

# 博士学位論文審査要旨

2017年2月17日

論文題目： Development of Gerdien condenser for Atmospheric Pressure Plasmas

(大気圧プラズマ診断用ゲルディエンコンデンサの開発)

学位申請者： Ma Camille Corrales Lacdan

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： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 吉門 進三

要 旨：

ゲルディエンコンデンサーは成層圏のイオン密度測定用に開発されたもので、ロケットや気球に搭載し、希薄大気中のイオン密度を測定する使用法が前提であったため、地上環境での経時劣化などの詳細な特性変化についての研究がこれまでになされたと言う報告は無い。本論文は、地上実験室環境下で生成された大気圧グロー放電プラズマの密度と移動度の計測を、ゲルディエンコンデンサーを用いて行うことが可能であるかについて行った調査結果について報告している。

論文では大気圧プラズマ計測研究を行う上で必要となる、大気圧イオン源の設計・製作・性能評価を行っている。特に 1 kHz 以下の低周波イオン源は大きな雑音電力を放出するため、微小電流の計測を必要とするプラズマ診断法には不向きであることを明らかにした。13.56 MHz 高周波電力を用いたプラズマ源を用いた測定では、ゲルディエンコンデンサーを用いたプラズマ計測に影響を与える因子を洗い出し、大気圧グロー放電を可能とするために用いられるガス流が計測結果に大きな影響を与えることを見出した。もう一つの重要な要因としてイオン密度を測定するために用いる電極表面状態に着目し、電極金属の種類としてアルミニウム、銅、ニッケルを選択して大気中研磨後の時間に応じ、イオン電流信号がどのように変化するかを測定した。その結果、電極材料に応じて、測定電流値が数 10% 変化することを示し、これまでの「電極材料によって計測電流は変化しない」という常識を大きく覆す結果を提出した。しかしながら、各イオン種の移動度と移動度毎のイオン密度の形で表した移動度スペクトルとして整理した場合、電極材料が与える影響は補正が可能な程度のものであった。このことから、十分な注意を払えばゲルディエンコンデンサーを用いた大気圧プラズマ計測技術の開発が可能であると結論付けている。

論文ではさらに電界強度分布や、大気流速分布などの数値計算を行い、今後のより詳細な研究を進める上での指針について検討を加えており、本計測手法の将来的な発展についての議論も展開している。以上、本論文は大気圧プラズマ研究の標準的な計測手法と成り得る提案を行っており、その学術的価値は博士（工学）同志社大学の学位論文として十分高いものと認める。

## 総合試験結果の要旨

2017年2月17日

論文題目： Development of Gerdien condenser for Atmospheric Pressure Plasmas

(大気圧プラズマ診断用ゲルディエンコンデンサの開発)

学位申請者： Ma Camille Corrales Lacdan

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： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 吉門 進三

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11月に終了、フィリピン大学ディリマン校 Research Specialist, Research Associateとして2013年11月まで研究活動に従事した。その後フィリピン海洋学術院の講師を2014年3月まで勤めた後、2014年4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)に入學し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は Plasma and Fusion Research, article number 2401015 (2016), 及び Plasma and Fusion Research, article number 1401121 (2016)に掲載されて、既に十分な評価を受けている2017年1月28日午後1時半より二時間に亘り、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。また国際会議に第一著者として五件の論文を提出して自ら英語で発表を行っているのに加え、博士論文の公聴会の前半を日本語で説明するなど、十分な語学力を有するものと認められた。以上論文提出者の専門分野における学力、なら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 Gerdien condenser for Atmospheric Pressure Plasmas  
(大気圧プラズマ診断用ゲルディエンコンデンサの開発)

氏名: Ma Camille Corrales Lacdan

要旨:

Plasma diagnostics plays an important part in understanding the role of charged particles during plasma processes. However, since common plasma diagnostic techniques are limited to low-pressure case, there is a need for the development of a new diagnostic method specifically for atmospheric pressure plasma characterization. In this study, a diagnostic technique based on the theory of Gerdien condenser method is developed for laboratory-produced atmospheric pressure plasma. The Gerdien condenser, which is a classical instrument employed in atmospheric science, is capable in measuring the ion mobility and density from an obtained current-voltage (I-V) characteristics.

In Chapter 2, two atmospheric plasma sources are made operational using a 13.56 MHz RF power supply. The developed atmospheric plasma sources exhibit a dense and a dilute plasma plume due to the difference in device configurations. The plasma plume produced by the compact atmospheric-pressure plasma devices are qualitatively examined using common diagnostic technique, specifically using optical emission spectroscopy and plasma glow image analysis. The length of the plasma plume produced by the needle-shaped electrode configuration is observed to be directly dependent to the input parameter up to a certain value where saturation of plasma plume length is attained. On the other hand, the plasma plume produced by the capacitively-coupled configuration is very dilute and possesses filamentary structures. The effect of input parameters such as gas flow rate and input power is unobservable if only Ar gas is introduced into the system. The employment of N<sub>2</sub> swirl gas into the dilute plasma stabilizes the plasma flow out of the capacitively-coupled device yielding a more homogeneous and stable plasma plume. Visible range optical emission spectrum show increase in excited nitrogen species while Ar excited species decreases against an increased flow rate of N<sub>2</sub> swirl gas.

The principle of operation and data analysis of the Gerdien condenser method is presented in Chapter 3. In Chapter 4, the applicability of a miniaturized pointed inner electrode Gerdien condenser as a diagnostic tool for atmospheric-pressure plasma is examined. Atmospheric pressure plasmas were generated at 25 W by supplying Ar as main gas and N<sub>2</sub> as swirl gas both with the flow rates of 3 liters per minute using the capacitively-coupled configuration. The ion mobilities calculated from the I-V characteristics were identified to be those of O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, Ar<sup>+</sup>, and N<sub>2</sub><sup>+</sup>. The ion densities for varying pen-to-inlet distance were determined to be in the range from  $8 \times 10^5$  to  $2 \times 10^7 \text{cm}^{-3}$ .

An improved version of the miniaturized Gerdien condenser is designed,

tested and developed as discussed in Chapter 5. The previous Gerdien condenser design is capable of determining the ion density and mobility, thus ion species composition of the plasma. However, further improvements are done in order to minimize the effect of noise to the signal. The new device has a 1.0 cm diameter, 6.0 cm long cylindrical current collector electrode mounted on a bias electrode of 1.7 cm inner diameter. The new instrument also employs an aluminum-made rectangular box which acts as the electrostatic shield from unwanted noise. It is concluded the shielded Gerdien condenser yielded improved data measured in terms of the reduction of noise contribution to the signal. Two atmospheric plasma sources producing dense and dilute plasma are studied using the new version of the Gerdien condenser. Same ion mobilities are detected for both atmospheric pressure plasma sources.  $O^-$ ,  $O^+$ ,  $O_2^-$ ,  $O_2^+$ ,  $Ar^+$  and  $N_2^+$  are assumed to be present in the plasma through the analyzed I-V characteristics. The density of the plasma produced by the needle-shaped electrode configuration yielded more than twice of that detected from the capacitively-coupled setup.

The effect of the flow rate of the fan attached at the end of the condenser is investigated by setting the fan flow from 1.9 to  $7.5 \times 10^2 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ . The increase in air flow rate on the Gerdien condenser resulted in a decrease in ion density due to possible enhancement of neutral-ion recombination.

Effects due to kind of materials used for the collector electrode of a Gerdien condenser upon the current-voltage characteristics are also presented in Chapter 6. Aluminum, copper and nickel electrodes were initially polished and cleaned and the I-V characteristics were recorded with 15-minutes interval under exposure to ambient air. Results showed that the zero-crossing voltage in the I-V curve shifted toward negative electrical potential, while the saturation current decreased in accordance with the passage of time. The electrode surfaces showed clear change in the color after operation. Ion mobilities and ion species concentrations were determined from the measured I-V characteristics and they indicate sizable difference by the electrode aging effect. The aluminum electrode showed stable positive and negative saturation currents within 180 minutes, however the saturation current decreased down to 50% of the initial value.

The edge effect to the current-voltage characteristics of the Gerdien condenser is studied through simulation in order to explain the signal current reduction at higher voltage in the I-V characteristics. Although results show that the predominant factor on the decrease in measured current is not the edge effect, further investigation is still needed to confirm the air velocity inside the conduit as well as the possible effect of space charge and neutral-ion recombination contribution to the measurement.