DEVELOPMENT OF DIAGNOSTICS FOR CHARACTERIZING ELECTRON HEATING MECHANISMS IN LOW-PRESSURE RF DISCHARGES

ARTI RAWAT

DEPARTMENT OF ENERGY SCIENCE AND ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2021

©Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2021

DEVELOPMENT OF DIAGNOSTICS FOR CHARACTERIZING ELECTRON HEATING MECHANISMS IN LOW-PRESSURE RF DISCHARGES

by

Arti Rawat

Department of Energy Science and Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy

to the

Indian Institute of Technology Delhi

October 2021

Dedicated to ….

… My Loving Family…

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled, "**Development of Diagnostics for Characterizing Electron Heating Mechanisms in Low-Pressure RF Discharges**", submitted by **Ms. Arti Rawat**, to the Indian Institute of Technology, Delhi for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a bonafide record of the research work done by her under our supervision. The contents of this thesis, in full or in parts, have not been submitted to any other Institute or University for the award of any degree or diploma.

Prof. R. Narayanan

Department of Energy Science and Engineering

IIT Delhi, New Delhi – 110016

India

Prof. A. Ganguli

Department of Energy Science and Engineering

IIT Delhi, New Delhi – 110016

India

ACKNOWLEDGMENTS

Undertaking this Ph.D. has been a truly life-changing experience for me and it would not have been possible to do without the support and guidance that I received from dozens of remarkable individuals.

First and foremost, I wish to express my greatest appreciation towards my Ph.D. supervisor, **Professor Ashish Ganguli** for his invaluable supervision, continuous support, and patience during my Ph.D. study. His unwavering enthusiasm for experimental and theoretical physics kept me constantly engaged with my research. He has been a tremendous mentor who responded to my questions and queries so promptly. Without his persistent help, the goals of this thesis could not have been realized.

I would also like to express my gratitude to my supervisor **Professor Ramesh Narayanan**, for lending me his expertise and intuition to my scientific and technical problems. His prompt inspirations and timely suggestions have enabled me to complete my thesis. Special thanks to him for his constant support since the beginning of this journey.

It is my privilege to thank **Professor R. D. Tarey** for his treasured support which was really influential in shaping my experimental methods. I am grateful to him for providing me necessary technical suggestions during my research pursuit. His enthusiasm and love for experimental research is contagious.

I thank profusely to **Mr. A. J. Josekutty** for his valuable and constructive suggestions during the planning and development of experimental work. His willingness to give his time so generously to all students has been very much appreciated.

I would like to thank my friends, colleagues, and research team – **Anshu Verma**, **Prashant Kumar Barnwal, Priti Singh**, **Shweta Sharma,** and **Mahreen**, with whom I have shared moments of anxiety but also of big excitement. My time at IIT Delhi has been highly productive while working with you all. I greatly look forward to having all of you as colleagues in the years ahead. I am also grateful to **Dr. G. Veda Prakash**, Post Doc Fellow in Plasma Lab, IIT Delhi for sharing his research expertise and for providing unceasing encouragement through the process of researching.

Words fail to express my heartfelt gratitude to my elder brother **Dr. Abhishek Juyal**, for his presence, moral support and encouragement during my Ph.D. Every time I was ready to quit, you did not let me, and I am forever grateful to you for that. I am also grateful to my childhood friends who supported me indirectly through this venture.

I extend my sincere thanks to Mr. Sunil Bhogal (Bhogal Precision Limited) for the fabrication work undertaken by him. I am very much thankful to the MHRD, India for the Ph.D. scholarship.

Last, but certainly not least, I would like to thank my family. None of this could have happened without my father **Mr. Ranvir Singh Rawat** and mother **Mrs. Kusum Rawat**. Your prayer for me was what sustained me thus far. I am extremely thankful to my elder brother **Mr. Vijay Rawat** and my sister-in-law **Mrs. Seema Rawat** for their ongoing love and support. And finally, my dearest nephew **Viraj**, you are the sweetest and luckiest thing surrounding me. This dissertation stands as a testament to the unconditional love and encouragement from you all.

Arti Rawat

ABSTRACT

Low pressure, Capacitively Coupled Discharges (CCDs) have drawn great attention for their enormous relevance in various fields of industrial applications, like deposition, etching, surface treatment, etc. In spite of being used extensively, both in industry as well as in scientific investigations, a thorough understanding of the RF power coupling to electrons in capacitive discharges, is still lacking. This lacking pertains not only to the theoretical models and simulations, but also to the experiments.

In this regard the work in this thesis is concerned with characterizing RF power absorption mechanisms in parallel plate capacitive discharges. At low to moderate pressures and low RF powers, the two competing mechanisms are the stochastic mechanism and the Ohmic mechanisms. Of these, the former is a nonlinear process that is most efficient at low pressures whereas the latter is effective mainly at high pressures (up to ~1000 mTorr). While the nonlinear stochastic process is expected to take place at the sheath at the powered electrode where the RF fields are strong, the Ohmic mechanism is expected to occur in the plasma bulk. Thus one has two kinds of variations here. The first is concerned with the changes in power absorption with increasing pressure (from low to high). The second is the shift in the nature of power absorption as one scans power absorption along the length of the system from the powered electrode into the plasma bulk. It is one of the aims of the thesis to undertake profiling of fundamental RF power absorption along the system length with respect to the pressure.

Now, because the stochastic mechanism is nonlinear, it is capable of producing harmonics of the applied RF frequency. Thus one may use the frequency and power spectrum of the harmonics as a tool to characterize, understand and fine-tune the models and simulations pertaining

to the stochastic process, since this process is not fully understood even today. Thus the changes in the frequency and power spectrum harmonics would reflect correspondingly, the changes in the stochastic process. As a consequence, a second goal of this thesis is to develop techniques for the accurate determination of the frequency and power spectrum of the harmonics.

Considerable insight into harmonic characterization may be gained from *an RF equivalent circuit for harmonics, represented as a lumped RF voltage source* $V_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{pl}}$ *that is connected via its internal impedance to the load in the external RF circuit. Therefore, to characterize the harmonics one needs to characterize the voltage source, its internal impedance, as well as determine how much power the source can deliver into the external circuit.* For undertaking such characterization one needs to *measure harmonic power from both within and outside the discharge*. The measurements within the discharge would help *identify the regions of harmonic production by the stochastic process and the regions of their absorption by the Ohmic mechanism*. On the other hand, the measurements of harmonic power in the external RF circuit complement those in the plasma interior. Together, the two measurements would enable one to determine the total harmonic power spectrum across a wide range of pressures. It is to consolidate these ideas and illustrate the efficacy of the suggested measurements that this thesis undertakes a detailed investigation of Capacitively and Directly Coupled (parallel plate) Discharges using a novel set of diagnostics and a simple analytical model.

Towards the above goal, the plasma parameters were measured and preliminary characterization of RF harmonics was undertaken over a wide pressure range (0.6 – 1000 mTorr at 10 W RF power) using a compensated LP (CLP), Capacitive Probe (CP), and an Uncompensated Floating LP (UFLP). The CLP was used for plasma parameter measurement whereas the CP and UFLP were used for measuring the oscillations at the RF fundamental and its harmonics (at 13.56,

27.12, and 40.68 MHz). To correlate these to the stochastic (P_{Stoch}) and Ohmic (P_{Ohm}) power absorption mechanisms, an effective power $P_{\mathrm{eff}} = P_{\mathrm{Stoch}}^{\rho} \times P_{\mathrm{Ohm}}^{1-\rho}$ (ρ is a pressure dependent parameter), was defined. It is possible to tune ρ so as to match P_{eff} closely with the normalized profiles of n_e with the pressure. *Knowing P_{eff}, it is possible to determine the relative contributions of the stochastic versus Ohmic mechanisms towards plasma production at a given pressure.* Results show that plasma production is entirely due to stochastic mechanism at low pressures, whereas at higher pressures it is a mix of both mechanisms. A similar technique was applied for the analysis of the RF voltages. The analysis reveals, for instance, that for the 2$^{\mathrm{nd}}$ and 3$^{\mathrm{rd}}$ harmonics, the stochastic mechanism dominates almost exclusively up to ≈ 5 mTorr, while for higher pressures (above ≈ 200 mTorr) both Ohmic and stochastic mechanisms are present in roughly equal measure. At low pressures, where the stochastic mechanism operates almost exclusively, the contribution to the harmonics comes from the intrinsic nonlinearity of the stochastic mechanism, acting via the sheath at the powered electrode. *It may be noted though, that since the sheath at the powered electrode is present even at high pressures, harmonic production at these pressures can also proceed due to the stochastic mechanism, with the Ohmic mechanism serving to absorb the harmonic power.*

While the probes used for the above work give an insight into the correlations between power absorption and harmonics (and plasma production), these cannot determine the harmonic power produced and absorbed within the plasma. Therefore, in accordance with the program outlined above, two separate diagnostics were developed.

The first is a new diagnostic technique based on novel use of dual directional couplers (DDCs). It was developed and used to determine the harmonic (and fundamental) power in the external RF circuit. It turns out that a DDC placed between the matching network and the plasma

load can detect with ease not only the fundamental, but also the harmonics produced by the plasma. The results *reveal that highest harmonic power in the external circuit is available in the 3^rd^ harmonic* and not the 2nd, as is usually reported in various measurements. In addition, *another important result is the emergence of the 6th harmonic as the second most important harmonic in terms of power over a wide pressure range (below ~ 200 mTorr)*. Apart from these results on the measurement of harmonic power in the external circuit, it is possible to compute various other quantities of interest like the plasma impedance, VSWR, plasma reflection coefficients, etc.

To investigate and generate profiles of RF power absorption of the fundamental and to determine harmonic generation and absorption in a capacitive discharge, a new and novel probe, the $J.E$ probe, was developed from scratch. Various aspects of the probe, like its design, fabrication, calibration, and limitations were resolved before it was used for obtaining axial profiles of power absorption for the fundamental (13.56 MHz) and the 2nd harmonic (27.12 MHz). A detailed analysis of the results, shows that *even for systems with large electrode gaps, i.e., plasmas with long bulk plasma regions, practically all the fundamental power is absorbed in a narrow edge region near the powered electrode*, *irrespective of the pressure*. In the context of harmonics, the first point to notice is that both harmonic production and absorption take place close to the powered electrode. Harmonic production can be seen most clearly at low pressures where one observes a region of *monotonically decreasing absorption* as one approaches the powered electrode, indicating harmonic generation. On the other hand, the absorption profile for collisional absorption mimics that of the fundamental. Absorption is high near the RF electrode since the RF fields peak in this region.

Combining the complementary features of the harmonic power absorbed in the plasma and that available in the external circuit, one finds that the stochastic mechanism is able to generate

harmonics over a wide range of pressures indicating that it *is a highly ubiquitous mechanism in CCDs.* The cause for its ubiquitousness stems from the fact that *it is basically a sheath phenomenon and is most easily triggered when the nonlinear sheath at an electrode (like the powered electrode in a CCD) is penetrated by strong RF fields, even at high pressures, where sheath widths are small.*

To summarize, this thesis provides several new insights for unraveling the RF power coupling mechanisms in capacitive discharges, so as to enhance present understanding of these mechanisms and to guide the development of more elaborate and accurate theoretical models. It is also believed that the new diagnostic methods developed in this work would help to generate more accurate models and pave the way for a more precise control and process optimization in applications of capacitive discharges.

सार

कम दबाव, कैपेसिटिवली कपल्ड डिस्चार्ज (सीसीडी) ने औद्योगिक अनुप्रयोगों के विभिन्न क्षेत्रों जैसे निक्षेपण, नक़्क़ाशी, सतह के उपचार, आदि में अपनी व्यापक प्रासंगिकता के लिए बहुत ध्यान आकर्षित किया है। बड़े पैमाने पर उपयोग किए जाने के बावजूद, उद्योग के साथ-साथ वैज्ञानिक जांच दोनों में। , कैपेसिटिव डिस्चार्ज में इलेक्ट्रॉनों के लिए आरएफ पावर कपलिंग की गहन समझ में अभी भी कमी है। यह कमी न केवल सैद्धांतिक मॉडल और सिमुलेशन से संबंधित है, बल्कि प्रयोगों से भी संबंधित है।

इस संबंध में इस थीसिस में काम समानांतर प्लेट कैपेसिटिव डिस्चार्ज में आरएफ पावर अवशोषण तंत्र को चिह्नित करने से संबंधित है। कम से मध्यम दबाव और कम आरएफ शक्तियों पर, दो प्रतिस्पर्धी तंत्र स्टोकेस्टिक तंत्र और ओमिक तंत्र हैं। इनमें से, पहली एक गैर-रेखीय प्रक्रिया है जो कम दबाव पर सबसे अधिक कुशल है जबकि बाद वाला मुख्य रूप से उच्च दबाव (~ 1000 mTorr तक) पर प्रभावी है। जबकि नॉनलाइनियर स्टोकेस्टिक प्रक्रिया को संचालित इलेक्ट्रोड पर म्यान में होने की उम्मीद है जहां आरएफ क्षेत्र मजबूत हैं, प्लाज्मा बल्क में ओमिक तंत्र होने की उम्मीद है। इस प्रकार यहाँ दो प्रकार की भिन्नताएँ हैं। पहला बढ़ते दबाव (निम्न से उच्च तक) के साथ शक्ति अवशोषण में परिवर्तन से संबंधित है। दूसरा शक्ति अवशोषण की प्रकृति में बदलाव है क्योंकि एक शक्ति अवशोषण को सिस्टम की लंबाई के साथ संचालित इलेक्ट्रोड से प्लाज्मा बल्क में स्कैन करता है। यह थीसिस के उद्देश्यों में से एक है दबाव के संबंध में सिस्टम की लंबाई के साथ मौलिक आरएफ शक्ति अवशोषण की रूपरेखा तैयार करना।

अब, क्योंकि स्टोकेस्टिक तंत्र अरेखीय है, यह लागू आरएफ आवृत्ति के हार्मोनिक्स का उत्पादन करने में सक्षम है। इस प्रकार स्टोकेस्टिक प्रक्रिया से संबंधित मॉडल और सिमुलेशन को चिह्नित करने, समझने और ठीक करने के लिए एक उपकरण के रूप में हार्मोनिक्स की आवृत्ति और शक्ति स्पेक्ट्रम का उपयोग किया

जा सकता है, क्योंकि यह प्रक्रिया आज भी पूरी तरह से समझ में नहीं आती है। इस प्रकार आवृत्ति और पावर स्पेक्ट्रम हार्मोनिक्स में परिवर्तन संगत रूप से, स्टोकेस्टिक प्रक्रिया में परिवर्तन को प्रतिबिंबित करेगा। नतीजतन, इस थीसिस का दूसरा लक्ष्य हार्मोनिक्स की आवृत्ति और पावर स्पेक्ट्रम के सटीक निर्धारण के लिए तकनीक विकसित करना है।

हार्मोनिक लक्षण वर्णन में काफी अंतर्दृष्टि हार्मोनिक्स के लिए एक आरएफ समकक्ष सर्किट से प्राप्त की जा सकती है, जिसे एक लुम्प्ड आरएफ वोल्टेज स्रोत $V_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{pl}}$ के रूप में दर्शाया जाता है जो बाहरी आरएफ सर्किट में लोड के लिए आंतरिक प्रतिबाधा के माध्यम से जुड़ा होता है। इसलिए, हार्मोनिक्स को चिह्नित करने के लिए किसी को वोल्टेज स्रोत, इसकी आंतरिक प्रतिबाधा को चिह्नित करने की आवश्यकता होती है, साथ ही यह निर्धारित करने की आवश्यकता होती है कि स्रोत बाहरी सर्किट में कितनी शक्ति प्रदान कर सकता है। इस तरह के लक्षण वर्णन करने के लिए किसी को निर्वहन के भीतर और बाहर दोनों से हार्मोनिक शक्ति को मापने की आवश्यकता होती है। निर्वहन के भीतर माप स्टोकेस्टिक प्रक्रिया द्वारा हार्मोनिक उत्पादन के क्षेत्रों और ओमिक तंत्र द्वारा उनके अवशोषण के क्षेत्रों की पहचान करने में मदद करेगा। दूसरी ओर, बाहरी आरएफ सर्किट में हार्मोनिक शक्ति के माप प्लाज्मा इंटीरियर में पूरक हैं। साथ में, दो माप दबावों की एक विस्तृत श्रृंखला में कुल हार्मोनिक पावर स्पेक्ट्रम को निर्धारित करने में सक्षम होंगे। यह इन विचारों को समेकित करने और सुझाए गए मापों की प्रभावकारिता को स्पष्ट करने के लिए है कि यह थीसिस डायग्नोस्टिक्स के एक उपन्यास सेट और एक सरल विश्लेषणात्मक मॉडल का उपयोग करके कैपेसिटिव और डायरेक्टली कपल्ड (समानांतर प्लेट) डिस्चार्ज की विस्तृत जांच करती है।

उपरोक्त लक्ष्य की ओर, प्लाज्मा मापदंडों को मापा गया और आरएफ हार्मोनिक्स का प्रारंभिक लक्षण वर्णन एक विस्तृत दबाव सीमा (0.6 - 1000 mTorr 10 W RF पावर पर) पर एक मुआवजा LP (CLP), कैपेसिटिव प्रोब (CP), और एक का उपयोग करके किया गया। असम्पीडित फ्लोटिंग एलपी (यूएफएलपी)।

सीएलपी का उपयोग प्लाज्मा पैरामीटर माप के लिए किया गया था जबकि सीपी और यूएफएलपी का उपयोग आरएफ मौलिक और इसके हार्मोनिक्स (13.56, 27.12 और 40.68 मेगाहर्ट्ज पर) पर दोलनों को मापने के लिए किया गया था। इन्हें स्टोकेस्टिक (PStoch) और ओमिक (POhm) शक्ति अवशोषण तंत्र से सहसंबंधित करने के लिए, एक प्रभावी शक्ति $P_{\text{eff}} = P_{\text{Stoch}}^{\rho} \times P_{\text{Ohm}}^{1-\rho}$ (ρ एक दबाव निर्भर पैरामीटर है) को परिभाषित किया गया था। को ट्यून करना संभव है ताकि पेफ को दबाव के साथ n_{e} के सामान्यीकृत प्रोफाइल के साथ निकटता से मिल सके। पेफ को जानने के बाद, किसी दिए गए दबाव पर प्लाज्मा उत्पादन की दिशा में स्टोकेस्टिक बनाम ओमिक तंत्र के सापेक्ष योगदान को निर्धारित करना संभव है। परिणाम बताते हैं कि प्लाज्मा उत्पादन पूरी तरह से कम दबाव पर स्टोकेस्टिक तंत्र के कारण होता है, जबकि उच्च दबाव में यह दोनों तंत्रों का मिश्रण होता है। आरएफ वोल्टेज के विश्लेषण के लिए एक समान तकनीक लागू की गई थी। उदाहरण के लिए, विश्लेषण से पता चलता है कि दूसरे और तीसरे हार्मोनिक्स के लिए, स्टोकेस्टिक तंत्र लगभग विशेष रूप से ≈ 5 mTorr तक हावी होता है, जबकि उच्च दबावों (≈ 200 mTorr से ऊपर) के लिए ओमिक और स्टोकेस्टिक दोनों तंत्र लगभग समान माप में मौजूद होते हैं। कम दबाव पर, जहां स्टोकेस्टिक तंत्र लगभग अनन्य रूप से संचालित होता है, हार्मोनिक्स में योगदान स्टोकेस्टिक तंत्र की आंतरिक गैर-रैखिकता से आता है, जो संचालित इलेक्ट्रोड पर म्यान के माध्यम से कार्य करता है। हालांकि, यह ध्यान दिया जा सकता है कि चूंकि संचालित इलेक्ट्रोड पर म्यान उच्च दबावों पर भी मौजूद होता है, इन दबावों पर हार्मोनिक उत्पादन भी स्टोकेस्टिक तंत्र के कारण आगे बढ़ सकता है, ओमिक तंत्र हार्मोनिक शक्ति को अवशोषित करने के लिए काम करता है।

जबकि उपरोक्त कार्य के लिए उपयोग की जाने वाली जांच शक्ति अवशोषण और हार्मोनिक्स (और प्लाज्मा उत्पादन) के बीच संबंधों में अंतर्दृष्टि प्रदान करती है, ये प्लाज्मा के भीतर उत्पादित और अवशोषित

हार्मोनिक शक्ति को निर्धारित नहीं कर सकती हैं। इसलिए, ऊपर उल्लिखित कार्यक्रम के अनुसार, दो अलग-अलग निदान विकसित किए गए थे।

पहली नई डायग्नोस्टिक तकनीक है जो डुअल डायरेक्शनल कप्लर्स (डीडीसी) के नए उपयोग पर आधारित है। इसे बाहरी आरएफ सर्किट में हार्मोनिक (और मौलिक) शक्ति को निर्धारित करने के लिए विकसित और उपयोग किया गया था। यह पता चला है कि मिलान नेटवर्क और प्लाज्मा लोड के बीच रखा गया एक डीडीसी न केवल मौलिक, बल्कि प्लाज्मा द्वारा उत्पादित हार्मोनिक्स का भी आसानी से पता लगा सकता है। परिणामों से पता चलता है कि बाहरी सर्किट में उच्चतम हार्मोनिक शक्ति तीसरे हार्मोनिक में उपलब्ध है, न कि दूसरे में, जैसा कि आमतौर पर विभिन्न मापों में बताया गया है। इसके अलावा, एक और महत्वपूर्ण परिणाम 6वें हार्मोनिक का दूसरे सबसे महत्वपूर्ण हार्मोनिक के रूप में उभरना है जो एक विस्तृत दबाव सीमा (~ 200 mTorr से नीचे) पर शक्ति के मामले में है। बाहरी सर्किट में हार्मोनिक शक्ति के मापन पर इन परिणामों के अलावा, प्लाज्मा प्रतिबाधा, वीएसडब्ल्यूआर, प्लाज्मा प्रतिबिंब गुणांक, आदि जैसे ब्याज की अन्य मात्राओं की गणना करना संभव है।

मौलिक के आरएफ शक्ति अवशोषण की जांच और उत्पन्न करने के लिए और एक कैपेसिटिव डिस्चार्ज में हार्मोनिक पीढ़ी और अवशोषण को निर्धारित करने के लिए, एक नई और उपन्यास जांच, जेई जांच, खरोंच से विकसित की गई थी। मौलिक (13.56 मेगाहर्ट्ज) और दूसरे हार्मोनिक (27.12 मेगाहर्ट्ज) के लिए शक्ति अवशोषण के अक्षीय प्रोफाइल प्राप्त करने के लिए उपयोग किए जाने से पहले जांच के विभिन्न पहलुओं, जैसे इसके डिजाइन, निर्माण, अंशांकन, और सीमाओं को हल किया गया था। परिणामों के एक विस्तृत विश्लेषण से पता चलता है कि बड़े इलेक्ट्रोड अंतराल वाले सिस्टम के लिए भी, यानी, लंबे थोक प्लाज्मा क्षेत्रों वाले प्लाज़्मा, व्यावहारिक रूप से सभी मौलिक शक्ति संचालित इलेक्ट्रोड के पास एक संकीर्ण किनारे वाले क्षेत्र में अवशोषित होती है, चाहे दबाव कुछ भी हो। हार्मोनिक्स के संदर्भ में, ध्यान देने वाली पहली बात

यह है कि हार्मोनिक उत्पादन और अवशोषण दोनों संचालित इलेक्ट्रोड के करीब होते हैं। हार्मोनिक उत्पादन को कम दबाव पर सबसे स्पष्ट रूप से देखा जा सकता है, जहां कोई एक नीरस रूप से घटते अवशोषण के क्षेत्र को देखता है क्योंकि एक संचालित इलेक्ट्रोड के पास पहुंचता है, जो हार्मोनिक पीढ़ी का संकेत देता है। दूसरी ओर, संपार्श्विक अवशोषण के लिए अवशोषण प्रोफ़ाइल मौलिक की नकल करती है। इस क्षेत्र में आरएफ क्षेत्र के शिखर के बाद से आरएफ इलेक्ट्रोड के पास अवशोषण अधिक है।

प्लाज्मा में अवशोषित हार्मोनिक शक्ति और बाहरी सर्किट में उपलब्ध हार्मोनिक शक्ति की पूरक विशेषताओं को मिलाकर, कोई यह पाता है कि स्टोकेस्टिक तंत्र दबावों की एक विस्तृत श्रृंखला पर हार्मोनिक्स उत्पन्न करने में सक्षम है, यह दर्शाता है कि यह सीसीडी में एक अत्यधिक सर्वव्यापी तंत्र है। इसकी सर्वव्यापकता का कारण इस तथ्य से उपजा है कि यह मूल रूप से एक म्यान घटना है और सबसे आसानी से ट्रिगर होता है जब एक इलेक्ट्रोड पर नॉनलाइनियर म्यान (जैसे एक सीसीडी में संचालित इलेक्ट्रोड) मजबूत आरएफ क्षेत्रों द्वारा प्रवेश किया जाता है, यहां तक कि उच्च दबाव पर भी, जहां म्यान की चौड़ाई छोटी है।

संक्षेप में, यह थीसिस कैपेसिटिव डिस्चार्ज में आरएफ पावर कपलिंग तंत्र को उजागर करने के लिए कई नई अंतर्दृष्टि प्रदान करती है, ताकि इन तंत्रों की वर्तमान समझ को बढ़ाया जा सके और अधिक विस्तृत और सटीक सैद्धांतिक मॉडल के विकास का मार्गदर्शन किया जा सके। यह भी माना जाता है कि इस काम में विकसित नई नैदानिक विधियों से अधिक सटीक मॉडल तैयार करने में मदद मिलेगी और कैपेसिटिव डिस्चार्ज के अनुप्रयोगों में अधिक सटीक नियंत्रण और प्रक्रिया अनुकूलन का मार्ग प्रशस्त होगा।

Contents

Certificate ……………………………………………………………………………….. (i)

Acknowledgment ………………………………………………………………………… (iii)

Abstract ……………………………………………………………………………….... (vi)

List of Figures ………………………………………………………………………… (xv)

List of Tables ………………………………………………………………………... (xviii)

1. Introduction ……………………………………………………………………….…**1**

1.1 Plasma applications and sources ……………………………………………………1

1.2 Radio Frequency (RF) discharges …………………………………………………...3

1.3 Power coupling mechanisms in CCDs ……………………………………………....6

1.4 Harmonic generation in CCDs ……………………………………………………...10

1.5 New approaches to understanding RF power absorption in CCDs …………………14

1.6 Research objectives and significant contributions of the thesis ……………………17

References ……………………………………………………………………..22

2. Experimental Setup and Diagnostics …………………………………………….....**27**

2.1 Experimental setup …………….……………………………………………………28

2.2 Diagnostic techniques …………..……………………………………………………...31

2.2.1 Compensated Langmuir Probe (CLP) ………………………………………31

2.2.2 Uncompensated Floating Langmuir Probe (UFLP) ………………………....43

2.2.3 Capacitive Probe (CP) ……………………………………………………….45

2.3 Fast Fourier Transforms (FFT) analysis ……………………………………………..48

2.4 Summary 49

Appendix..........50

References 58

3. Correlation of the power absorption mechanisms with observed RF harmonics and plasma parameters 59

3.1 Plasma characterization using Compensated LP (CLP) 60

3.2 RF signal and determination of $V_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{pl}}$ 65

3.3 RF data analysis and interpretation 69

3.4 Plasma parameter analysis 79

3.5 Discussion of the η and P_{eff} profiles 81

3.6 Summary and conclusion 85

References 87

4. Novel diagnostic for accurate determination of harmonics in RF circuit outside plasma 88

4.1 Introduction 88

4.2 DDC test setup 91

4.2.1 DDC based diagnostics – Precautions and analysis 94

4.2.2 FFT analysis of DDC signals 101

4.3 Results and discussion 102

4.3.1 Effect of input power variation 102

4.3.2 Effect of pressure variation 108

4.4 Summary and conclusion ……………………………………………………………….111

References …………………………………………………………………………113

5. A new *J.E* probe for measurement of spatial profiles

of RF power deposition within plasma ……………………………………………..…114

5.1 Introduction …………………………………………………………………….114

5.2 Principle of operation of the *J.E* probe ……………………………………………115

5.2.1 *J*-probe using Rogowski coil ………………………………………………116

5.2.2 *E*-probe using capacitive coupling……………………………………………117

5.3 Fabrication and calibration of the *J.E* probe …………………………….………...118

5.3.1 Fabrication of the *J.E* probe …………………………………………..……...118

5.3.2 Calibration of the *J.E* probe …………………………………………..……....123

5.3.3 Consistency check of the *J.E* probe ………..………………………………....133

5.4 Results and discussion …….…………………….…………….................................136

5.5 Summary and conclusion …………………………….…………………………….147

Appendix ……………………………………………………………………….…...149

References ……………………………………………………………………………….151

6. Conclusion and future developments …………………..…………………………....152

6.1 Summary of thesis …………………………………………………………………….152

6.2 Suggestions for future work ………………………………………………………..156

Bio Data ………………………………………………………..…………………….....159

List of Figures

Figure 1.1 The consistent shrinking of the semiconductor device ………………………………2

Figure 1.2 Schematic of a typical Capacitively Coupled Discharge (CCD) system …...............4

Figure 1.3 Electron effective collision frequency ν_{eff} (experiment and theory) and ……….…8

Figure 1.4 RF equivalent circuit for characterization of harmonics ……………………...…15

Figure 2.1 Experimental setup for a parallel plate ……………………………………………..28

Figure 2.2 Schematic for an asymmetric Capacitively ………………………………..….......29

Figure 2.3 (a) Schematic for an open/asymmetric geometry …………………………………...29

Figure 2.4 Image of the circuit of a matching network (MN) …………………….……………31

Figure 2.5 A typical Langmuir probe circuit for recording the probe ………………….….…32

Figure 2.6 (a) Schematic of CLP showing details of the probe ……………………..………..34

Figure 2.7 (a) RF equivalent circuit of the structure given …………………………..……......38

Figure 2.8 Typical LP data analysis technique. (a) Plot of electron …………………..……...40

Figure 2.9 (a) Cross-sectional drawing showing construction ……………………..…………44

Figure 2.10 (a) Cross-sectional drawing showing construction …………………….………..46

Figure 2.11 (a) Details of calibration circuit for Capacitive Probe ……………………..…….46

Figure 2.12 FFT for the raw voltage waveform from (a) Uncompensated ……………..…….49

Figure A-1 (a) Equivalent circuit of the floating LP immersed …………………….………..51

Figure A-2 Physical description of the different paths within ………………………..………52

Figure A-3 Magnitude of (a) the source impedance $|Z_g|$ and ………………………….…...53

Figure A-4 Variation of the capacitance, C_{sh} of the plasma ……………………………..……57

Figure 3.1 Plasma parameter with RF power variation ……………………………….…...60

Figure 3.2 Demarcation of the collisionless, intermediate and …………………………………62

Figure 3.3 (a) Variations of plasma parameters n_e, T_e and V_p ……………………………………..63

Figure 3.4 Typical raw data for RF voltages obtained from ……………………………………....66

Figure 3.5 (a) Variation of the capacitance, C_{sh} of the plasma …………………………………67

Figure 3.6 RF voltage amplitudes $\left|V_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{pl}}\right|$ in the plasma, determined ……………………………67

Figure 3.7 Normalized RF voltage amplitudes in the plasma …………………………………68

Figure 3.8 (a) Variation of $\check{R} = P_i / P_e$ (b) Power absorbed by the ions ………………………..72

Figure 3.9 (a) Plot showing variation of normalized $\left\{\left|V_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{pl}}\right|_{\mathrm{F}}\right\}^2$ ……………………………...74

Figure 3.10 (a) Plot showing variation of normalized $\left\{\left|V_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{pl}}\right|_{\mathrm{2F}}\right\}^2$ ………………………………76

Figure 3.11 (a) Plot showing variation of normalized $\left\{\left|V_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{pl}}\right|_{\mathrm{3F}}\right\}^2$ ………………………………77

Figure 3.12 (a) Plot showing variation of normalized plasma density n_e ………………………80

Figure 3.13 (a) Plot showing variation of normalized $\left\{\left|V_{\mathrm{RF}}^{\mathrm{pl}}\right|_{\mathrm{F}}\right\}^2$ ………………………………84

Figure 4.1 A DDC based diagnostic test set up for parallel plate …………………..………….92

Figure 4.2 Variation of plasma parameters n_e, T_e and V_p with …………………………………93

Figure 4.3 Power flow diagram in RF circuit under consideration. ……………………………96

Figure 4.4 A Dual Directional Coupler showing the various ports and ……………………….97

Figure 4.5 (i) Coupling ratio amplitude (dB) and (ii) phase (degrees) ……………………..…98

Figure 4.6 Raw data obtained for argon pressure 200 mTorr and …………………………....102

Figure 4.7 Power at (a) fundamental and (b) its harmonic determined ……………………....103

Figure 4.8 Transformation of plasma impedance from ……………………………..……..106

Figure 4.9 (a) Plasma density n_e and (b) RF harmonic power content ………………….………108

Figure 5.1 Schematic illustration of the operation of an air-core ………………………….…116

Figure 5.2 Schematic of *E* probe sensor. The charge induced ………………………….…..….118

Figure 5.3 Frequency response of the Rogowski coil using …………………….…….……120

Figure 5.4 Schematic diagram of *E* probe with RF ………………………………..……..…120

Figure 5.5 (a) A complete *J.E* probe assembly drawing and ……………………..………121

Figure 5.6 (a) A schematic and (b) photograph of the *J.E* probe ………………….……..122

Figure 5.7 (a) A Calibration setup for *J.E* probe. (b) An oscilloscope trace for ………....….124

Figure 5.8 Relevant dimensions of *J.E* probe required for …………………………….…127

Figure 5.9 (a) Typical axial plasma density profiles at different pressures ……………....…132

Figure 5.10 Raw data collected *J.E* probe in 100 mTorr Argon …………………………..…133

Figure 5.11 Electric field amplitude and phase measured from …………………………..…135

Figure 5.12 Axial variation of local power absorption density ……………………..……138

Figure 5.13 Axial variation of local power absorption density …………………………......139

Figure 5.14 PIC simulation results by Vahedi *et al.* [8] for ………………………………....140

Figure A-5 Mechanical drawing of *J.E* probe enclosure ……………………………………149

Figure A-6 Mechanical drawing of *J.E* probe with ………………………………….…..150

List of Tables

Table 1.1 Plasma sources and their potential applications. …….…………………….………….3

Table 2.1 Values of Z_{sh} (max), $Z_{AA'}$ and ratio of their magnitude …………………………...39

Table A-1 Attenuation α (Np/m) and propagation delay β (rad/m) constants ……………......54

Table 3.1 Normalization constants of the RF voltage amplitudes ………………………..….68

Table 4.1 Power content in fundamental and the harmonics ……………………………….104

Table 4.2 Complex impedances Z_L (Ω) and Z_H (Ω) computed ……………………………..105

Table 5.1 Details of parameters for Rogowski coil fabrication. ……………………………118

Table 5.2 Tabulation of calibration constants C_E and C_J at the …………………………..…130