

博士学位論文審査要旨

2018年 2月 13日

論文題目: Development of an Electron Cyclotron Resonance Plasma Source with an Internal Antenna for Carbon Film Deposition

(炭素膜蒸着用内部アンテナを用いた電子サイクロトロン共鳴プラズマ源の開発)

学位申請者: CAMILLE FAITH PASCUA ROMERO

審査委員:

主査:同志社大学大学院理工学研究科 教授 和田 元
副査:東北大学 名誉教授 笹尾 眞實子
副査:同志社大学大学院理工学研究科 准教授 佐藤 祐喜

要 旨:

機能性薄膜材料を生成する有力な方法として、プラズマ支援化学気相堆積法 (PECVD 法) が用いられており、またそのためのプラズマ生成法として電子サイクロトロン共鳴 (ECR) が利用される場合が多い。これは他のプラズマ励起方法と比較して、低温度で不純物の少ないプラズマ生成が可能となるためであるが、大気側から大電力マイクロ波を供給する際に適切な誘電体を冷却した状態で用いる必要があり、プラズマ励起効率が不十分となるという問題があった。本研究は、機能性炭素薄膜を PECVD 成長させる場合の ECR 励起アンテナの材料に炭素を用いることにより、薄膜成長に好ましいプラズマ生成が可能か、またアンテナの炭素が炭素薄膜生成の際の炭素源として利用可能かについて調査した結果をまとめている。論文ではプラズマを ECR 励起する方法について概説した後、誘導性結合と容量性結合により生成されるプラズマに対して、適切な成膜を実現するプラズマ変数について調査した結果を述べ、実際に設計・製作した装置の設計思想と動作原理について説明している。実験結果ではアンテナからの距離に応じたプラズマ変数の違いや、励起アンテナ構造が生成されたプラズマの空間分布に与える影響などについて独自の手法を用いて検討し、また炭素アンテナから炭素が供給される可能性と、関与する基礎過程について調査した結果を報告している。最終的にプラズマ安定性についての考察と併せて判断し、考案したアンテナが PECVD 法用プラズマ励起に適していると結論づけている。

本論文は、生成薄膜材料と同一材料で構成されたプラズマ含侵型アンテナ素材を利用することにより、不純物の少ない薄膜を形成できる ECR 励起プラズマ堆積法が実現可能であることを実証した。この独自の発想に基づくプラズマ励起法を採用すれば、長時間の安定したプラズマ励起が可能となるものと期待され、本研究成果は高い実用化可能性を有するものと判断される。よって本論文は博士 (工学) (同志社大学) の学位論文として十分価値のあるものと認める。

総合試験結果の要旨

2018年2月13日

論文題目: **Development of an Electron Cyclotron Resonance Plasma Source with an Internal Antenna for Carbon Film Deposition**
(炭素膜蒸着用内部アンテナを用いた電子サイクロトロン共鳴プラズマ源の開発)

学位申請者: **CAMILLE FAITH PASCUA ROMERO**

審査委員:

主査:同志社大学大学院理工学研究科 教授 和田 元
副査:東北大学 名誉教授 笹尾 眞實子
副査:同志社大学大学院理工学研究科 准教授 佐藤 祐喜

要 旨:

本論文の提出者はフィリピン大学ディリマン校理学研究科物理学専攻修士課程(M. Sc.課程)を2012年6月に修了後、2012年9月に本学理工学研究科電気電子工学専攻博士課程(後期課程)に入学し、2015年9月に単位取得退学した。その後論文執筆と研究成果発表を継続し、2017年11月に学位審査のため、論文を提出した。

本論文の内容の一部は、*Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, Art. No. 01AA04(2018), *Proceedings of the Plasma Conference 2014*, Art. No. 18PB-102(2014), フィリピン物理学会会議抄録 *Samahang Pisika ng Pilipinas, SPP2013-1C-6*(2013)の他、同志社大学理工学研究 Vol. 56, No. 1, 1-6(2015), 同 Vol.57, No.1, 41-46(2016)に掲載され、既に十分な評価を得ている。2018年2月3日午後三時より二時間に亘り、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれた。講演後種々の質疑が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。公聴会終了後、審査委員による学力確認のための口頭試験を実施したところ、論文提出者の十分な学力を確認することができた。タガログ語を母語とする提出者の語学力については、国際会議や日本応用物理学会などに第一著者として論文を提出して自ら発表を行っているのに加え、博士論文公聴会の序論部分を日本語で説明するなど、提出者の十分な能力を確認できた。以上、論文提出者の専門分野における学力、並びに語学力は十分であることを確認した。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： Development of an Electron Cyclotron Resonance Plasma Source with an Internal Antenna for Carbon Film Deposition
(炭素膜蒸着用内部アンテナを用いた電子サイクロトロン共鳴プラズマ源の開発)

氏名： CAMILLE FAITH PASCUA ROMERO

要旨：

Electron cyclotron resonance (ECR) sources are of great interest in materials processing due to their capacity to produce high-density, low-potential plasmas at low gas pressures. Microwave power is typically coupled to the resonance zone across a dielectric window. However, with dielectric windows, issues of contamination and accumulation of sputtered materials require frequent cleaning and maintenance of the plasma source. In addition, large-area materials processing demands for a thick dielectric window which can reduce the power transfer efficiency to the plasma. For this reason, a “windowless” high-density ECR source which couples microwave to the plasma using an internal antenna was developed in this study. Series of experiments were done to investigate the novel use of an internal antenna made of carbon material in coupling microwave power to ECR plasmas used for carbon film deposition.

The brief introduction given in chapter 1 is followed by a theoretical background in chapter 2 which covers ECR plasma excitation, microwave propagation and power absorption in magnetized plasmas. Chapter 3 gives detailed descriptions of the experimental materials and methods used to excite and evaluate the ECR plasmas.

Chapter 4 focuses on the performance of metal internal antennas in microwave coupling and ECR plasma generation. Microwave absorption was assessed by monitoring the reflected and transmitted powers simultaneously. Plasma parameters such as electron density, electron temperature and plasma potential were obtained using Langmuir probe analysis. The effects of antenna structure and configuration on plasma parameters and properties were investigated in various magnetic profiles. Good microwave coupling was obtained with insulated spiral antennas with fewer turns positioned about half the microwave free-space wavelength from the coaxial connector. Strong electrostatic coupling between the antenna and the plasma was reduced by shielding the connector and the antenna stem. Consequently, the connector shielding caused a low-density mode over a short range of magnet current, and a stable high-density mode at higher currents. The occurrence of a low-density mode is attributed to the transition of power coupling from inductive to capacitive mode.

Chapter 5 discusses the effects of experimental parameters, antenna structure and magnetic configuration on the properties of plasmas produced using carbon internal antennas. The position of the resonance zone relative to the antenna geometry was found to be the key factor that affects the plasma density and uniformity. Based on quantitative and

qualitative characterizations, a coaxial-type carbon antenna demonstrates more efficient power transfer and sustains more stable and uniform plasmas, compared to a spiral-type carbon antenna.

Chapter 6 presents the performance of the ECR plasma system in hydrocarbon emission and carbon film deposition. Local-in situ diagnostics such as quadruple mass analysis (QMA) and non-invasive diagnostics like optical emission spectroscopy (OES) were used to characterize plasmas species both in ground and excited states. As observed, the ECR system requires remote plasma excitation to increase the production of hydrocarbon radicals by chemical sputtering and reduce ion impact energy at the substrate region. The carbon coaxial antenna produced plasmas with good uniformity and sufficient CH:H and C₂:H ratios for carbon film deposition. By adding a magnetic flux return, hydrocarbon emission and plasma homogeneity were further enhanced. Carbon film was successfully formed on Si substrate by immersing a carbon target in ECR hydrogen plasma without supplying carbon precursor gas. The antenna realized stable operation for more than 5 h with 100 W input microwave power. The deposited films were characterized by using scanning electron microscope (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction analysis (XRD). As contamination from a tungsten heater and source chamber walls were detected in the films, additional carbon targets near these regions were installed, which had successfully reduced impurities on the subsequently formed films.

Finally, chapter 7 not only gives the general conclusions, but most importantly, provides the implications of the findings and recommendations for future works of improvement. These points can be strategically evaluated and employed for efficient film deposition using a plasma-immersed antenna made of a suitable material that serves not only as a microwave radiator but also a sputtering target.