugai: Observation of Optical Fluorescence of GaN Thin Films in an Inductively-Coupled Plasma Containing High Energy Electrons Jpn. J. Appl. Phys. 50(2010) 01AA02\_1 査読有

② J. Xu, J. Shi, J. Zhang, Q. Zhang, K. Nakamura and H. Sugai: Advanced high-pressure plasma diagnostics with hairpin resonator probe surrounded by film and sheath: Chinese Physics B, 29 (2010) 075206-1 - 075206-7. 査読有

③ 中村圭二, 張祺, 菅井秀郎: 反応性プロセスングプラズマにおける電子密度測定用平板型マイクロ波共振器プローブとシース効果: 電気学会論文誌 A, 130(2010), 930-934 査読有

④ J. Xu, K. Nakamura, Q. Zhang and H. Sugai: Simulation of Resistive Microwave Resonant Probe for High Pressure Plasma Diagnostics: Plasma Sources Science and Technology 28(2009) 045009-045018 査読有

⑤ K. Nakamura, Q. Zhang and H. Sugai: Extension of Frequency Shift Probes for

Monitoring of Electron Temperature: Proc. 30th international symposium on dry process (2008) 181-182. 査読有

⑥ K. Nakamura: Application of Droplet-Free Metal Ion Source to Formation of Gas Barrier Thin Films: Physica Status Solidi c 5(2008) 887-892 査読有

[学会発表] (計 5 3 件)

① I. Liang, K. Kato, K. Nakamura and H. Sugai: Electron Density Measurement by Novel Frequency Shift Probe: 3rd Int. Symp. Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (Nagoya, Japan) 2011年3月7日

② E. Kumazaki, K. Nakamura and H. Sugai: Miniaturization of Plane-Type Microwave Resonator Probe: 3rd Int. Symp. Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (Nagoya, Japan) 2011年3月7日

③ K. Nakamura: Investigation on Frequency Shift Probes for Monitoring of Electron Conditions in Nano-Materials Processing Plasmas: Int. Symp. Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation, and Advanced Materials Development and Integration of Novel Structured Metallic and Inorganic Materials in conjunction with Symposium on the research Activities of Joint Usage/Research Center on Joining and Welding (Visual-JW2010) (Osaka, Japan) 2010年11月12日 招待講演

④ Q. Zhang, K. Nakamura and H. Sugai: Plasma Electron Monitoring with Multi-Resonator Frequency Shift Probe: 2nd International Symposium on Advanced Plasma Science and its Application for Nitrides and Nanomaterials (Nagoya, Japan,) 2010年3月7~10日

⑤ K. Nakamura, Q. Zhang and H. Sugai: Influence of Sheath on Measurement of Electron Density in Frequency Shift Probe and its Application to Measurement of Electron Temperature: American Vacuum Society 56th Int. Symp. and Exhibition (AVS-56) (San Jose, U. S. A.,) 2009年11月8~13日

⑥ K. Nakamura, Q. Zhang and H. Sugai: Sheath Effects on Electron Density Measurements in Frequency Shift Probe and their Application to Electron Temperature Measurements: 62nd Gaseous Electronics Conference (GEC2009) (Saratoga, U. S. A.,) 2009年10月22~25日

⑦ Q. Zhang, K. Nakamura and H. Sugai: Influence of Polymer Deposit on Electron Monitoring with Frequency Shift Probes: 1st Int. Symp. Advanced Plasma Science & its Applications (ISPlasma2009) (Nagoya, Japan) 2009年3月8日

⑧ K. Nakamura and H. Sugai: Development of Electron-Based Plasma Monitoring for Precise Control of Plasma Process 1st Int. Symp. Advanced Plasma Science & its Applications (ISPlasma 2009) (Nagoya, Japan, 2009) 2009年3月8日

⑨ K. Nakamura, Q. Zhang and H. Sugai: Monitoring of Electron Density with Frequency Shift Probes in Reactive Processing Plasmas: 2nd Int. Conf. Plasma-Nano Technol. & Sci. (IC-PLANTS2009) (Nagoya, Japan) 2009年1月22日

⑩ K. Nakamura, Q. Zhang and H. Sugai: Development of Frequency Shift Probes for Monitoring of Electron Density in Reactive Nano-Materials Processing Plasmas: IUMRS International Conference in Asia 2008 (IUMRS-ICA 2008) (Nagoya, Japan) 2008年12月9日 招待講演

⑪ K. Nakamura, Q. Zhang and H. Sugai: Effects of probe shape on electron density measurements with frequency shift: 14th International Congress on Plasma Physics (Fukuoka, Japan) 2008年9月11日

他 4 2 件

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 圭二 (NAKAMURA KEIJI)

中部大学・工学部・教授

研究者番号: 20227888

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

菅井 秀郎 (SUGAI HIDEO)

中部大学・工学部・教授

研究者番号: 40005517