

博士学位論文審査要旨

2019年 7月23日

論文題目： Physics and Engineering of Sheet Plasma Devices
(シートプラズマ装置の物理と工学)

学位申請者： Gines, Arnold Rey Burgos

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： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 粕谷 俊郎

副査： 東北大学 名誉教授 笹尾 真実子

要 旨：

プラズマ表面処理や薄膜形成に用いられるシートプラズマ装置には、タングステン等の高融点金属により構成された、熱陰極がプラズマ励起機構として用いられる場合が多い。金属不純物が問題となる半導体製造プロセスにおいては、プラズマ生成に電子サイクロトロン共鳴(ECR)を用いることが好ましいが、強度の高い ECR 磁場によってシート形状プラズマを生成すると装置が大型化し、空間的に均一な電子密度分布を実現することが困難となる。本論文は、永久磁石と ECR 条件の半分程度の強度の直線状弱磁場を組み合わせることにより、2.45 GHz マイクロ波によってシートプラズマを生成・保持する装置の設計を行い、その性能評価試験を実施した結果についてまとめている。直線磁場を用いたマイクロ波プラズマ励起における最も大きな課題は、磁力線に沿ってマイクロ波電力導入部分に高温プラズマが輸送され、導入部分に入熱が集中して破損が生じることである。この問題に対して、論文提出者は局所ガス放出による冷却が有効なことを示し、マイクロ波電力 2 kW を 0.7 cm × 11 cm の導入窓を通してプラズマに結合させ、マイクロ波カットオフを大きく超える 10^{12} cm^{-3} の高電子密度を実現することに成功した。また、熱陰極型のシートプラズマを運転してそのプラズマ特性を調査し、熱陰極使用時に高エネルギー成分が電子エネルギー分布関数に観測されるのに対し、マイクロ波励起によるシートプラズマでは電子が熱化していることを示した。そこでプラズマ励起対向側にバイアス電極を設置し、これを正電位に保持することにより高速電子が生成可能であることを示し、本手法のマイクロ波励起プラズマへの適用可能性を提案した。

本論文は、電子サイクロトロン共鳴と局所ガス放出を組み合わせることによって、マイクロ波導入部分への加熱を抑えた形で kW 級入力 of 電力を注入することが可能であることを示し、実際の工業プロセスに適用可能な高電力密度シートプラズマを安定に維持できることを世界で初めて実証した。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な価値を有するものと認める。

総合試験結果の要旨

2019年 7月23日

論文題目： Physics and Engineering of Sheet Plasma Devices
(シートプラズマ装置の物理と工学)

学位申請者： Gines, Arnold Rey Burgos

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： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 粕谷 俊郎

副査： 東北大学 名誉教授 笹尾 真実子

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を2013年5月に修了し、Far Eastern 大学、フィリピン工業院に奉職した後、2016年10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、現在、在籍中である。

本論文の内容の一部は、Plasma and Fusion Research, Vol. 14, Art. No. 3401085 (2019)、Proceedings of the 10th ISET, Kyoto (2016) に掲載され、既に十分な評価を得ている。また博士課程在学期間中、日本応用物理学会を含む6件の国際・国内会議にて口頭・ポスター発表を行っている。2019年7月20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、論文提出者は質問に対する的確に回答し、十分な学力を有すると確認することができた。論文提出者の母語はタガログ語であるが、全ての研究成果の発表を英語で行っており、さらに学位論文の内容の一部を日本語で説明するなど、英語とともに日本語の語学力も有するものと判断された。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と確認された。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士学位論文要旨

論文題目： Physics and Engineering of Sheet Plasma Devices
(シートプラズマ装置の物理と工学)

氏名： ARNOLD REY BURGOS GINES

要旨：

Sheet plasmas have the advantage of producing thin films and functional surfaces by generating localized high-density and temperature gradient regions suitable for specific reactions. A stream of high energy electrons from a plasma cathode efficiently excites and/or ionizes atomic and molecular species which are confined in a linear magnetic field. An electron cyclotron resonance (ECR) sheet plasma device employing a 2.45 GHz microwave source and combination of permanent magnets and field coils was designed and operated. The combined field realized a linear magnetic field that sustained a rectilinear confinement of the plasma.

In Chapter 1, a brief introduction is provided to give a short background on the current theoretical understanding of magnetized sheet plasma devices. Chapter 2 focuses on the device description and initial conditions of the generated plasma. The design of the whole system was explained. In addition, techniques for plasma diagnostics and analysis of the plasma discharge were described.

In Chapter 3, a more detailed description of the plasma discharge was carried out. Using Langmuir probe, the plasma was analysed to understand its behaviour relative to different operating parameters and vacuum conditions. ECR condition was achieved using the combined field from permanent magnets and field coils. The overall performance of the plasma operated at sub-ECR and ECR conditions were compared.

A localized heating in the microwave inlet region was observed under high power operation which limits the device performance under certain operation conditions. A local gas injection was designed to supply gas directly to the cathode region to the study the effect of cooling the quartz window. In Chapter 4, the device performance with the new gas inlet design was compared with that of the usual gas introduction directly to the main chamber. Particularly observed was the stable and longer operation time in the “local gas injection” mode up to 3 kW microwave power. Plasma parameters were observed in Chapter 5 with consideration of the effect of the magnetic field while operating with the local gas injection. The effect of the applied magnetic field to the plasma profile using electron temperature, electron density, plasma potential, floating potential and ion saturation was described in more detail. Images of the plasma was used to support observation made from plasma parameters. Meanwhile, low frequency plasma instabilities were observed at

high magnetic flux density and was briefly discussed.

In Chapter 6, observation of high energy electrons in a hot cathode-type sheet plasma was presented. A plasma cathode excited a millimetres thick sheet plasma throughout a 92 cm long chamber in a 270 G linear static magnetic field. Electron energy probability functions measured for Ar plasmas by an electrostatic probe indicated the presence of high energy electrons in the produced plasma. The high energy electron component occupied the substantial part of the electron energy distribution function at lower plasma operating pressure. Electrical bias voltage applied to the electrode terminating the plasma flow determined the plasma space potential.