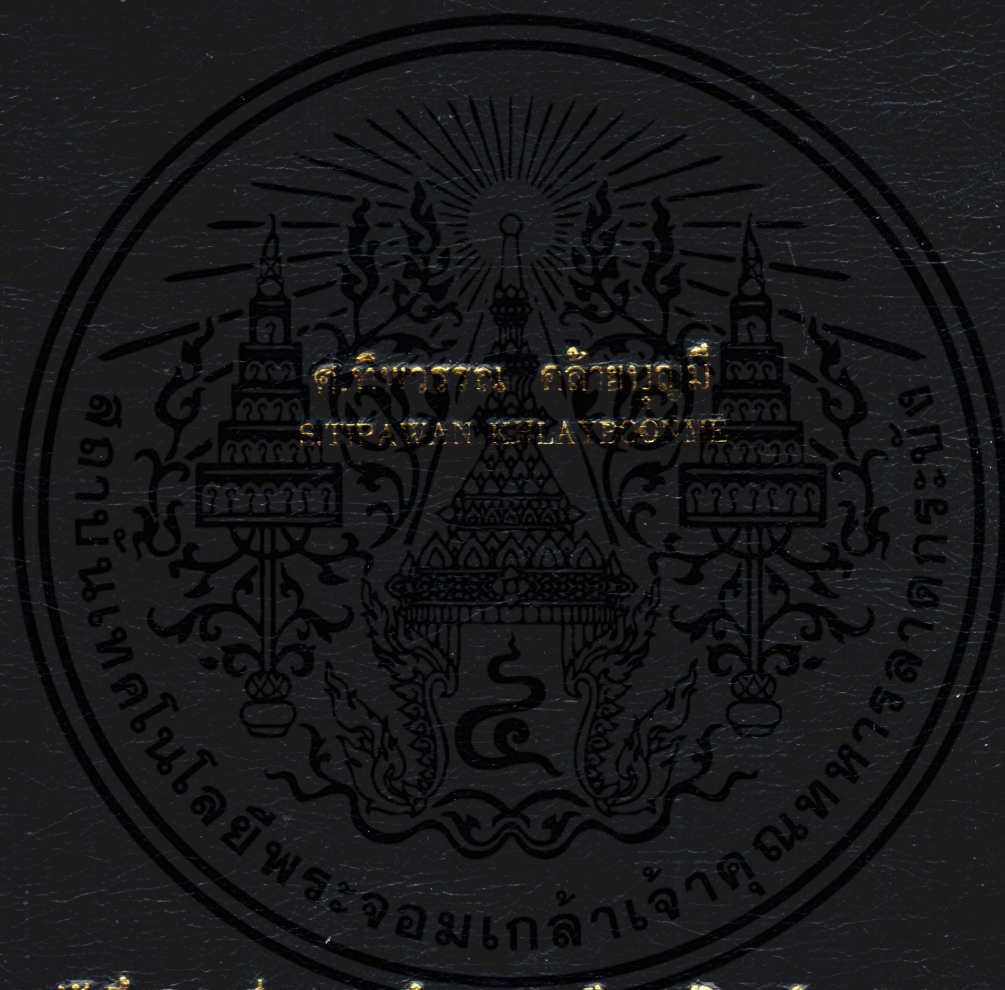


การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดขดลวดโหนดแม่เหล็ก

STUDY OF HELIX CATHODE MAGNETRON ION SOURCE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-306-4

การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดฮอลโลแคโทดแมกนีตรอน

STUDY OF HOLLOW CATHODE MAGNETRON ION SOURCE



ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

S.TIPAWAN KHLAYBOONME

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-306-4

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 40119

วัน, เดือน, ปี 16 ส.ค. 2544

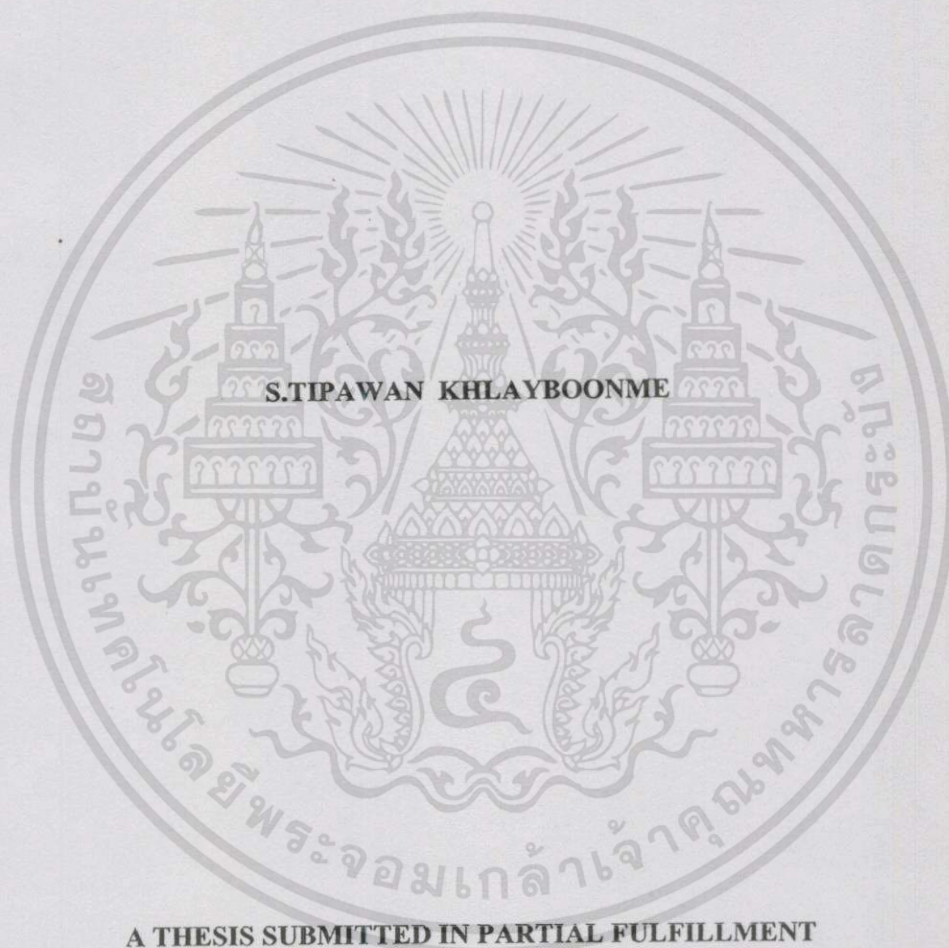


b.....

i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อกฎหมายใหม่มีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งในการนำไปใช้

STUDY OF HOLLOW CATHODE MAGNETRON ION SOURCE



S.TIPAWAN KHLAYBOONME

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2001

ISBN 974-648-306-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

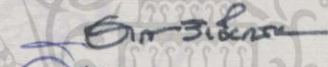


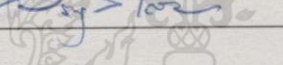
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดซอดโทแคโทดแมกนีตรอน
STUDY OF HOLLOW CATHODE MAGNETRON ION SOURCE
ชื่อนักศึกษา นางสาว ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี
รหัสประจำตัว 40065010
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาคัดดา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อารีย์	วิเชียรฉาย	
ผศ.วิชาญ	เดชิตธีระ	
ดร.สมพร	จงคำ	
ผศ.ดร.วราวุฒิ	เถาคัดดา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 8 มิถุนายน 2544 เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารัตนวลัยลักษณ์ ชั้น 3 ห้อง 307

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



วันที่ 22 เดือน พ.ศ. 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดซอลโลแคโทดแมกนีตรอน
นักศึกษา	นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
รหัสประจำตัว	40065010
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา

บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอถึงการศึกษแหล่งกำเนิดไอออนชนิดซอลโลแคโทดแมกนีตรอน แหล่งกำเนิดไอออนที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดซอลโลแคโทดแมกนีตรอนและส่วนที่เป็นระบบสร้างลำไอออน แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดซอลโลแคโทดแมกนีตรอน ประกอบด้วยขั้วแอโนดทรงกระบอกและขั้วแคโทดซึ่งเป็นตะแกรงทรงกระบอก โดยขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้จะสวมอยู่ด้วยกันและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก แก๊สดีสชาร์จจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง การเกิดแก๊สดีสชาร์จจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าของระบบ ความดันและความเข้มของสนามแม่เหล็ก ในส่วนของระบบสร้างลำไอออนซึ่งเรียกว่า ตัวค้ำไอออน ซึ่งตัวค้ำไอออนที่นำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นแบบชุดค้ำในแนวแกน โดยทั่วไป ระบบการค้ำไอออนจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่เจาะรูตรงกลางสำหรับให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านออกมาสู่ภายนอกและมีการป้อนความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นเพื่อเป็นการเร่งไอออนให้วิ่งออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมา สำหรับในงานวิจัยนี้ แหล่งกำเนิดไอออนสามารถสร้างลำไอออนของอาร์กอนที่มีกระแสไอออนถึง 1.5 มิลลิแอมป์ เมื่อใช้โวลเตจในการค้ำไอออนเพียง 270 โวลต์ ในขณะที่กระแสดีสชาร์จมีค่า 14 มิลลิแอมป์ เส้นผ่าศูนย์กลางของรูตัวค้ำไอออน 2 มิลลิเมตร

Thesis Title	Study of Hollow Cathode Magnetron Ion Source
Name	Miss S.tipawan Khlayboonme
Student ID.	40065010
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2001
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Warawoot Thowladda

ABSTRACT

This thesis proposes the study of hollow-cathode magnetron ion source. This ion source has two important systems: plasma source, bases on hollow-cathode magnetron discharge, and ion beam formation system. Hollow cathode magnetron discharge is formed in a coaxial cylindrical diode which consists of a cylindrical anode and cylindrical mesh cathode in the presence of an axial magnetic field. The plasma intensity can be controlled by applied voltage, plasma chamber pressure and magnetic field. The ion beam formation system is conventionally called the ion extractor. The extractor systems consist of a perforated acceleration electrode and applying high voltage for electrode. The magnetron ion source with a hollow cathode and axial extraction were studied. Argon ion current up to 1.5 mA with exit source aperture of 2 mm in diameter could be measured. The discharge current of 14 mA and extraction voltage of 260 V were the operating conditions.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดคา อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี รวมทั้งอนุเคราะห์จัดหาอุปกรณ์และงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นที่สุดและขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร. วิโรจน์ ดันตราภรณ์ และ รศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนในด้านงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณ สุรวุฒิ กิจสัมพันธ์ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำรวมทั้งความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา พี่น้อง เพื่อน ๆ รวมทั้งบุคคลที่มีความปรารถนาดีมอบให้ข้าพเจ้าทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและแนะนำแนวทางที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้งานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 วิธีการดำเนินการการทำวิทยานิพนธ์.....	4
1.5.1 แผนดำเนินการ.....	4
1.5.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้.....	5
บทที่ 2 ฟิสิกส์พลาสมา.....	6
2.1 ขบวนการในการสร้างพลาสมา.....	6
2.1.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน.....	6
2.1.2 การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง.....	8
2.1.3 การปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า.....	10
2.1.4 การปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอน.....	12
2.2 การสร้างพลาสมาโดยวิธีแก๊สคิซาร์จ.....	12
2.3 สมบัติของพลาสมา.....	15
2.3.1 ความหนาแน่นของพลาสมา.....	15
2.3.2 ระยะเวลาการชน.....	16
2.3.3 อุณหภูมิของพลาสมา.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 สภาพความต้านทานของพลาสติก.....	20
2.3.5 การไหลของพลาสติก.....	20
2.3.6 พลาสติกชีว.....	20
2.4 ผลของสนามแม่เหล็ก.....	32
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	35
3.1 หลักการของ HOCAM.....	35
3.2 การดึงไอออน.....	41
3.2.1 หลักการพื้นฐานของตัวดึงไอออน.....	41
3.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าไอออนของตัวดึงไอออน.....	42
3.3 การวัดกระแสไอออน.....	46
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิด ไอออนชนิด HOCAM.....	49
4.1 ระบบสุญญากาศ.....	49
4.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ.....	49
4.1.2 แคมเบอร์สุญญากาศ.....	51
4.1.3 การทดสอบระบบสุญญากาศ.....	53
4.2 สนามแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดพลาสติก.....	54
4.2.1 การทดสอบสนามแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดพลาสติก.....	57
4.2.2 การทดสอบการลัดทอนสนามแม่เหล็ก.....	59
4.3 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดไอออน.....	60
4.3.1 แหล่งกำเนิดพลาสติก.....	60
4.3.2 ระบบดึงไอออน.....	64
4.4 ถ้วยฟาราเดย์.....	65
4.5 การจัดระบบการวัดด้วยคอมพิวเตอร์.....	66
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	67

สารบัญ (ต่อ)

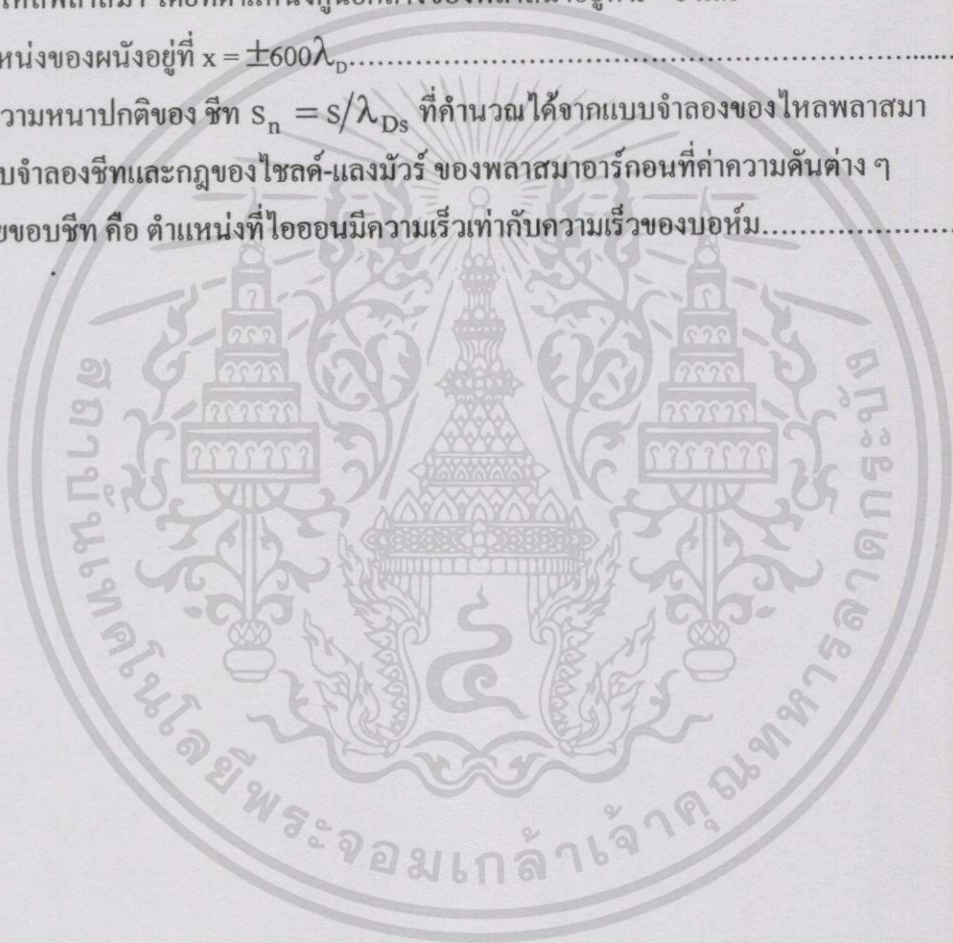
	หน้า
5.1 การทดลองการเกิดคิสซาร์จของพลาสมา.....	67
5.1.1 การศึกษาเสถียรของการคิสซาร์จ.....	68
5.1.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสคิสซาร์จ.....	69
5.1.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสคิสซาร์จเนื่องจากความดัน และสนามแม่เหล็ก.....	76
5.1.4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับ โวลเตจ.....	77
5.2 การทดลองการคิงไอออน.....	82
5.3 การปรับปรุงระบบการคิงไอออน.....	86
5.3.1 ผลของการลกระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าพลาสมา กับ แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	87
5.3.2 ตรวจสอบการทำงานของระบบการคิงไอออน.....	88
5.3.3 การทดสอบแหล่งกำเนิดไอออนที่ออกแบบใหม่.....	90
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	96
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	96
6.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ.....	99
เอกสารอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก ก.....	104
ภาคผนวก ข.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	110

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 บริเวณที่มีการชนกันระหว่างไอออนกับอนุภาคที่เป็นกลางแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของพลาสมาอาร์กอนที่ความดันค่าต่าง ๆ ซึ่งได้จากแบบจำลองของไหลพลาสมา โดยที่ตำแหน่งศูนย์กลางของพลาสมาอยู่ที่ $x = 0$ และตำแหน่งของผนังอยู่ที่ $x = \pm 600\lambda_D$	29
2.2 ค่าความหนาปกติของ ซิท $n_n = s/\lambda_{Ds}$ ที่คำนวณได้จากแบบจำลองของไหลพลาสมาแบบจำลองซิทและกฎของไซลค์-แลงมัวร์ ของพลาสมาอาร์กอนที่ค่าความดันต่าง ๆ โดยขอบซิท คือ ตำแหน่งที่ไอออนมีความเร็วเท่ากับความเร็วของบอห์ม.....	32



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การชนของอิเล็กตรอนและอะตอม..... 8
2.2	กำแพงศักย์ที่ลดต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก.....11
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรมของปรากฏการณ์ การเกิดดิซซาร์จแบบไฟกระแสตรง.....13
2.4	การเกิดปรากฏการณ์โกสว็ดิซซาร์จภายในหลอดทรงกระบอกยาว.....15
2.5	ไดอะแกรมของลำอนุภาครัศมีขนาด r_2 ตกกระทบกับ โมเลกุลแก๊สขนาด r_116
2.6	บริเวณส่วนที่เป็นพลาสมาซีท.....22
2.7	เมื่อระยะทางเท่ากับ λ_D ลึกเข้าไปในพลาสมา ศักย์ไฟฟ้าของพลาสมา จะลดลงเหลือเพียง $1/e$ เท่า ของศักย์ไฟฟ้าของขั้วพลาสมา.....23
2.8	ค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาซึ่งคำนวณจากแบบจำลองของของไหล ของพลาสมาอาร์กอนที่ความดัน 10 mtorr.....26
2.9	เปรียบเทียบของพารามิเตอร์พลาสมาซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลองของไหลพลาสมา แบบจำลองซีทและจากกฎของไซลด์-แลงมัวร์ ของพลาสมาอาร์กอน ที่ความดัน 3 mtorr30
2.10	เปรียบเทียบของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในบริเวณของซีท คำนวณโดย แบบจำลองซีและ จากกฎของไซลด์-แลงมัวร์ เมื่อมีการป้อนความต่างศักย์ให้กับ ขั้วไฟฟ้าทางด้านขวา.....31
3.1	ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก.....36
3.2	ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบ ๆ ขั้วแคโทด.....37
3.3	เส้นทางเดินของอิเล็กตรอนเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าต่าง ๆ.....39
3.4	ระบบการคังไอออน.....42
3.5	ลักษณะลำไอออนที่คังออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา.....43
3.6	ลักษณะการบานของลำไอออนกระแสสูงพลังงานต่ำ.....44
3.7	ลักษณะลำไอออนที่มีการลดแรงผลักดันระหว่างประจุด้วยอิเล็กตรอน.....44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	รูปบน : ตัวอย่างระบบการดึงแบบเร่ง/หน่วง และ เส้นสมมติของระบบเมื่ออยู่ในระบบสุญญากาศ.....45
	รูปล่าง : โคอะแกรมแสดงศักย์ไฟฟ้า (U) ตามแนวแกน Z.....45
3.9	ผลของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ากักกันที่มีต่อกระแสที่วัดได้.....47
3.10	แสดงโครงสร้างของถ้วยฟาราเดย์แบบไม่มีระลอกเย็น.....48
4.1	โครงสร้างระบบสุญญากาศ.....52
4.2	ระบบสุญญากาศ.....53
4.3	ความดันในระบบสุญญากาศ.....54
4.4	ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตามแนวแกนของขดลวด โซลินอยด์ซึ่งพันด้วยลวดเพียงชั้นเดียว.....55
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กในแชมเบอร์ของพลาสมา กับกระแสของขดลวด.....57
4.6	อุณหภูมิของขดลวดเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อป้อนกระแส 9 A.....58
4.7	อุณหภูมิของขดลวดเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อป้อนกระแส 15 A.....58
4.8	ความเข้มสนามแม่เหล็กภายในแชมเบอร์ของพลาสมาเมื่อป้อนกระแสให้กับขดลวดค่าต่าง ๆ.....59
4.9	ความเข้มสนามแม่เหล็กภายในแชมเบอร์ของพลาสมาเมื่อป้อนกระแสค่าต่าง ๆให้กับขดลวด.....60
4.10	โครงสร้างของแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮอตโลแคโทดแมกนีตรอน.....61
4.11	ลักษณะของขั้วแอโนดและชุดจับยึด.....62
4.12	ชุดการติดตั้งของ CMC ของทั้งแบบที่ใช้กับขั้วแอโนดความยาว 128 mm62

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

4.13	แหล่งกำเนิดไอออนซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาและระบบการคิงไอออน	
	(ก) แหล่งกำเนิดไอออนแบบที่แหล่งกำเนิดพลาสมาใช้ขั้วแอโนด	
	ที่มีความยาว 128 mm และ ระบบการคิงไอออนอยู่ห่างจาก	
	แหล่งกำเนิดพลาสมาเป็นระยะ 51.5 mm.....	64
	(ข) แหล่งกำเนิดไอออนแบบที่แหล่งกำเนิดพลาสมาใช้ขั้วแคโทด	
	ที่มีความยาว 65 mm และ ระบบการคิงไอออนอยู่ใกล้กับ	
	แหล่งกำเนิดพลาสมาเป็นระยะ 5 mm.....	65
4.14	ลักษณะของถ้วยฟาราเดย์.....	65
4.15	บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด.....	66
5.1	ระบบการศึกษาการเกิดดิซาร์จของพลาสมา.....	67
5.2	การเปลี่ยนแปลงของโวลเตจดิซาร์จและกระแสดิซาร์จกับเวลาเมื่อมีอัตรา	
	การไหลของแก๊ส 4.7 sccm ที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก 460 และ 560 G.....	68
5.3	ความสว่างของพลาสมาตามระดับกระแสดิซาร์จ.....	69
5.4	การสึกกร่อนของขั้ว CMC ที่ทำมาจากโลหะสแตนเลส	
	และมีโลหะมาเคลือบขั้ว CA.....	70
5.5	กระแสดิซาร์จเปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็ก เมื่อความดันในแชมเบอร์ของ	
	พลาสมามีค่าเป็น 4.0×10^{-2} mbar และ ป้อนโวลเตจให้กับขั้ว CA และ CMC 400 V.....	71
5.6	ลักษณะของ CMC ที่ทำด้วยลวดแคนดัลแบบต่างๆ.....	72
5.7	การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิของแก๊ส.....	73
5.8	ความสัมพันธ์ของกระแสดิซาร์จกับอุณหภูมิ ความดันภายในแชมเบอร์ของ	
	พลาสมา 3.5×10^{-2} mbar และป้อนโวลเตจระหว่าง CA กับ CMC 400 V.....	74
5.9	การเปลี่ยนแปลงของกระแสดิซาร์จเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนไป	
	เมื่อความดันในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่า 4.0×10^{-2} mbar	
	และป้อนโวลเตจระหว่าง CA กับ CMC 400 V.....	75
5.10	ผลของความดันและสนามแม่เหล็กต่อกระแสดิซาร์จ.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

- 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ โวลเตจไอออนที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ เมื่อกระแสไอออนเปลี่ยนแปลงด้วยสนามไฟฟ้าและความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าคงที่ 5.0×10^{-2} mbar.....78
- 5.12 ความสัมพันธ์ของความต้านทานกับกระแสไอออนที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ เมื่อกระแสไอออนเปลี่ยนแปลงด้วยสนามไฟฟ้าและความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าคงที่ 5.0×10^{-2} mbar.....78
- 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ โวลเตจไอออนที่ค่าความดันค่าต่าง ๆ เมื่อกระแสไอออนเปลี่ยนแปลงด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ 420 G.....79
- 5.14 ความสัมพันธ์ของความต้านทานของพลาสมา กับกระแสไอออนที่ความดันค่าต่าง ๆ เมื่อกระแสไอออนเปลี่ยนแปลงด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น 420 G.....80
- 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ โวลเตจไอออนที่ความดัน 4.0×10^{-2} mbar เมื่อกระแสไอออนเปลี่ยนแปลงด้วยสนามแม่เหล็ก.....81
- 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับความต้านทานของพลาสมาที่ความดัน 4.0×10^{-2} mbar เมื่อ โวลเตจที่ป้อนให้กับระบบมีค่าต่างกัน.....81
- 5.17 ระบบการดึง ไอออน มี 3 ขั้ว ต่อขั้วไฟฟ้าพลาสมาเป็นกราวด์ ป้อน HV ให้กับขั้วไฟฟ้าขั้วที่หนึ่ง และ ปลดขั้วไฟฟ้าที่สองลอย.....83
- 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและกระแสไอออนกับเวลาที่ค่า HV ค่าต่าง ๆ เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าเป็น 1.0×10^{-1} mbar และ ป้อน โวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V.....83
- 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและ โวลเตจของตัวดึง ไอออน เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา 1.0×10^{-1} mbar กระแสไอออน 100 mA และป้อน โวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V.....84
- 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและกระแสไอออน เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ ของพลาสมา 1.0×10^{-1} mbar ป้อน โวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V และป้อน HV 260 V.....84
- 5.21 ขั้วไฟฟ้า CA และ CMC พร้อมชุดจับยึด.....86

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่		
5.22	การเกิดพลาสมาในระบบที่ออกแบบใหม่.....	87
5.23	ระบบการดึงไอออนที่ออกแบบให้ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดไอออน และระบบการดึงไอออนสั้นลง.....	87
5.24	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและโวลเตจของตัวดึงไอออนของระบบ ที่ปรับปรุงใหม่ ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่า 9.2×10^{-2} mbar กระแสคิซาร์จ 12 mA และป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V.....	88
5.25	การติดตั้งกริดเพื่อศึกษาการทำงานของระบบการดึงไอออน.....	89
5.26	ความสัมพันธ์ระหว่างโวลเตจของกริดกับกระแสไอออน เมื่อโวลเตจของตัวดึงไอออน มีค่า 250 V ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าเป็น 9.3×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V และกระแสคิซาร์จ 22 mA	90
5.27	การเปลี่ยนแปลงของกระแสไอออนตามกระแสคิซาร์จ (ควบคุมด้วยสนามแม่เหล็ก) กับเวลา เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าเป็น 8.0×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V และโวลเตจของตัวดึงไอออน 140 V.....	91
5.28	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคิซาร์จและกระแสไอออน เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ ของพลาสมามีค่าเป็น 9.2×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 365 V และโวลเตจของระบบดึงไอออน 140 V	92
5.29	ผลของโวลเตจของตัวดึงไอออนต่อกระแสไอออนเมื่อความดันภายในแชมเบอร์ ของพลาสมามีค่าเป็น 8.2×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V และ กระแสคิซาร์จ 14.23 mA.....	93
5.30	ผลของสนามแม่เหล็กต่อกระแสไอออนที่ค่าความดันต่าง ๆ เมื่อกระแสคิซาร์จ มีค่าเป็น 14 mA และป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 140 V.....	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

แหล่งกำเนิดไอออนเป็นอุปกรณ์ที่ได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นส่วนประกอบหลักในเครื่องมือที่ใช้กันในหลายสาขา เช่น เป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคสำหรับเครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) และ เป็นแหล่งกำเนิดไอออนสำหรับระบบไอออนอิมพลานเทชัน (Ion Implantation) เป็นต้น แหล่งกำเนิดไอออนสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการของฟิสิกส์พลาสมา

แหล่งกำเนิดไอออนโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดพลาสมา (plasma source) และระบบการดึงไอออน (extraction system) โดยแหล่งกำเนิดพลาสมาเป็นส่วนที่ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนและมีสถานะเป็นพลาสมา วิธีการที่ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนมีหลายวิธีขึ้นกับชนิดของแหล่งกำเนิดไอออน จากนั้นระบบการดึงไอออนจะทำหน้าที่ดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมา สมบัติของลำไอออนที่ดึงออกมาได้จะขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ทั้งจากแหล่งกำเนิดพลาสมาและระบบดึงไอออนเอง เช่น ความหนาแน่นและอุณหภูมิของพลาสมา รูปร่างเชิงเรขาคณิตและความต่างศักย์ของระบบดึงไอออน เป็นต้น

สิ่งที่จำเป็นในการสร้างพลาสมา คือ อะตอมที่เป็นกลางที่จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน วิธีการที่จะทำให้อะตอมนั้นแตกตัวเป็นไอออนมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน วิธีที่ทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่นิยมใช้กันในงานวิจัย คือ การทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนด้วยการใช้ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานพอเหมาะวิ่งเข้าชนอะตอมของแก๊สนั้น ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปในงานทางการสร้างพลาสมาและแหล่งกำเนิดไอออน

โดยพื้นฐานของกระบวนการดึงไอออนจะประกอบด้วย ชุดขั้วไฟฟ้าที่เจาะเป็นช่องสำหรับให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านออกมาสู่ภายนอกได้ โดยการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีระดับโวลเตจสูงให้กับชุดขั้วไฟฟ้าเหล่านั้นเพื่อเป็นการเร่งไอออนให้วิ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา

ในการออกแบบสร้างแหล่งกำเนิดไอออนนอกจากจะต้องคำนึงถึงหลักการทางฟิสิกส์แล้ว ปัญหาทางระบบสุญญากาศ การเลือกวัสดุที่ต้องคำนึงการทนต่อศักย์ไฟฟ้าสูง อุณหภูมิที่เกิดจากการสร้างพลาสมา การกักความร้อนและการสูญเสียพลังงาน ปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบสร้างแหล่งกำเนิดไอออน

แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันมีหลายชนิด โดยทั่วไปความแตกต่างของแหล่งกำเนิดไอออนแต่ละชนิดขึ้นกับวิธีการที่ใช้ในการทำให้อะตอมแตกตัวเป็นไอออนให้มี

สถานะเป็นพลาสมา ซึ่งแต่ละวิธีก็มีเทคนิคในการสร้างพลาสมาที่แตกต่างกัน ในที่นี้ขอยกตัวอย่าง แหล่งกำเนิดไอออน [1] แต่ละชนิดพอสังเขป ดังต่อไปนี้

แหล่งกำเนิดไอออนชนิด PIG (PIG Ion Sources)

การสร้างไอออนของแหล่งกำเนิดไอออนชนิด PIG หรือ Phillip(Penning) Ionization Gauge ใช้หลักการทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็นไอออนโดยใช้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชน โดยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานแตกตัวเป็นไอออนวิ่งเข้าชนอะตอมแล้วก็จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน อิเล็กตรอนเหล่านี้เกิดจากการป้อนไฟฟ้าความต่างศักย์สูงให้แก่ระบบและมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้อิเล็กตรอนให้คุ้มค่า โดยการนำเอาอิเล็กตรอนกลับมาใช้ใหม่ด้วยการเร่งอิเล็กตรอนให้วิ่งกลับไปกลับมาหลาย ๆ รอบ ภายในบ่อศักย์ซึ่งทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็ก (Axial Magnetic field) ให้กับระบบ

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Ion Source)

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดไมโครเวฟ มีการทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็นไอออนโดยใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ อาจมีการเพิ่มประสิทธิภาพของการแตกตัวโดยใช้สนามแม่เหล็กร่วมด้วย สามารถทำงานได้ที่ความดันค่อนข้างสูง (10^{-3} - 10^{-2} ทอร์) แหล่งกำเนิดไอออนชนิดไมโครเวฟนี้จะสามารถผลิตกระแสไอออนที่สูงและไอออนส่วนมากมีสถานะทางประจุเพียงบวกหนึ่งเท่านั้น

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์ (Electron Cyclotron Resonance Ion Source)

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์ หรือ ECR มีการใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟและสนามแม่เหล็กในการทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดไอออนชนิดไมโครเวฟ แต่คลื่นไมโครเวฟที่ใช้จะต้องมีความถี่เท่ากับความถี่ไซโคลตรอนของอิเล็กตรอนในระบบ ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์อิเล็กตรอนในอะตอมของแก๊สจะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟอย่างมีประสิทธิภาพ อิเล็กตรอนจะหลุดจากอะตอมเป็นจำนวนมาก แหล่งกำเนิดไอออนชนิดอิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์นี้จะทำงานในช่วงความดันที่ต่ำกว่าแหล่งกำเนิดไอออนชนิดไมโครเวฟ (10^{-5} - 10^{-4} ทอร์) และสามารถผลิตกระแสไอออนที่ต่ำกว่าแต่ไอออนส่วนมากมีสถานะทางประจุมากกว่าบวกหนึ่ง

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Ion Source)

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Ion Source) มีการใช้ลำอิเล็กตรอนที่ถูกบีบให้เป็นลำแล้วเร่งให้มีพลังงานสูง (มากกว่า 10 keV) พุ่งเข้าชนอะตอมของแก๊ส ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน การชนแต่ละครั้งจะทำให้ไอออนหลุดได้หนึ่งตัว แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมาก จึงเกิดการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของแก๊สหรือไอออนหลายครั้ง ดังนั้นแหล่งกำเนิดไอออนชนิดลำอิเล็กตรอนนี้จึงให้ลำไอออนที่มีสถานะทางประจุมากกว่าบวกหนึ่งและทำงานได้ที่ความดันต่ำมาก (ประมาณ 10^{-10} ทอร์)

สำหรับแหล่งกำเนิดไอออนชนิดขอลโลแคโทดแมกนีตรอน (Hollow Cathode Magnetron Ion Source) ที่ทำการสร้างและศึกษาเป็นวิทยานิพนธ์นี้ เป็นแหล่งกำเนิดไอออนโดยมีแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดขอลโลแคโทดแมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่สลับซับซ้อนมากนักสามารถสร้างได้ง่าย วัสดุที่ใช้สามารถหาได้ทั่วไป การเกิดพลาสมาสามารถควบคุมได้ง่ายและให้กระแสดีสชาร์จสูงเพียงพอที่จะทำการดึงไอออนออกมาด้วยระบบการดึงไอออนที่ทำการสร้างขึ้น รวมทั้งในขณะที่ทำงานยังสามารถควบคุมสถานะการทำงานให้คงที่อยู่ที่สถานะหนึ่งได้ซึ่งทำให้ง่ายต่อการศึกษาพฤติกรรมของแหล่งกำเนิดพลาสมา แหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ยังได้รับการศึกษาและพัฒนาไม่มากนักและยังไม่มีมีการประยุกต์ใช้งานกันมากนัก จึงมีสิ่งที่ยังต้องศึกษาและพัฒนาอีกมาก

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดขอลโลแคโทดแมกนีตรอน
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาโดยวิธีขอลโลแคโทดแมกนีตรอนดีสชาร์จ
- 1.2.3 เพื่อศึกษากระแสดีสชาร์จจากแหล่งกำเนิดพลาสมา
- 1.2.4 เพื่อออกแบบและสร้างระบบดึงไอออน
- 1.2.5 เพื่อศึกษากระแสไอออนที่ดึงได้

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

แหล่งกำเนิดไอออนมีองค์ประกอบหลักสองส่วนด้วยกันคือ แหล่งกำเนิดพลาสมา และระบบการดึงไอออน การสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดขอลโลแคโทดแมกนีตรอนอาศัยทฤษฎีของไดโอดสูญญากาศแมกนีตรอน (vacuum magnetron diode) ซึ่งอธิบายโดยฮุลล์ (Hull) [2] หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การของทฤษฎีนี้มีอยู่ว่า ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนโคจรรอบ ๆ ขั้วแคโทด เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าถึงระดับหนึ่ง กระแสของอิเล็กตรอนที่วิ่งถึงขั้วแอโนดจะมีค่าเป็นศูนย์ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในลักษณะดังกล่าวจะทำให้อิเล็กตรอนมีเส้นทางในการเดินทางมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้โอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของแก๊สมีมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อัตราการถูกกระตุ้นและการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะที่พิเศษอย่างหนึ่งของแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้คือ ขั้วแคโทดที่มีลักษณะเป็นตะแกรงนั้นจะเป็นตัวเก็บรวบรวมไอออนไว้ด้วยซึ่งทำให้ง่ายต่อการดึงไอออนด้วยระบบการดึงไอออน ส่วนระบบดึงไอออนสำหรับงานวิจัยนี้ใช้หลักการเร่งอนุภาคที่มีประจุโดยใช้สนามไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีรูให้ไอออนบวกที่ถูกเร่งสามารถเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมาได้

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.4.1 สร้างและทดสอบระบบสุญญากาศสำหรับแหล่งกำเนิดไอออน
- 1.4.2 สร้างและทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสมา
- 1.4.3 ศึกษากระแสดีสชาร์จจากแหล่งกำเนิดพลาสมา
- 1.4.4 ปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับแหล่งกำเนิดพลาสมา
- 1.4.5 สร้างและทดสอบระบบการดึงไอออน
- 1.4.6 ศึกษากระแสไอออนที่ดึงได้จากแหล่งกำเนิดไอออน
- 1.4.7 ปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบการดึงไอออน

1.5 วิธีการดำเนินการ การทำวิทยานิพนธ์

1.5.1 แผนดำเนินงานสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการทั่วไปของแหล่งกำเนิดพลาสมาและระบบการดึงไอออน รวมทั้งทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับระบบสุญญากาศ
- ขั้นตอนที่ 2 ทำการประกอบชุดระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งทดสอบรอยรั่วและปรับปรุงแก้ไขระบบสุญญากาศจนสามารถทำความดันได้ในระดับ 10^{-7} mbar
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการสร้างและทดสอบสนามแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดพลาสมา
- ขั้นตอนที่ 4 ทำการสร้างและทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสมา
- ขั้นตอนที่ 5 ทดสอบการใช้งานและปรับปรุงแก้ไขปัญหาของแหล่งกำเนิดพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 6 ศึกษาและวัดผลของอุณหภูมิ ผลของความดันและผลของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อ
กระแสไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 7 ทดสอบและศึกษาระบบการคิงไอออน

ขั้นตอนที่ 8 ปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบการคิงไอออน

ขั้นตอนที่ 9 สรุปการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.5.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการในแต่ละขั้นตอน

เดือนที่ ลำดับ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ขั้นตอนที่ 1	←→											
ขั้นตอนที่ 2		←→										
ขั้นตอนที่ 3			←→									
ขั้นตอนที่ 4				←→								
ขั้นตอนที่ 5					←→							
ขั้นตอนที่ 6						←→						
ขั้นตอนที่ 7							←→					
ขั้นตอนที่ 8									←→			
ขั้นตอนที่ 9										←→		

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้

- 1.6.1 สามารถสร้างและพัฒนาแหล่งกำเนิด ไอออนให้มีประสิทธิภาพที่ดี
- 1.6.2 เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านแหล่งกำเนิด ไอออนและสามารถสร้างได้จากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ
- 1.6.3 เพื่อเป็นพื้นฐานทางการศึกษาทางด้านพลาสมาและแหล่งกำเนิด ไอออนสำหรับผู้สนใจทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ฟิสิกส์พลาสมา

พลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เมื่ออุณหภูมิของสสารเพิ่มขึ้นสสารจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จากสถานะของเหลวเป็นแก๊สและในที่สุดจากสถานะแก๊สเป็นสถานะพลาสมา ที่สถานะพลาสมาอิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอม อะตอมจะมีสภาพเป็นไอออน ทั้งไอออนและอิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคอิสระในพลาสมา ในขณะที่อนุภาคอิสระสำหรับสถานะแก๊สคือโมเลกุลของแก๊ส (หรืออะตอมในกรณีที่เป็นแก๊สเฉื่อย) โดยทั่วไปอนุภาคอิสระนอกจากจะเป็นอนุภาคที่มีประจุได้แก่ไอออนและอิเล็กตรอนแล้วยังมีอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลางรวมอยู่ด้วยอนุภาคในพลาสมาเหล่านี้มีสภาพต่างจากอนุภาคในสถานะแก๊สโดยปกติ ดังนั้นปฏิกริยาระหว่างอนุภาคภายในพลาสมาโดยรวมและปฏิกริยาที่มีต่อสนามภายนอกจึงต่างไปจากสถานะแก๊สโดยทั่วไป

2.1 กระบวนการในการสร้างพลาสมา

พลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (photo ionization) และ การชนด้วยอิเล็กตรอน (electron impact) เป็นต้น เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สได้รับพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ถ้าอัตราการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับหรือมากกว่าอัตราการสูญเสีย แสดงว่ามีพลาสมาเกิดขึ้น พลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกจากอะตอม เรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (ionization energy) ในกรณีที่ของแข็งได้รับพลังงานแล้วอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของของแข็งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า การปล่อยอิเล็กตรอน (electron emission) และพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดได้ เรียกว่า ฟังก์ชันงาน (work function) การแตกตัวเป็นไอออนและการปล่อยอิเล็กตรอนเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในการสร้างพลาสมา ปรากฏการณ์ทั้งสองสามารถแบ่งตามกระบวนการเกิดได้หลายแบบ [3] แต่ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพลาสมาสำหรับงานวิจัยนี้มีดังนี้

2.1.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน (Ionization by Collision)

เมื่ออิเล็กตรอน ไอออน หรือ อะตอมที่เป็นกลางวิ่งด้วยความเร็วค่าหนึ่งเข้าชนกับอะตอมใด ๆ จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน ถ้าหลังการชนอะตอมที่ถูกชนไม่อยู่ในสถานะถูก

กระตุ้น (excitation) หรือ ไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้จะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ในทางกลับกันถ้าอะตอมของแก๊สที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น หรือ ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้ก็จะเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision)

ในกรณีที่อนุภาคที่เข้าชนเป็นอิเล็กตรอน ถ้าการชนเป็นผลให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบการชนด้วยอิเล็กตรอน (electron impact ionization) ในกรณีนี้อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม นั่นคือ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.1)$$

เมื่อ

m = มวลของอิเล็กตรอน

v = ความเร็วของอิเล็กตรอน

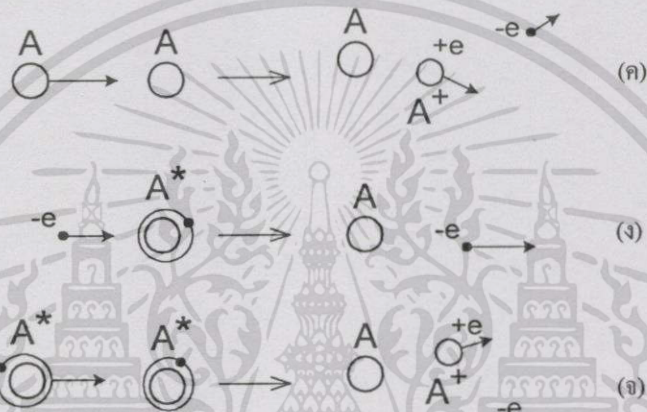
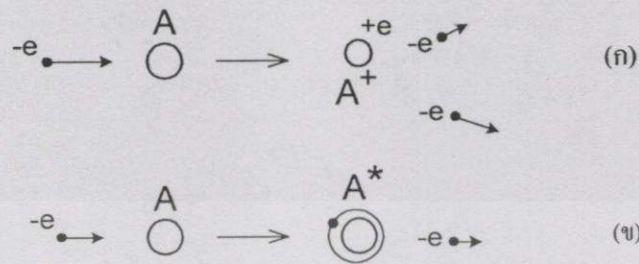
W_i = พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

หลังการชนอิเล็กตรอนที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์ลดลง อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมจะมีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.1(ก) ในกรณีการชนแบบนี้พลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอะตอมมีมวลมากเมื่อเทียบกับมวลของอิเล็กตรอน ในบางกรณีอะตอมที่ถูกชนจะไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนเพียงแต่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 2.1(ข) ถ้าก่อนที่อะตอมนี้จะกลับสู่สถานะพื้น (ground state) มีอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งเข้าชนอาจเป็นผลให้อะตอมนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนได้ การแตกตัวเป็นไอออนแบบนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบขั้น (step ionization) กรณีนี้เป็นไปได้ถ้าอิเล็กตรอนที่เข้าชนมีความหนาแน่นสูงและสถานะถูกกระตุ้นของอะตอมเป็นสถานะกึ่งเสถียร (metastable excited state) ซึ่งมีช่วงชีวิต (lifetime) ยาวกว่าสถานะถูกกระตุ้นปกติ

การแตกตัวเป็นไอออนอาจเกิดจากการชนด้วยอะตอมที่เป็นกลางก็ได้ถ้าอะตอมที่เข้าชนมีพลังงานจลน์มากพอ หลังการชนจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัม ทำให้อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ในขณะที่อะตอมที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.1(ค)

ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้ว (เช่น อะตอมหลังถูกชนในรูปที่ 2.1(ข)) หลังจากการชนอะตอมที่ถูกชนจะเป็นกลางและอิเล็กตรอนเข้าชนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.1(ง) แต่ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้วนั้น ถูกชนด้วยอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเช่นกัน หลังการชนอะตอมที่เข้าชนจะถ่ายเทพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ให้แก่

อะตอมที่ถูกชนทำให้อะตอมที่เข้าชนเป็นกลาง ในขณะที่อะตอมที่ถูกชนจะถูกทำให้แตกตัว ดังรูปที่ 2.1(จ)



รูปที่ 2.1 การชนของอิเล็กตรอนและอะตอม

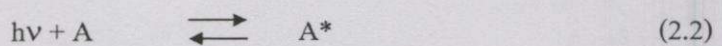
A คืออะตอมที่เป็นกลาง

A⁺ คืออะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน (ไอออนบวก)

A* คืออะตอมที่สถานะถูกกระตุ้น

2.1.2 การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (Photo-ionization)

เมื่ออะตอมดูดกลืนโฟตอนจะส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับต่ำกว่าไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่าและอะตอมนี้จะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนในอะตอมที่ถูกกระตุ้นเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับที่สูงกว่ามายังระดับที่ต่ำกว่าจะปล่อยโฟตอนออกมา กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ A คือ อะตอมที่เป็นกลาง
A* คือ อะตอมที่ถูกกระตุ้น

ถ้าโฟตอนมีพลังงาน $h\nu$ มากพอ ถูกดูดกลืนโดยอะตอมที่เป็นกลาง อะตอมนั้นก็อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น หรือ เกิดการแตกตัวเป็นไอออนถ้า

$$h\nu \geq W \quad (2.3)$$

เมื่อ W คือ ระดับพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้นหรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออน หรืออาจเขียนได้ว่า

$$\lambda \leq \frac{ch}{W_e} \quad \text{สำหรับการกระตุ้น} \quad (2.4)$$

$$\lambda \leq \frac{ch}{W_i} \quad \text{สำหรับการแตกตัวเป็นไอออน} \quad (2.5)$$

เมื่อ W_e = พลังงานการกระตุ้นของอะตอม
 W_i = พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม
 h = ค่าคงที่ของพลังค์
 c = ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ $2.998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
 λ = ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ

ในกรณีที่พลังงานของโฟตอน $h\nu$ มีค่ามากกว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการกระตุ้นอะตอม พลังงานส่วนที่เหลือนั้นอาจถูกปล่อยออกมาในรูปของโฟตอน โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$h(\nu_1 - \nu_2) = W_e \quad (2.6)$$

เมื่อ ν_1 = ความถี่ของโฟตอนที่ถูกดูดกลืน
 ν_2 = ความถี่ของโฟตอนที่ปล่อยออกมา
 W_e = พลังงานที่ต้องใช้ในการกระตุ้นอะตอม

พลังงานส่วนเกินนี้อาจเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกกระตุ้นได้ ในกรณีที่อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนพลังงานส่วนเกินของโฟตอนนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมด้วยวิธีนี้เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)

2.1.3 การปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า (Field Emission)

สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงพอสามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของโลหะได้ โดยสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปนั้นจะมีผลให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่ผิวโลหะมีค่าลดลง ทำให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง กล่าวคือสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) มีโอกาสที่จะผ่านทะลุกำแพงศักย์ที่ผิวของโลหะออกไปได้ ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การทะลุผ่าน (Tunnel effect)

พิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวโลหะ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถประมาณได้ว่าเป็นสนามที่เกิดระหว่างจุดประจุกับผิวโลหะ (planar equipotential surface) ถ้าอิเล็กตรอนอยู่ห่างจากผิวโลหะเป็นระยะทาง x สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้พิจารณาได้เหมือนกับว่ามีประจุ $+e$ อยู่ที่ตำแหน่ง $-x$ ลึกลงไปภายในผิวโลหะนั้น ดังนั้นแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0x^2} \quad (2.7)$$

ในกรณีที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก ∞ ถึง ตำแหน่ง x พลังงานศักย์ไฟฟ้า W_e ที่ตำแหน่ง x มีค่า

$$W_e = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0x} \quad (2.8)$$

ซึ่งแสดงได้ด้วยกราฟไฮเปอร์โบลา ดังกราฟเส้นที่ 1 ในรูปที่ 2.2

ผลของการเร่งอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ป้อนเข้าไปในแนวตั้งฉากกับผิวโลหะจะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ดังนี้

$$W_E = -eEx \quad (2.9)$$

ซึ่งมีลักษณะดังกราฟเส้นที่ 2 ในรูปที่ 2.2 ดังนั้น พลังงานศักย์รวมที่ตำแหน่ง x คือ

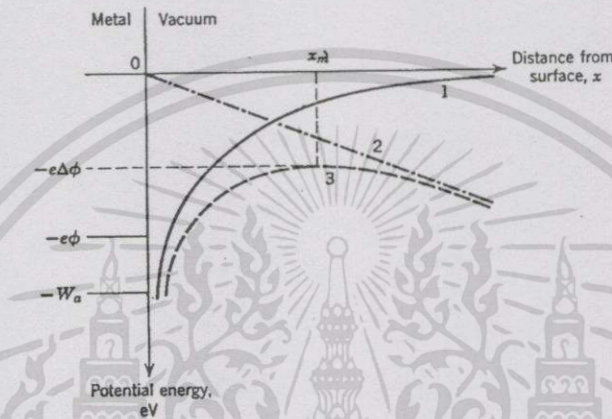
$$W_t = W_e + W_E = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0x} - eEx \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังแสดงด้วยกราฟเส้นที่ 3 ในรูปที่ 2.2

จากรูปที่ 2.2 พบว่าที่ตำแหน่ง x_m ค่าของกัมพวงศักย์จะลดลง ΔW ซึ่งเป็นตำแหน่งที่กัมพวงศักย์มีค่าต่ำสุด ดังนั้นเราสามารถหาจุด x_m ได้จาก

$$\frac{dW_t}{dx} = \frac{e^2}{16\pi \epsilon_0 x_m^2} - eE = 0 \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.2 กัมพวงศักย์ (potential barrier) ที่ลดต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก

- (1) กัมพวงศักย์เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก
- (2) กัมพวงศักย์จากสนามไฟฟ้าภายนอก
- (3) กัมพวงศักย์รวม

ดังนั้นจะได้ว่า

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi \epsilon_0 E}} \quad (2.12)$$

แทนค่า x ในสมการ (2.10) ด้วยค่า x_m จะได้ว่า

$$W_{t(\max)} = -e \left(\frac{eE}{4\pi \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (2.13)$$

ค่า $W_{t(\max)}$ นี้ตามความหมายคือค่า $e\Delta\phi$ ดังนั้น ค่ายังผลของฟังก์ชันงาน มีค่าเป็น

$$e\phi - \Delta(e\phi) = e \left[\phi - \left(\frac{eE}{4\pi \epsilon_0} \right)^{1/2} \right] \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectric Emission)

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อแสงที่มีพลังงานที่เหมาะสมตกกระทบบังโลหะแล้วมีอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะนั้น อิเล็กตรอนที่หลุดออกมา เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)

แสงในย่านอัลตราไวโอเลตจะมีพลังงานมากกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ เมื่อตกกระทบบังผิวของโลหะจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้และพลังงานส่วนเกินของโฟตอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ซึ่งใช้ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ของไอน์สไตน์ (Einstein's relation) คือ

$$\frac{1}{2}mv^2 = hv - hv_0 \quad (2.15)$$

เมื่อ

m = มวลของอิเล็กตรอน

v = ความเร็วของอิเล็กตรอน

hv = พลังงานของโฟตอน

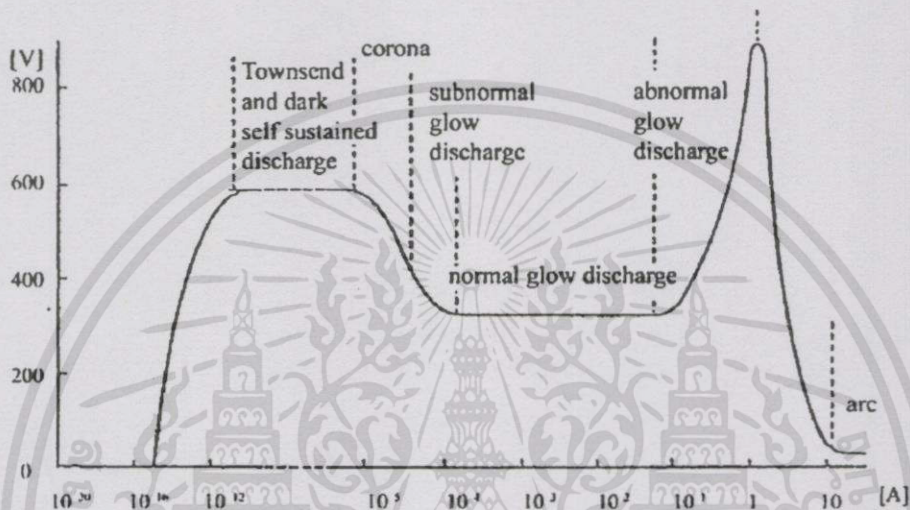
hv_0 = ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ

2.2 การสร้างพลาสมาโดยวิธีแก๊สดีซาร์จ (gas discharge) [3,4,5]

พลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการให้พลังงานที่เหมาะสมกับอะตอมของแก๊สแล้วทำให้อะตอมแก๊สนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอน วิธีการให้พลังงานกับอะตอมแก๊สมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การให้พลังงานความร้อน การใช้ลำอนุภาคที่มีพลังงานพอเหมาะยิงเข้าไปในระบบของแก๊ส แต่วิธีที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งในการสร้างพลาสมาและเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การป้อนสนามไฟฟ้าให้กับอะตอมแก๊สซึ่งพลาสมาที่ได้จากวิธีนี้จะเป็นพลาสมาที่มีอุณหภูมิต่ำด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแก๊สในระบบใด ๆ จะมีอิเล็กตรอนและไอออนรวมอยู่บ้างเล็กน้อยเสมอ ซึ่งอิเล็กตรอนและไอออนเหล่านี้เกิดจากการทำปฏิกิริยากับรังสีคอสมิก (cosmic rays) ประจุพาหะอิสระเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและอาจชนกับอะตอมแก๊สหรือผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดประจุพาหะใหม่ขึ้นอีกได้ กระบวนการนี้จะทำให้เกิดกระบวนการอะวาลานซ์ (avalanche process) ต่อไปซึ่งจะถึงจุดสมดุลต่อเมื่ออัตราการเกิดและอัตราการสูญเสียของประจุพาหะเหล่านี้มีค่าเท่ากัน

การสร้างพลาสมาโดยการใช้สนามไฟฟ้าหรือที่เรียกกันว่า แก๊สดีซาร์จ นั้น ประจุพาหะจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าให้ชนกับอะตอมของแก๊สแล้วถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมนั้น ซึ่งถ้าการ

ชนเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) ก็จะทำให้เกิดการกระตุ้นและการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอมแก๊สนั้น กระบวนการแก๊สดีสชาร์จมีอยู่หลายวิธีด้วยกันเช่น การเกิดดีสชาร์จแบบไฟกระแสสลับ (ac discharge) การเกิดดีสชาร์จแบบพัลส์ (pulsed discharge) แต่วิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นแบบการเกิดดีสชาร์จแบบไฟกระแสตรง (dc discharge) โดยชนิดของการดีสชาร์จและความเป็นพลาสมาขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบและกระแสดีสชาร์จ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของปรากฏการณ์การเกิดดีสชาร์จแบบไฟกระแสตรง

เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ค่าศักย์ไฟฟ้าพังทะลาย (breakdown voltage) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นมากจนสามารถชน โมเลกุลของแก๊สให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนได้ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าและจะเกิดการชนทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มขึ้น ส่วนไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนขั้วแคโทดและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากวัสดุที่ใช้เป็นแคโทด และเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นจนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าพังทะลาย ไอออนบวกจะวิ่งชนขั้วแคโทดมากขึ้นพร้อมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้นด้วยและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งเข้าชนกับโมเลกุลของแก๊สในระหว่างทางทำให้เกิดไอออนบวกเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว กระบวนการแตกตัวเป็นไอออนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังกล่าวนี้เรียกว่ากระบวนการอะวอลานซ์ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดีสชาร์จได้โดยตัวเอง (self-sustained discharge) กระบวนการแตกตัวเป็นไอออนในช่วงนี้เรียกว่า ทาวน์เซนด์ดีสชาร์จ (Townsend discharge) ในช่วงนี้กระแสดีสชาร์จจะมีค่าไม่สูงนักและยังไม่เกิดการเรืองแสง ถ้ากระแสดีสชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้น ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างอิเล็กโทรดจะมีค่าลดลงสู่ระดับการเรืองแสงแบบต่ำกว่าปกติและการเรืองแสงแบบปกติ (subnormal and normal glow discharge) ตามลำดับ ใน

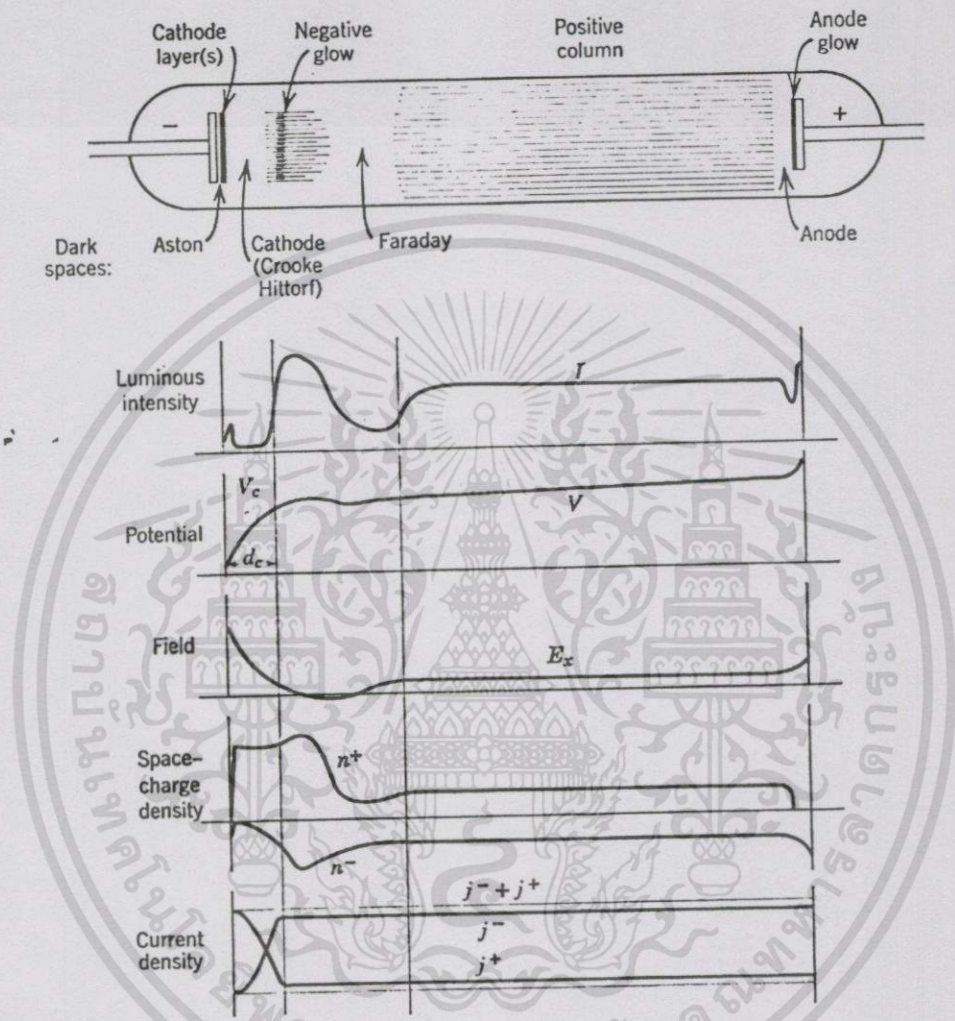
ช่วงนี้แก๊สจะเกิดการเรืองแสง (glow discharge) ถ้ายังคงเพิ่มกระแสสสารต่อไป จะทำให้ทั้งศักย์ไฟฟ้าและกระแสสสารจไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงการเรืองแสงแบบผิดปกติ (abnormal glow discharge) และถ้ากระแสสูงกว่านี้จะเกิดการเปล่งแสงจ้าของการอาร์ค (arc discharge) ดังรูปที่

2.3

เมื่อมีการป้อนแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแก่หลอดแก้วบรรจุแก๊สความดันต่ำ (ประมาณ 1 Torr) เมื่อเกิดการเรืองแสงขึ้น บริเวณขั้วแคโทดจะมีการเรืองแสงเพียงเล็กน้อย เรียกว่า ช่วงมืดแอสตัน (Aston dark space) เนื่องจากบริเวณนี้อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากขั้วแคโทดจะเรียงตัวเป็นชั้นบาง ๆ ของอิเล็กตรอน การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับไอออนบวกที่มีทิศทางเคลื่อนที่เข้าสู่แคโทดจะเกิดขึ้นที่บริเวณถัดจากช่วงมืดแอสตันออกมา การรวมตัวกันนี้จะคายพลังงานออกมาในรูปของแสงสว่าง บริเวณนี้เรียกว่า ชั้นแคโทดโกลว์ (cathode glow layer) ส่วนอิเล็กตรอนที่ผ่านชั้นแคโทดโกลว์ออกมาจะถูกเร่งให้มีพลังงานค่อย ๆ เพิ่มขึ้นด้วยสนามไฟฟ้า แต่ในขณะที่อิเล็กตรอนยังมีพลังงานน้อย โอกาสในการรวมตัวกันกับไอออนบวกก็จะมีค่าน้อยด้วย บริเวณนี้จึงเกิดเป็นแถบมืดเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงมืดแคโทด (cathode dark space) อิเล็กตรอนที่ไม่เกิดการรวมตัวนี้จะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในที่สุดจะมีพลังงานสูงพอที่จะเกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจะทำให้เกิดการเรืองแสงที่สว่างมากที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น บริเวณนี้เรียกว่า เนกาทีฟโกลว์ (negative glow) จากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลง อัตราการเกิดการแตกตัวและการถูกกระตุ้นจะลดลง ความสว่างของช่วงเนกาทีฟโกลว์ จะเริ่มลดลงจนในที่สุดจะเกิดเป็นบริเวณช่วงมืดเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday dark space) ถัดจากช่วงมืดฟาราเดย์ออกมาจะเป็นแถบสว่างที่ค่อนข้างยาวเมื่อเทียบกับความยาวของหลอด เรียกว่าช่วงโพสิทีฟคอลัมน์ (positive column) ความสว่างของช่วงนี้น้อยกว่าช่วงเนกาทีฟโกลว์เล็กน้อย แสงสว่างนี้เกิดจากกระบวนการปลดปล่อยแสงจากอนุภาคที่ถูกกระตุ้น ไม่ได้เกิดจากกระบวนการรวมตัวกันของไอออนกับอิเล็กตรอนเหมือนในช่วงเนกาทีฟโกลว์ แก๊สในบริเวณนี้มีสภาพเป็นพลาสมาเนื่องจากมีความหนาแน่นของอนุภาคที่มีประจุบวกและลบเท่ากันหรือมีประจุสุทธิเป็นศูนย์ ถัดจากช่วงโพสิทีฟคอลัมน์ออกมาจะเป็นบริเวณของขั้วแอนโนด โดยขั้วแอนโนดในหลอดคิซซาร์จทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกจากช่วงโพสิทีฟคอลัมน์เท่านั้น ไม่มีการปลดปล่อยอนุภาคใด ๆ อิเล็กตรอนพลังงานต่ำเหล่านี้จะสะสมอยู่ที่ใกล้ขั้วแอนโนดเกิดเป็นแถบมืดเรียกว่า ช่วงมืดแอนโนด (anode dark space) จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งเข้าชนขั้วแอนโนดและเกิดการเรืองแสงขึ้นที่ผิวของขั้วแอนโนดเรียกว่า แอนโนดโกลว์ (anode glow) ดังรูปที่ 2.4

การเกิดปรากฏการณ์โกลว์คิซซาร์จที่เรืองแสงขึ้นนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามความดันภายในหลอด ซึ่งจะส่งผลต่อ d_c โดยที่ถ้าความดันมีค่าอยู่ในระดับ 1 Torr แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ d_c และบริเวณที่เป็นเนกาทีฟโกลว์หดตัวและเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ที่ใกล้ขั้วแคโทดมากขึ้น ส่วนบริเวณที่เป็นโพสิทีฟคอลัมน์จะขยายตัวยาวขึ้น ซึ่งการเลื่อนตำแหน่งของเนกาทีฟโกลว์นี้จะส่งผลต่อความยากง่าย

ในการเคลื่อนที่ของอนุภาคข้ามผ่านบริเวณที่เป็นช่วงมืดแคโทดซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญในปรากฏการณ์การเกิดโกลว์ดิสซาร์จ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วทั้งสองจะส่งผลต่อความกว้างของบริเวณที่เป็นเนกาทีฟโกลว์



รูปที่ 2.4 การเกิดปรากฏการณ์โกลว์ดิสซาร์จภายในหลอดทรงกระบอกยาว

2.3 สมบัติของพลาสมา (Plasma Properties)

พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายสมบัติของพลาสมาที่สำคัญ ๆ มีดังต่อไปนี้

2.3.1. ความหนาแน่นของพลาสมา (Plasma Density)

พลาสมามีส่วนประกอบที่เป็นไอออน อิเล็กตรอน และ อะตอมที่ยังไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน (อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า) [1] ผสมกันอยู่ โดยพลาสมาจะมีความหนาแน่นขององค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

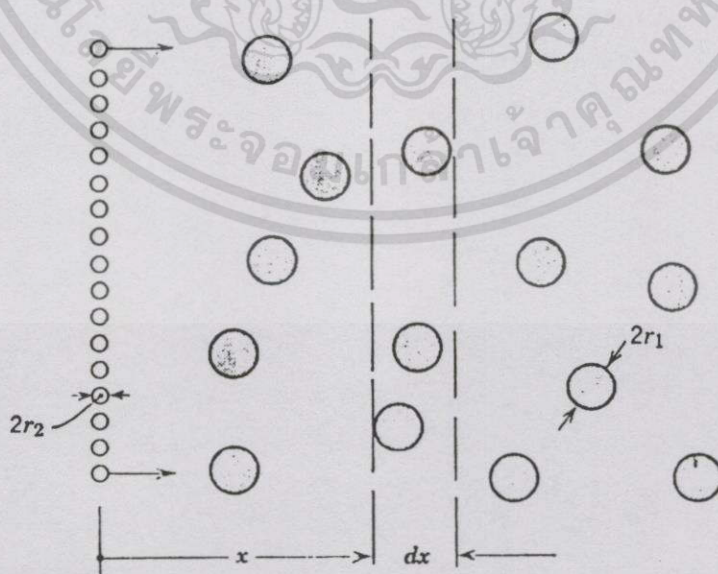
ประกอบต่าง ๆ แตกต่างกัน ถ้าพลาสมามีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (plasma electron density) n_e ความหนาแน่นของไอออน (plasma ion density) n_i และ ความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง (neutral particle density) n_n ความหนาแน่นของอนุภาคทั้งสามนี้จะเป็นตัวบ่งบอกเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน โดย

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน} = \frac{n_i}{(n_i + n_n)} \times 100\% \quad (2.16)$$

ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนมีค่ามากกว่า 10 % ถือว่าแก๊สนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนในปริมาณที่มาก ดังนั้นในการพิจารณาพฤติกรรมของตัวกลางต้องพิจารณาผลของพลาสมาเป็นหลัก แต่ถ้าปริมาณเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สน้อยกว่า 1 % จะต้องพิจารณาถึงผลของแรงปฏิกิริยาอันเนื่องจากอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าด้วย

2.3.2 ระยะปลอดการชน (Free Path)

ระยะปลอดการชน [3] คือ ระยะทางที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่มีการชนกับอนุภาคใด ๆ ภายในระบบ ระยะปลอดการชนของอนุภาคในพลาสมาเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่เป็นตัวกำหนดว่าพลาสมาที่สร้างขึ้นจะโดยวิธีใดก็ตาม จะสามารถดำรงสถานะพลาสมาอย่างต่อเนื่องได้หรือไม่ ซึ่งเวลานำค่าระยะปลอดการชนนี้มาใช้จะใช้เป็นค่าเฉลี่ย หรือเรียกว่าระยะปลอดการชนเฉลี่ย (mean free path, $\bar{\lambda}$)



รูปที่ 2.5 โคออร์ดิเนตของลำอนุภาครัศมีขนาด r_2 ตกกระทบกับ โมเลกุลแก๊สรัศมีขนาด r_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะปลอดการชนของอนุภาคขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอนุภาคหรือจำนวนโมเลกุล และอุณหภูมิของระบบ ระยะปลอดการชนเป็นค่าที่สมมุติให้เป็นระยะระหว่างรัศมีของโมเลกุลที่ไม่เคลื่อนที่ r_1 กับรัศมีของอนุภาคที่เล็กกว่าที่เคลื่อนเข้าชน r_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ถ้าสมมุติให้รูปร่างของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนและโมเลกุลที่อยู่กับที่มีลักษณะเป็นทรงกลมคล้ายลูกบิลเลียด ดังนั้นการชนกันจะเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของทั้งสองอนุภาคมีระยะเป็น $r_1 + r_2$ ดังนั้นพื้นที่ที่เกิดการชนกันของแก๊สหนึ่งโมเลกุล จะมีค่าเป็น $\pi(r_1 + r_2)^2$ และสำหรับแก๊สที่มีจำนวน N โมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะมีพื้นที่ในการชนกันทั้งหมด $N\pi(r_1 + r_2)^2$ ซึ่งเรียกพื้นที่ของการชนนี้ว่าภาคตัดขวางยังผล (effective cross section)

ถ้าอนุภาคที่เข้าชนที่ระยะทาง x ใด ๆ มีจำนวน n ดังนั้นจำนวนอนุภาคในลำอนุภาคที่สูญเสียไปเนื่องการกระเจิงเมื่อเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง dx สามารถเขียนได้โดยสมการต่อไปนี้

$$dn = -nN\pi(r_1 + r_2)^2 dx \quad (2.17)$$

สมมุติให้จำนวนอนุภาคที่ระยะ $x=0$ มีจำนวน n_0 จะได้ว่า

$$n = n_0 e^{-N\pi(r_1 + r_2)^2 x} \quad (2.18)$$

ความน่าจะเป็นที่จะพบว่าระยะปลอดการชนมีค่า x มีค่าเท่ากับความน่าจะเป็น $p(x)$ ที่จะเกิดการชนที่ระยะทางระหว่าง x ถึง $x+dx$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{dn}{n_0}$

$$p(x) = \frac{dn}{n_0} = N\pi(r_1 + r_2)^2 e^{-N\pi(r_1 + r_2)^2 x} dx \quad (2.19)$$

ดังนั้นระยะปลอดการชนเฉลี่ย $\bar{\lambda}$ จะมีค่า

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} = \bar{x} &= \int_{x=0}^{\infty} x p(x) dx \\ &= \frac{1}{N\pi(r_1 + r_2)^2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ถ้าอนุภาคที่เข้าชนไอออนของแก๊สชนิดเดียวกัน นั่นคือ $r_1 = r_2 = r$ จากสมการ (2.20) จะได้ระยะปลอดการชนเฉลี่ยของไอออนกับอนุภาคที่เป็นกลางมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{4\pi r^2 N} \quad (2.21)$$

และถ้าอนุภาคที่เข้าชนเป็นอิเล็กตรอน จะได้ว่า $r_1 \gg r_2$ ดังนั้นจากสมการ (2.20) ได้ว่า

$$\bar{\lambda}_e = \frac{1}{4\pi r_1^2 N} \quad (2.22)$$

สำหรับกรณีของอนุภาคที่เป็นกลาง (โมเลกุลของแก๊ส) ระยะปลอดภัยการชนเฉลี่ย ($\bar{\lambda}$) จะมีค่าเป็น

$$\bar{\lambda}_g = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{\lambda}_i = \frac{kT}{4\sqrt{2}\pi r^2 p} \quad (2.23)$$

เมื่อ

r = รัศมีโมเลกุลของแก๊ส

p = ความดันของระบบ

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

k = ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

การชนกันระหว่างอนุภาคกับโมเลกุลของแก๊ส อาจทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็นไอออน หรือทำให้โมเลกุลแก๊สอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excitation) หรือ อื่น ๆ ได้

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในสนามไฟฟ้าก็จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้านั้น ซึ่งถ้าเคลื่อนที่ไปโดยไม่มีการชนกับอนุภาคใด ๆ อิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อถึงระยะทางค่าหนึ่ง อิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์มากกว่าพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (eV_i) และ ถ้าเกิดชนกับอะตอมของแก๊สแล้วจะทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ ระยะทางนี้คือระยะปลอดภัยการชนที่ทำให้แก๊สเกิดการแตกตัว ถ้าให้ λ_i คือระยะปลอดภัยการชนที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ E จะได้ว่า

$$eE\lambda_i \geq eV_i \quad (2.24)$$

เมื่อ

E = สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform electric field)

e = ประจุอิเล็กตรอน

eV_i = พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเขียนได้ว่า

$$E\lambda_i \geq V_i \quad (2.25)$$

เมื่อ V_i คือ ไอออนไนเซชันโพเทนเชียล (มีค่า 15.7 โวลต์ สำหรับแก๊สอาร์กอน)

จากสมการ (2.25) พบว่า สนามไฟฟ้าที่จะเร่งให้อนุภาคมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สได้ คือ

$$E = \frac{V_i}{\lambda_i} \quad (2.26)$$

หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า เมื่อป้อนค่าสนามไฟฟ้า E ระยะปลดการชนเฉลี่ยสั้นที่สุดที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน มีค่า $\lambda_i = V_i/E$

2.3.3 อุณหภูมิของพลาสมา (Plasma Temperature)

ในงานด้านฟิสิกส์ของพลาสมา นิยมกำหนดหน่วยของพลังงานเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) และสำหรับพลาสมาแล้ว นิยมที่จะอธิบายอุณหภูมิพลาสมาในรูปของพลังงานพลาสมาแทน [1] ดังนั้นอุณหภูมิของพลาสมาจึงถูกใช้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการอธิบายพลังงานของอนุภาคในพลาสมา โดยพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคจะแปรผันกับอุณหภูมิตามสมการ

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT \quad (2.27)$$

โดยทั่วไปจะกำหนดอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ และอุณหภูมิของพลาสมาสามารถคำนวณได้จากพลังงานเฉลี่ยของพลาสมา ตัวอย่างเช่นอุณหภูมิของพลาสมา 1 eV จะมีอุณหภูมิ 11,600 K

ภายในพลาสมาอุณหภูมิของไอออนและอิเล็กตรอนไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน และถ้ามีการป้อนสนามแม่เหล็ก อุณหภูมิของอนุภาคในพลาสมาในแนวขนานและตั้งฉากกับสนามจะมีค่าแตกต่างกันและอุณหภูมิของอนุภาคที่เป็นกลางก็จะแตกต่างกันด้วย

2.3.4 สภาพความต้านทานของพลาสมา (Plasma Resistivity)

ความต้านทานของพลาสมา [6] เกิดขึ้นเนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออน หรืออนุภาคที่เป็นกลาง ความต้านทานของพลาสมาจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ซึ่งเปรียบเสมือนว่าอิเล็กตรอนในพลาสมามีพลังงานเพิ่มขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนหรือกับอนุภาคที่เป็นกลางจะลดลงเมื่อความเร็วของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับความต้านทานของโลหะ

2.3.5 การไหลของพลาสมา (Plasma Flow)

เนื่องจากพลาสมาเป็นอนุภาคที่ถูกทำให้มีประจุ ดังนั้นการไหลของพลาสมา [1] จึงมีลักษณะคล้ายกับการไหลของอิเล็กตรอน ในโลหะกระแสไฟฟ้าเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนเพียงอย่างเดียว ไอออนหรือโครงผลึกจะไม่มีเคลื่อนที่ แต่ในพลาสมาจะมีการเคลื่อนที่ทั้งของอิเล็กตรอนและไอออน ดังนั้น กระแสที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลรวมของทั้งกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนและไอออน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมหาได้จากสมการ

$$J = J_i - J_e \quad (2.28)$$

เมื่อ

- J = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวม
- J_i = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าไอออน
- J_e = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอน

ในพลาสมาอิเล็กตรอนจะมีทิศการเคลื่อนที่สวนทางกับไอออนบวก ดังนั้นถ้าให้กระแสไอออนมีค่าเป็นบวกกระแสอิเล็กตรอนจะมีค่าเป็นลบ เมื่อแทนค่าความหนาแน่นกระแสในสมการ (2.28) จะต้องคำนึงถึงเครื่องหมายของกระแสด้วย

2.3.6 พลาสมาชีท (plasma sheath)

เนื่องจากพลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุและอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า แต่โดยผลรวมแล้วพลาสมาจะเป็นตัวกลางที่มีผลรวมประจุของอนุภาคทั้งหมดเป็นศูนย์ (electrical neutrality) อนุภาคภายในพลาสมาจะมีปฏิริยาต่อกันผ่านทางสนามไฟฟ้าและอิทธิพลของสนาม

ไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุภายในพลาสมาจะมีเพียงระยะทางจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น ระยะทางนี้เรียกว่า ระยะทางกำบัง (screening distance) [7] ที่ระยะมากกว่านี้สนามของอนุภาคจะถูกหักล้างโดยอนุภาคตัวอื่นในพลาสมา ปรากฏการณ์ในลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำต่อพลาสมาเช่นกัน สนามไฟฟ้าจากภายนอกจะถูกหักล้างโดยสนามจากภายในพลาสมาจะทำให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกไม่สามารถผ่านพลาสมาได้ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับที่โลหะไม่ยอมให้สนามไฟฟ้าภายนอกผ่าน ทั้งนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกทำให้อนุภาคบริเวณผิวของพลาสมา มีการจัดเรียงตัวใหม่และเป็นผลให้สนามภายนอกมีค่าลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทางลึกเข้าไปในพลาสมา ระยะทางที่สนามภายนอกสามารถผ่านเข้าไปได้จะขึ้นกับความหนาแน่นและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา

เมื่อพลาสมาสัมผัสกับผนัง (material wall) บริเวณที่สัมผัสกันระหว่างพลาสมา กับผนังจะไม่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ความหนาของบริเวณนี้เรียกว่า พลาสมาชีท แสดงดังรูป 2.6 [1] ซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออน จะเคลื่อนที่ไปถึงผนังก่อนไอออนและทำให้ผนังมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา (มีประจุสุทธิเป็นลบ) เป็นผลให้เกิดแรงผลักอิเล็กตรอนตัวต่อไป ในขณะที่เดียวกันจะเร่งให้ไอออนบวกเคลื่อนมาชนผนังด้วยอัตราที่สูงขึ้น ที่สภาวะสมดุลจึงเกิดเป็นชั้นของประจุบวกสุทธิลึกเข้าไปในพลาสมาซึ่งเรียกว่า พลาสมาชีท นั่นเอง ความหนาของพลาสมาชีทขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา โดยสเกลของความหนาของพลาสมาชีทนี้เรียกว่าความยาวเดบาย (Debye length, λ_D)

เมื่อ

$$\lambda_D^2 = \frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 n_e} \quad (2.29)$$

หรือ

$$\lambda_D = 743 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (2.30)$$

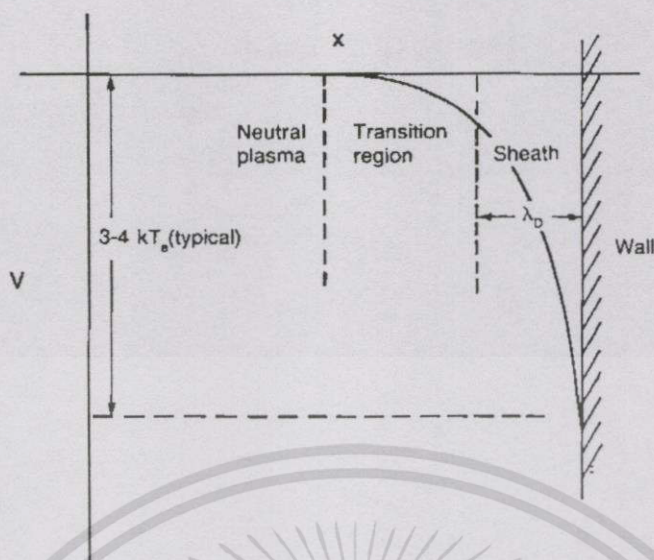
เมื่อ

T_e = อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (eV)

n_e = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (cm^{-3})

k = ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

e = ประจุของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.6 บริเวณที่เป็นพลาสมาซีท

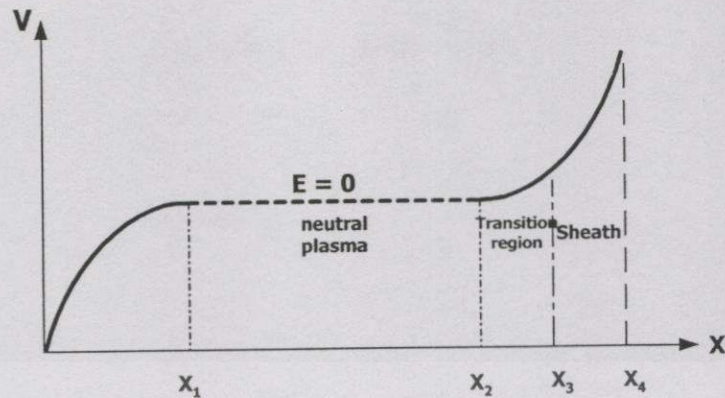
เมื่อพิจารณาอนุภาคที่มีประจุ q ตัวหนึ่ง (isolated charge particle) ค่าศักย์ไฟฟ้า v ของอนุภาคนี้นี้จะมีค่าลดลงตามระยะทาง r โดย

$$V = \frac{q}{r} \quad (2.31)$$

ในทำนองเดียวกันศักย์ไฟฟ้าของพลาสมาซีทก็มีค่าลดลงตามระยะทางที่ลึกเข้าไปในพลาสมาเช่นกัน ด้วยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$V = \frac{q}{r} e^{-r/\lambda_D} \quad (2.32)$$

จากสมการจะพบว่าที่ระยะทางเท่ากับ λ_D ลึกเข้าไปในพลาสมา พลาสมาจะมีศักย์ไฟฟ้าลดลงเหลือเพียง $1/e$ เท่า ของศักย์ไฟฟ้าของขั้วพลาสมา (plasma-electrode potential) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เมื่อระยะทางเท่ากับ λ_D ลึกลงไปในพลาสมา ศักย์ไฟฟ้าของพลาสมาจะลดลงเหลือเพียง $1/e$ เท่า ของศักย์ไฟฟ้าของผิวพลาสมา [8]

จากที่กล่าวมาข้างต้นพอสรุปได้ว่า พลาสมาซิทเป็นสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ (localized electric field) [9] ซึ่งสนามนี้จะแยกส่วนที่เป็นพลาสมาออกจากผนังของวัสดุ โดยจะทำหน้าที่กักกันอนุภาคที่มีสภาพความคล่องตัว (mobility) มากกว่า (โดยทั่วไปหมายถึงอิเล็กตรอน) ไว้ภายในพลาสมาแต่จะเร่งหรือคูดอนุภาคที่มีสภาพความคล่องตัวน้อยกว่า (โดยทั่วไปหมายถึงไอออน) ออกจากพลาสมาเข้าหาผนังของวัสดุ พลาสมาซิทเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องพิจารณาเมื่อต้องการสร้างลำไอออน (beam formation) จากแหล่งกำเนิดพลาสมาโดยใช้สนามไฟฟ้า (extraction)

ในรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของพลาสมาซิท โดยพิจารณาจากแบบจำลองของไหลพลาสมา (plasma fluid model) [10] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่กล่าวถึงพลาสมาทั้งระบบมีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันและขึ้นกับเวลา (time-dependent whole region model) สามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทั้งในส่วนที่เป็นซิทและบริเวณก่อนที่จะเป็นซิทรวมถึงบริเวณเนื้อพลาสมาได้ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการแก้ปัญหาความยุ่งยากในการคำนวณด้วยแบบจำลองของไหล โดยการสร้างแบบจำลองสำหรับพิจารณาส่วนที่เป็นซิทและบริเวณก่อนที่จะเป็นซิทแยกต่างหากจากเนื้อพลาสมา เรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองซิท (sheath model) และเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองทั้งสองกับผลที่คำนวณได้จากกฎของไชลด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir law) ซึ่งได้จากการกำหนดเงื่อนไขเฉพาะบางประการให้กับแบบจำลองของไหล

1) แบบจำลองของของเหลวพลาสมา (Plasma Fluid Model)

แบบจำลองของไหลพลาสมา อธิบายพฤติกรรมของไอออนในพลาสมาที่ไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กด้วยสมการไฮโดรไดนามิกที่ขึ้นกับเวลา (time-dependent hydrodynamic equation) [11] ซึ่งประกอบด้วย 3 สมการ ได้แก่

a) สมการโมเมนตัม (momentum equation) :

$$n_i M \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i (\nabla \cdot u_i) \right) = e n_i E - k T_i \nabla n_i - F_c \quad (2.33)$$

$$\text{โดย } F_c = (|u_i|/\lambda) + v_{iz} (n_e/n_i) n_i M |u_i|$$

เมื่อ F_c คือแรงเสียดทาน (frictional force) เกิดเนื่องเนื่องจากการชนและการแตกตัวเป็นไอออนของอนุภาคในพลาสมา เทอมแรกทางด้านขวาแสดงถึงการชนระหว่างไอออนกับอนุภาคที่เป็นกลาง ส่วนเทอมที่สองหมายถึงการแตกตัวเป็นไอออน

b) สมการต่อเนื่อง (continuity equation) :

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i u_i) = v_{iz} n_e \quad (2.34)$$

c) สมการของปัวส์ซอง (Poisson's equation) :

$$\nabla^2 \phi = e(n_e - n_i)/\epsilon_0 \quad (2.35)$$

เมื่อ

- n_i = ความหนาแน่นของไอออน
- n_e = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
- M = มวลของไอออน
- u_i = ความเร็วของไอออน
- E = ความเข้มของสนามไฟฟ้า
- v_{iz} = ความถี่ในการแตกตัวของแก๊ส (ionization frequency)
- ϕ = ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า (electrode potential)
- e = ประจุไฟฟ้าของอนุภาคในพลาสมา
- k = ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann constant)
- ϵ_0 = สภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity of free space)
- λ = ระยะปลอดการชนเฉลี่ยของไอออน

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา เราจะคิดว่าความถี่ในการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊ส ระยะปลอดการชนเฉลี่ยของไอออน (ion collision mean free path, λ) และ อุณหภูมิของไอออน (T_i) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ โดยที่ λ เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความดันและในการพิจารณาต่อไปนี้ กำหนดให้ kT_e มีค่าเป็น 0.05 eV ในขณะที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็นไปตามความสัมพันธ์ของโบลต์ซมันน์

$$n_e = n_{eo} e^{c(\phi - V_p)/kT_e} \quad (2.36)$$

เมื่อ	V_p	= ศักย์ไฟฟ้าของพลาสมา (plasma potential)
	n_{eo}	= ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่กึ่งกลางของพลาสมา
	kT_e	= อุณหภูมิของอิเล็กตรอน กำหนดให้มีค่าเป็น 3 eV

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.33) – (2.36) ใน 1 มิติตามแนวแกน x และ ทำให้ตัวแปรเป็นค่าปกติ (normalized variable) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial u_{ni}}{\partial t_n} + u_{ni} \frac{\partial u_{ni}}{\partial x_n} = - \frac{\partial \phi_n}{\partial x_n} - T_{ni} \frac{\partial n_{ni}}{\partial x_n} - F_{nc} \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial n_{ni}}{\partial t_n} + u_{ni} \frac{\partial (n_{ni} u_{ni})}{\partial x_n} = v_{niz} n_{ne} \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_n}{\partial x_n^2} = n_{neo} e^{\phi_n - V_{np}} - n_{ni} \quad (2.39)$$

เมื่อ	$\phi_n = e\phi/kT_e$	$u_{ni} = u_i/u_B$	$n_{ni} = n_i/n_o$
	$n_{neo} = n_{eo}/n_o$	$v_{niz} = v_{iz}/\omega_{pi}$	$V_{np} = eV_p/kT_e$
	$T_{ni} = T_i/T_e$	$t_n = t/\omega_{pi}$	$x_n = x/\lambda_D$
	$F_{nc} = (u_{ni} u_{ni}\lambda_D/\lambda) + v_{niz}n_e u_{ni}/n_i$		

โดยที่	$\omega_{pi} = (n_o e^2 / M \epsilon_0)^{1/2}$	คือ ความถี่พลาสมาไอออน
	$u_B = (kT_e / eM)^{1/2}$	คือ ความเร็วของบอห์ม (Bohm velocity)
	$\lambda_D = (\epsilon_0 kT_e / n_o e^2)^{1/2}$	คือ ความยาวเดอบาย

เนื่องจากแบบจำลองของไหลพลาสมาที่นำมาพิจารณานี้มีเทอมที่ขึ้นกับเวลารวมอยู่ด้วย ซึ่งมีข้อดีคือทำให้ไม่จำเป็นต้องมีการประมาณค่าที่สภาวะขอบเขต (boundary condition) สำหรับความหนาแน่นและความเร็วของไอออนให้กับเทอมที่ไม่ขึ้นกับเวลาในสมการ (2.37) และ (2.38) ซึ่งการ

ประมาณค่านี้จะมีผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการหาผลเฉลยที่สภาวะคงตัวได้ และการที่แบบจำลองนี้ไม่ได้แยกส่วนการคำนวณระหว่างบริเวณชีทกับบริเวณเนื้อพลาสมา จึงไม่เกิดปัญหาความเข้ากันได้ (matching problem) หรือความต่อเนื่องบริเวณขอบชีท อย่างที่พบในแบบจำลองที่พิจารณาแบบแยกส่วน และข้อดีของแบบจำลองของไหลพลาสมาซึ่งเป็นแบบจำลองแบบไม่แยกส่วนอีกประการหนึ่งคือไม่จำเป็นต้องกำหนดสภาวะขอบเขตของชีทอันได้แก่ สนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของประจุและการกระจายของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชีท เป็นต้น ทำให้ผลการคำนวณ โดยแบบจำลองนี้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น แต่แบบจำลองนี้มีข้อเสียสำคัญประการหนึ่งคือต้องใช้เวลาในการคำนวณเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่สถานะคงตัวนานมาก เพื่อแก้ปัญหา นี้ จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองแบบแยกส่วนที่ให้ผลเฉลยที่ถูกต้องมากขึ้น

2) แบบจำลองชีท (Sheath Model)

แบบจำลองชีท เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาเพื่อช่วยให้การคำนวณความหนาแน่นและตำแหน่งของขอบชีท ทำได้เร็วขึ้นด้วยรูปแบบสมการที่ง่ายกว่าแบบจำลองของไหลพลาสมา แบบจำลองนี้สนใจเฉพาะบริเวณที่เป็นชีทเท่านั้น โดยพิจารณาบริเวณที่เป็นชีทแยกจากเนื้อพลาสมาและมีการแก้ปัญหาค่าความเข้ากันได้หรือความต่อเนื่องบริเวณขอบชีทด้วยการกำหนดสภาวะขอบเขตที่เหมาะสม โดยขอบเขตระหว่างบริเวณทั้งสองหรือขอบชีทนิยามว่าเป็นตำแหน่งที่ความเร็วของไอออนมีค่าเท่ากับความเร็วของบอห์ม (Bohm velocity) ในการพิจารณาด้วยแบบจำลองชีทนี้ จะสมมุติว่าภายในบริเวณชีทของพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง (high density plasma, HDP) ที่ความดันต่ำจะไม่มีการชนกันระหว่างอนุภาคและไม่มีการแตกตัวเป็นไอออน ทั้งนี้เนื่องจากพลาสมาชีทจะบางถ้าพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูงและอนุภาคมีระยะปลอดการชนยาวที่ความดันต่ำ ส่วนอุณหภูมิไอออนมีค่าเป็นศูนย์ ($T_i = 0$) และ อิเล็กตรอนต้องมีพฤติกรรมเป็นไปตามทฤษฎีของโบลต์ซมันน์ โดยทั่วไปการทำงานของ HDP จะมีอุณหภูมิไอออน (kT_i) ประมาณ 0.05 eV และ อุณหภูมิอิเล็กตรอนประมาณ 3-4 eV จากสมการที่ (2.37)-(2.39) จะได้ว่า

$$\frac{d\phi_n}{dx_{ns}} = \left[2n_{neos} (e^{\phi_n} - 1) + 2(1 - 2\phi_n)^{1/2} - 1 + E_{nos}^2 \right]^{1/2} \quad (2.40)$$

เมื่อ $x_{ns} = x/\lambda_{Ds}$, $\lambda_{Ds} = (\epsilon_0 kT_e / n_{is} e^2)^{1/2}$, $n_{neos} = n_{neo} \exp(V_{nps} - V_{np})/n_{nis}$
 โดยที่ λ_{Ds} = ความยาวเดบายที่ขอบชีท
 n_{is} = ความหนาแน่นของไอออนที่ขอบชีท
 n_{neos} = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบชีท

n_{nis} = ความหนาแน่นไอออนที่ขอบซีท

E_{nos} = ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ขอบซีท

V_{nps} = ศักย์ไฟฟ้าของพลาสมาที่ขอบซีท

โดยความยาวเดบายที่ขอบซีท (sheath debye length, λ_{Ds}) หมายถึงระยะทางที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงบริเวณขอบซีทสามารถเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในซีทได้ ซึ่งมีค่าประมาณ 5×10^{-5} m

ค่าความหนาของซีทสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.40) ถ้าทราบค่า E_{nos} และ n_{nos} โดยค่าทั้งสองนี้หาได้จากผลลัพธ์ของแบบจำลองของของเหลวโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด (least square method) โดยมีค่าดังนี้

$$E_{nos} = 1.2204 \left(\frac{\lambda_{Ds}}{\lambda} \right)^{0.6974} + 0.018 \quad (2.41)$$

$$\rho_{space} = 0.7262 \left(\frac{\lambda_{Ds}}{\lambda} \right)^{0.805} + 0.0001$$

โดยสมการที่ (2.41) นี้ ใช้ได้เฉพาะในช่วงความดัน 3-30 mTorr เท่านั้น เมื่อนำสมการที่ (2.41) แทนลงในสมการที่ (2.40) จะได้สมการที่ใช้ประเมินความหนาของซีทดังนี้

$$\frac{d\phi_n}{dx_n} \approx \left[\frac{2 \left(1 - 0.73 \left(\frac{\lambda_{Ds}}{\lambda} \right)^{4/5} \right) (e^{\phi_n} - 1) + 2(1 - 2\phi_n)^{1/2}}{-2 + \left(1.2 \left(\frac{\lambda_{Ds}}{\lambda} \right)^{7/10} + 0.018 \right)^2} \right]^{1/2} \quad (2.42)$$

3) กฎของไชลด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir Law)

กฎของไชลด์-แลงมัวร์ซึ่งใช้ในการคำนวณความหนาของพลาสมาซีทที่รู้จักกันดี คำนวณได้จากแบบจำลองของไหลพลาสมา โดยที่ตั้งข้อสมมุติต่าง ๆ ดังนี้

1. ไอออนมีอุณหภูมิเป็นศูนย์ (cold ion)
2. ไม่มีการชนกันระหว่างอนุภาคในบริเวณของซีท

3. พลังงานของไอออนที่บริเวณขอบซีทซึ่งมีค่าเป็น $\mu_B^2/2$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานของไอออนที่อยู่ในภายในซีท (สมมุติว่าศักย์ไฟฟ้าของผนังมีค่ามากกว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมาก)
4. สนามไฟฟ้าที่ขอบซีทมีค่าเป็นศูนย์
5. ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ภายในซีท
6. ในบริเวณก่อนที่จะเป็นซีท (presheath) ถือว่ามีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutrality)

เมื่อนำข้อสมมุติฐานเหล่านี้ไปใช้กับสมการที่ (2.37)-(2.39) จะได้ว่า

$$x_{ns} = \frac{\sqrt{2}}{3} (-2\phi_n)^{3/4} \quad (2.43)$$

โดยกำหนดว่าที่ขอบของซีทจะอยู่ ณ ตำแหน่ง $x_{ns} = 0$ และ เมื่อเข้าใกล้ผนังมากขึ้น x_{ns} จะมีค่าเพิ่มขึ้น

พลาสมาที่นำมาพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองต่าง ๆ เป็นพลาสมาของแก๊สอาร์กอนที่ไม่ได้อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดยพลาสมาที่วางตัวอยู่ระหว่างผนังซึ่งขนานกันโดยมีระยะห่างเป็น D ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1200\lambda_D$ โดยระยะห่างนี้ถือว่ามีค่ามากกว่า λ_D มาก ($D \gg \lambda_D$) ซึ่งทำให้แน่ใจได้ว่าการชนกันของอนุภาคจะไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณก่อนที่จะเป็นซีท ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในการพิจารณาพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง จะมีข้อสันนิษฐานว่า

- ระยะปลอดการชนเฉลี่ยระหว่างไอออนกับอนุภาคที่เป็นกลางลงที่
- ความถี่ในการชนที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ν_i) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วไอออน
- จากข้อสันนิษฐานทั้งสองข้างต้นนี้จะได้ว่าที่บริเวณขอบซีทจะมีการชนแล้วไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน
- อัตราการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณก่อนที่จะเป็นซีทต้องน้อยกว่าในแหล่งกำเนิดพลาสมาทุก ๆ

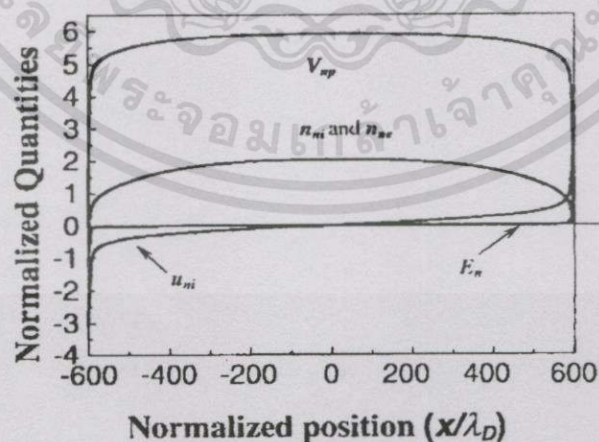
ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นพบว่า ถ้า D มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงเสียดทาน (F_c) ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแรงเสียดทานในส่วนที่เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนมีค่าน้อยลง โดยแรงเสียดทานในส่วนนี้มีค่าขึ้นกับความถี่ในการแตกตัวเป็นไอออน (ν_{iz}) และความเร็วของไอออน (u_i) เมื่อ D มีค่าเพิ่มขึ้นสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเป็นผลให้ความเร็วของไอออนมีค่าลดลง ดังนั้นแรงเสียดทานจะมีค่าลดลงถึงแม้ความถี่ในการแตกตัวเป็นไอออนจะมีค่าคงที่ ตารางที่ 2.1 แสดงค่าระยะปลอดการชน

เฉลี่ย ความถี่ในการแตกตัวเป็นไอออน และ ตำแหน่งที่มีความถี่ในการชนมากกว่าหรือเท่ากับ ความถี่ในการแตกตัวเป็นไอออนที่ค่าความดันต่าง ๆ ของพลาสมาอาร์กอน โดยใช้แบบจำลองของ ไทลพลาสมา กำหนดให้ตำแหน่งศูนย์กลางของพลาสมาอยู่ที่ $x = 0$ ส่วนที่ตำแหน่ง $x = 600\lambda_D$ เป็น ตำแหน่งของผนังด้านขวา

ตารางที่ 2.1 บริเวณที่มีการชนกันระหว่างไอออนกับอนุภาคที่เป็นกลางแล้วทำให้เกิดการแตกตัว เป็นไอออนของพลาสมาอาร์กอนที่ความดันค่าต่าง ๆ ซึ่งได้จากแบบจำลองของไทลพลาสมา โดยที่ตำแหน่งศูนย์กลางของพลาสมาอยู่ที่ $x = 0$ และ ตำแหน่งของผนังอยู่ที่ $x = \pm 600\lambda_D$

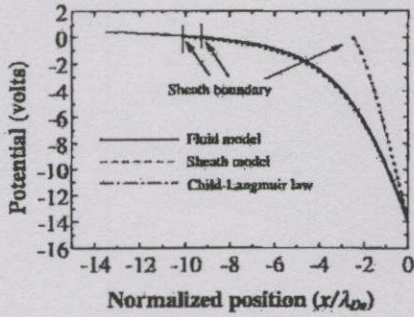
ความดัน (mTorr)	λ (m)	$v_{iz}(\text{s})^{-1}$	บริเวณที่ $v_{iz} \leq v_c$
3.0	1×10^{-2}	5.2×10^4	$x/\lambda_D \geq 137$
10.0	3×10^{-3}	3.9×10^4	$x/\lambda_D \geq 70$
20.0	1.5×10^{-3}	3.1×10^4	$x/\lambda_D \geq 35$
30.0	1×10^{-3}	2.7×10^4	$x/\lambda_D \geq 30$

รูปที่ 2.8 แสดงพารามิเตอร์ของอาร์กอนพลาสมาของทั้งระบบ โดยพารามิเตอร์เหล่านี้คำนวณ จากแบบจำลองของไทลพลาสมาทั้งหมด ซึ่งผนังสองด้านคือลงกรวด จากรูปสังเกตเห็นได้ว่า บริเวณที่ติดต่อกับผนังมีการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์อย่างรวดเร็วซึ่งทำให้ยากแก่การสังเกต ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้ต้องพิจารณาในส่วนที่เป็นชีกกับส่วนที่เป็นพลาสมาแยกกัน

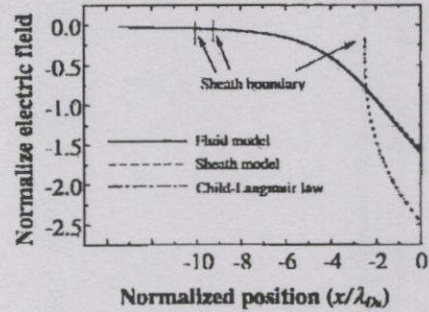


รูปที่ 2.8 พารามิเตอร์ของพลาสมาซึ่งคำนวณจากแบบจำลองของไทลของพลาสมา อาร์กอนที่ความดัน 10 mTorr

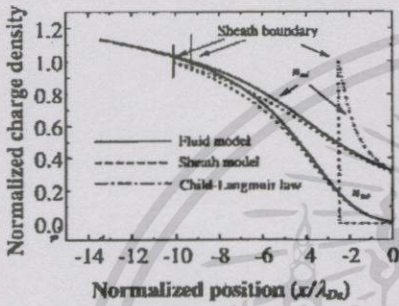
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



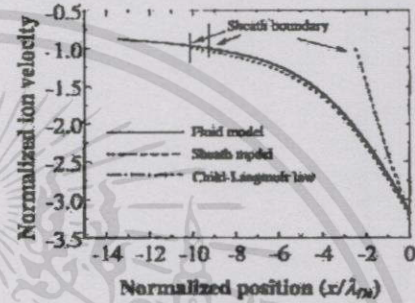
(ก)



(จ)



(ค)

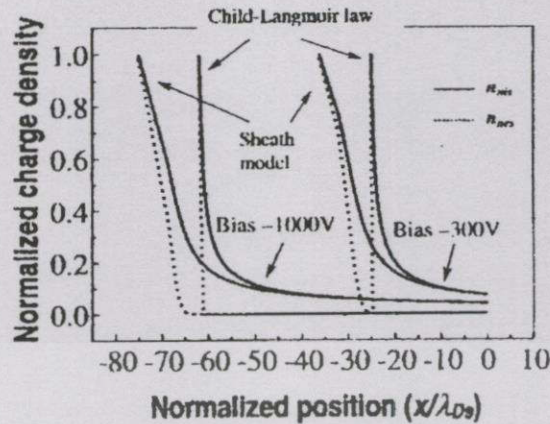


(ง)

- รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบของพารามิเตอร์พลาสมาซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลองของไหลพลาสมา แบบจำลองซีทและจากกฎของไชลด์-แลงมัวร์ ของพลาสมาอาร์กอนที่ความดัน 3 mTorr
- (ก) ศักย์ไฟฟ้าของพลาสมาในพลาสมาซีท
- (ข) สนามไฟฟ้าในพลาสมาซีท
- (ค) ความหนาแน่นของไอออนและอิเล็กตรอนในพลาสมาซีท
- (ง) ความเร็วไอออนในพลาสมาซีท

รูปที่ 2.9 แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ภายในซีท ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองของไหลพลาสมา แบบจำลองของซีท และ กฎของไชลด์-แลงมัวร์ โดยค่าความหนาแน่นของซีท (เริ่มวัดตั้งแต่จุดซึ่งมีความเร็วไอออนเท่ากับความเร็วของบอห์ม) ที่วัดได้จากแบบจำลองของเหลวมีค่าเป็น $10\lambda_{De}$ ในขณะที่ค่าที่คำนวณโดยกฎของไชลด์-แลงมัวร์ มีค่าเป็น $2.5\lambda_{De}$ โดยขั้วไฟฟ้าจะมีศักย์ไฟฟ้า $-4.7T_e$ (ประมาณ -14 โวลต์) เมื่อเทียบกับความต่างศักย์ที่ขอบของซีท

รูปที่ 2.10 แสดงความหนาแน่นของซีทที่เปลี่ยนไป เมื่อมีการป้อนความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าด้วยค่า -300 และ -1000 โวลต์ โดยมีเงื่อนไขเช่นเดียวกับรูปที่ 2.9(ก) - (ง) จากรูปจะเห็นว่า การประมาณค่าความหนาแน่นของซีทด้วยกฎของไชลด์-แลงมัวร์ จะมีค่าใกล้เคียงยิ่งขึ้นเมื่อมีการป้อนความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและไอออนในบริเวณของพลาสมาซิทที่คำนวณโดยแบบจำลองซิท และ จากกฎของไชลด์-แลงมัวร์ เมื่อมีการป้อนความต่างศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้าทางด้านขวา

4) การหาค่าความหนาของพลาสมาซิท

ความหนาของพลาสมาซิทที่คำนวณโดยแบบจำลองของไหลพลาสมา แบบจำลองซิทและกฎของไชลด์-แลงมัวร์ ได้แสดงในตารางที่ 2.2 จากผลการคำนวณเปรียบเทียบความหนาของซิทในตารางที่ 2.2 พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองของไหลพลาสมาและแบบจำลองซิทมีค่าใกล้เคียงกันและทั้งคู่มีค่าลดลงตามความดันที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความหนาที่คำนวณโดยกฎของไชลด์-แลงมัวร์มีค่าต่างไปมากและไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน ทั้งนี้เนื่องจากกฎของไชลด์-แลงมัวร์ได้ใช้ข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้นกับแบบจำลองของไหลพลาสมาในทุกบริเวณของพลาสมา ซึ่งความเป็นแล้วข้อสมมุติฐานเหล่านั้นมีความถูกต้องเฉพาะบริเวณของซิทเท่านั้น ส่วนการที่ความหนาที่คำนวณได้ไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน เกิดเนื่องจากความหนาของซิทที่คำนวณโดยกฎของไชลด์-แลงมัวร์เป็นค่าที่ขึ้นกับความหนาแน่นของพลาสมาที่ขอบซิท แต่เนื่องความดันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของพลาสมาบริเวณกึ่งกลางของเนื้อพลาสมาและบริเวณใกล้กับขอบซิทมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ที่ขอบซิทยังคงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน [10] ดังนั้นความหนาของพลาสมาซิทที่คำนวณโดยกฎของไชลด์-แลงมัวร์จึงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความดันด้วย

ตารางที่ 2.2 ค่าความหนาปกติของชีท $s_n = s/\lambda_{Ds}$ ที่คำนวณได้จากแบบจำลองของไหลพลาสมา แบบจำลองชีทและกฎของไซลด์-แลงมัวร์ ของพลาสมาอาร์กอนที่ค่าความดันต่าง ๆ โดยขอบชีท คือ ตำแหน่งที่ไอออนมีความเร็วเท่ากับความเร็วของบอห์ม

ความดัน (mTorr)	λ/λ_{Ds}	ค่าความหนาปกติของชีท (normalized sheath thickness)		
		แบบจำลองของไหล	แบบจำลอง ชีท	กฎของ ไซลด์-แลงมัวร์
3	200	9.35	10.1	2.2
10	60	7.63	8.38	2.2
20	30	6.58	7.31	2.2
30	20	5.95	6.67	2.2

2.4 ผลของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Effect)

แหล่งกำเนิดพลาสมาส่วนมากสร้างพลาสมาโดยวิธีการเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของแก๊สด้วยสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะชนและถ่ายเทพลังงานให้แก่อะตอมตามเส้นทางการเคลื่อนที่ ดังนั้นถ้าสามารถเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้มากขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนให้มากขึ้นด้วย การเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้แก่ระบบ ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_{\perp} ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (B) จะเกิดแรงกระทำต่ออนุภาคนั้นซึ่งมีค่า

$$F = Bqv_{\perp} \quad (2.44)$$

แรงที่กระทำต่ออนุภาคดังกล่าวมีทิศตั้งฉากกับความเร็วของอนุภาคและสนามแม่เหล็กซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคมวล m เคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยมีรัศมี r โดย

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB} \quad (2.45)$$

รัศมีในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเรียกว่า รัศมีไซโคลตรอน (cyclotron radius)

แรงที่กระทำต่ออนุภาคจะสร้างความเร่งที่แปรผกผันกับค่ามวลของประจุนั้นซึ่งจะมีแต่อิเล็กตรอนเท่านั้นที่จะได้รับผลกระทบของแรงนี้ สำหรับไอออนซึ่งมีมวลมากจึงได้รับผลของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับภายในเนื้อของพลาสมาจะประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นไอออนและอิเล็กตรอน ดังนั้นรัศมีการเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กของไอออนและอิเล็กตรอนจึงมีค่าต่างกันดังนี้

รัศมีไซโคลตรอนของอิเล็กตรอนพลาสมา :

$$r_e = 0.0038 \frac{\sqrt{T_e}}{B} \quad (2.46)$$

รัศมีไซโคลตรอนของไอออนพลาสมา :

$$r_i = 0.16 \frac{\sqrt{AT_i}}{QB} \quad (2.47)$$

เมื่อ

- r_e = รัศมีไซโคลตรอนของอิเล็กตรอนพลาสมา (cm)
- r_i = รัศมีไซโคลตรอนของไอออนพลาสมา (cm)
- T_e = อุณหภูมิของอิเล็กตรอนพลาสมา (eV)
- T_i = อุณหภูมิของไอออนพลาสมา (eV)
- B = สนามแม่เหล็ก (kG)
- A = เลขมวลของไอออน
- Q = สถานะประจุของไอออน (ion charge state)

อนุภาคที่เคลื่อนที่ด้วยรัศมีไซโคลตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความถี่ที่เรียกว่า ความถี่ไซโคลตรอน (cyclotron frequency) ซึ่งมีค่าเป็น

$$\omega_c = \frac{eB}{m} \quad (2.48)$$

อัตราส่วนระหว่างความเร็วตั้งฉากจากสมการที่ (2.45) กับความถี่ไซโคลตรอนมีค่าเป็น

$$r = \frac{v_{\perp}}{\omega_c} \quad (2.49)$$

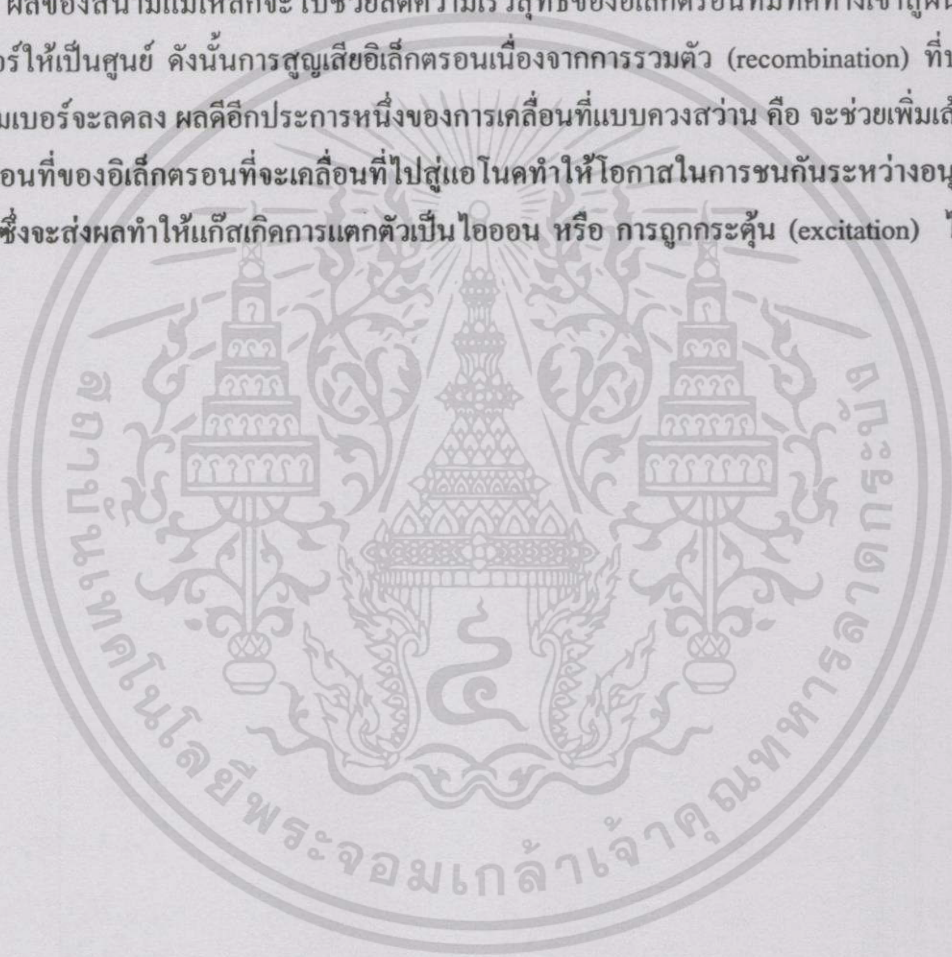
ซึ่งค่ารัศมี r ดังกล่าว เรียกว่า รัศมีลามอร์ (Lamor radius) หรือ รัศมีไซโคลตรอน โดยมีความถี่ไซโคลตรอนของไอออนและอิเล็กตรอนเป็นดังนี้

$$f_{ci} = 1.52 \text{ QB/A} \quad \text{MHz} \quad (2.50)$$

$$f_{ce} = 2.8 \text{ B} \quad \text{GHz} \quad (2.51)$$

ถ้าพิจารณากรณีที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นมุม θ กับทิศทางสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงกระทำบนอิเล็กตรอนเป็น $BeV\sin\theta$ ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่แบบควงสว่าง (helix)

ผลของสนามแม่เหล็กจะไปช่วยลดความเร็วสุทธิต่อของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางเข้าสู่ผนังของแชนเบอร์ให้เป็นศูนย์ ดังนั้นการสูญเสียอิเล็กตรอนเนื่องจากการรวมตัว (recombination) ที่บริเวณผนังแชนเบอร์จะลดลง ผลคืออีกประการหนึ่งของการเคลื่อนที่แบบควงสว่าง คือ จะช่วยเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่ไปสู่แอโนดทำให้โอกาสในการชนกันระหว่างอนุภาคมีมากขึ้นซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ไอออน หรือ การถูกกระตุ้น (excitation) ได้มากขึ้น



บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 ได้อธิบายถึงสมบัติพื้นฐานของพลาสมาแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและพฤติกรรมของแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบฮอลโลแคโทดแมกนีตรอน (hollow cathode magnetron, HOCAM) เพื่อที่จะนำไปสู่การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้ รวมทั้งกล่าวถึงหลักการของระบบคิงไอออนและการตรวจวัดจำนวนไอออนที่คิงออกมาได้

3.1 หลักการของ HOCAM

แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบฮอลโลแคโทดแมกนีตรอนมีโครงสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก 2 ขั้วสวมกัน (coaxial cylindrical diode) ทรงกระบอกชั้นนอกทำหน้าที่เป็นแอโนด ทรงกระบอกชั้นในทำด้วยตะแกรงโลหะมีขนาดเล็กกว่าพอสมควรทำหน้าที่เป็นแคโทด การเกิดดิสราร์จเกิดขึ้นภายในระหว่างขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกทั้งสอง ไอออนจะเกิดขึ้นบริเวณโคครอบขั้วแคโทดและถูกรวบรวมไว้ภายในตะแกรงของแคโทด โดยไอออนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากกระบวนการชนกับอิเล็กตรอน (electron impact) สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของไดโอดสุญญากาศแมกนีตรอนซึ่งอธิบายโดยฮัลล์ (Hull) [2, 12] ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการเกิดดิสราร์จของแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบฮอลโลแคโทดแมกนีตรอนได้เช่นกัน การอธิบายพฤติกรรมของ HOCAM โดยฮัลล์ เป็นการกล่าวถึงพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กมีผลต่ออัตราการโคจรและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบริเวณรอบ ๆ ขั้วแคโทด โดยความหนาแน่นและวงโคจรของอิเล็กตรอนจะมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สในระบบ

เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วแคโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเคลื่อนที่อยู่ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดรูปทรงกระบอกซึ่งแสดงดังรูปที่

3.1

จากสมการแรงของโลเร็นตซ์ (Lorentz's force equation)

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = e[\vec{E}_0 + \vec{v} \times \vec{B}_0] \quad (3.1)$$

เมื่อ \vec{F} = แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอน

e = ประจุของอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m = มวลของอิเล็กตรอน = 9.1×10^{-31} กิโลกรัม

\vec{v} = ความเร็วของอิเล็กตรอน

\vec{E}_0 = สนามไฟฟ้า

\vec{B}_0 = สนามแม่เหล็ก

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแนวแกน y และ z โดยสมการที่ (3.1) จะได้ว่า

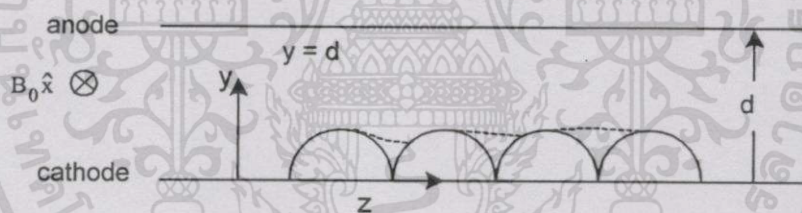
$$\frac{dy}{dt} = v_{y0} \cos \omega_c t + \left(\frac{E_0}{B_0} - v_{z0} \right) \sin \omega_c t \quad (3.2)$$

$$\frac{dz}{dt} = v_{y0} \sin \omega_c t + \left(\frac{E_0}{B_0} - v_{z0} \right) (1 - \cos \omega_c t) + v_{z0} \quad (3.3)$$

เมื่อ

v_{y0} และ v_{z0} คือ ความเร็วของอิเล็กตรอนในแนวแกน y และ z

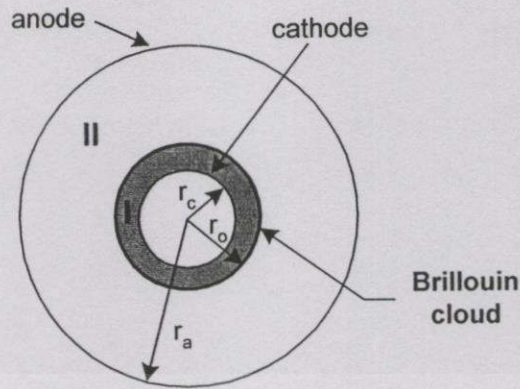
$$\omega_c \equiv \left(\frac{e}{m} \right) B_0$$



รูปที่ 3.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก

ในกรณีที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากแคโทดด้วยความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์เส้นทางของอิเล็กตรอนจะเป็นดังเส้นทึบในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นเส้นทางการเดินทางของอิเล็กตรอนที่ไม่ได้คิดแรงเนื่องจากการผลัดกันของอิเล็กตรอนในบริเวณขั้วแคโทด (ในกรณีที่นำแรงผลัดกันของอิเล็กตรอนมาพิจารณาด้วย เส้นทางเดินของอิเล็กตรอนเป็นดังเส้นประดังในรูปที่ 3.1) โดยกลุ่มของอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่รอบ ๆ ขั้วแคโทดนั้นเรียกว่า Brillouin cloud [12] ในขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทรงกระบอกสวมกันอยู่ ลักษณะของ Brillouin cloud จะเป็นรูปร่างแหวนอยู่รอบ ๆ ขั้วแคโทด ดังแสดงดังรูปที่

3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบ ๆ ขั้วแคโทด

ความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอน ($\dot{\theta}$) รอบ ๆ ขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกหาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงมุมซึ่งมีค่าเท่ากับ โมเมนตัมของแรงเชิงมุม :

$$\frac{d}{dt}(mr^2\dot{\theta}) = rF_{\theta} = -re\vec{v} \times B_0 \hat{z}|_{\theta\text{-component}} = er \dot{\theta} B_0 \quad (3.4)$$

อินทิเกรตทั้งสองข้าง

$$mr^2\dot{\theta} = eB_0 \int r \dot{r} dt = eB_0 \frac{r^2}{2} \Big|_{r_c}^r \quad (3.5)$$

ดังนั้นความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอนมีค่าเป็น

$$\dot{\theta} = \frac{eB_0}{2m} \frac{r^2 - r_c^2}{r^2} = \frac{\omega_c}{2} \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2} \right) \quad (3.6)$$

เมื่อ

e = ประจุของอิเล็กตรอน

r_c = รัศมีของแคโทด

r = รัศมีการโคจรของอิเล็กตรอน

จากสมการที่ (3.6) จะเห็นได้ว่าเมื่อ $r = r_c$ ความเร็วเชิงมุมจะมีค่าเป็นศูนย์และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ r มีค่าเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นลักษณะสำคัญของ Brillouin cloud คืออิเล็กตรอนที่โคจรห่างจากขั้วแคโทดมากกว่าจะมีความเร็วสูงกว่าอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่ใกล้ขั้วแคโทดและอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่ในวงรัศมีที่อยู่ห่างจากขั้วแคโทดมากที่สุด (r_o) ก็จะมีความเร็วมากที่สุดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนเกิดจากพลังงานศักย์ ดังนั้นสามารถเขียนศักย์ไฟฟ้า $V(r)$ ได้ดังนี้

$$V(r) = \frac{K.E}{e} = \frac{1}{2} \frac{m r^2 \dot{\theta}^2}{e} = \frac{\omega_c^2 m (r^2 - r_c^2)^2}{8e r^2} \quad (3.7)$$

หรือ

$$V(r) = \frac{eB_0^2}{8m} \left(\frac{r^2 - r_c^2}{r} \right)^2 \quad (3.8)$$

ในกรณีที่เรاپ้อนสนามแม่เหล็กให้กับระบบด้วยค่า B_0 ค่าของความต่างศักย์สูงสุดที่ป้อนให้ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดเพื่อให้รัศมี Brillouin cloud มีขนาด r_a จะมีค่าเป็น

$$V_{A,max} = \frac{eB_0^2}{8m} \left(\frac{r_a^2 - r_c^2}{r_a} \right)^2 \quad (3.9)$$

แต่ถ้ากำหนดให้สนามไฟฟ้ามีค่า V_A ค่าของสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดเพื่อให้เกิด Brillouin cloud มีค่าดังสมการ

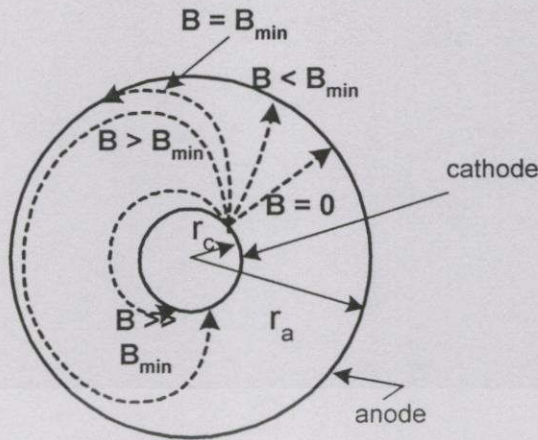
$$\frac{B_{min}^2}{V_A} = \frac{8m}{e} \left(\frac{r_a}{r_a^2 - r_c^2} \right)^2 \quad (3.10)$$

สำหรับระบบเมกนีตรอนสมการที่ (3.10) รู้จักกันดีในนามของสภาวะคัตออฟของฮุลล์ (Hull cutoff condition) เมื่อ V_A มีหน่วยเป็นโวลต์ r มีหน่วยเป็นเซนติเมตร และ B_{min} มีหน่วยเป็นเกาส์(Gauss) เราสามารถเขียนสมการที่ (3.10) ใหม่ได้เป็น

$$B_{min} = \sqrt{45.5 V_A} \frac{r_a}{r_a^2 - r_c^2} \quad (3.11)$$

ในกรณี $B < B_{min}$ อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดจะเคลื่อนที่ด้วยรัศมีการโคจรที่ใหญ่จนเข้าชนแอโนดและเกิดกระแสอิเล็กตรอนขึ้นที่ขั้วแอโนด แต่ถ้า $B > B_{min}$ รัศมีวงนอกสุดของ Brillouin cloud จะมีค่าน้อยกว่า r_a ($r_0 < r_a$) จึงไม่มีกระแสเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวรู้จักกันในนามของ สนามแม่เหล็กคัตออฟของฮุลล์ (Hull cutoff magnetic field) ขนาดรัศมีของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อป้อนค่าสนามแม่เหล็กขนาดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เส้นทางเดินของอิเล็กตรอนเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าต่าง ๆ

พิจารณาแรงในทิศทางขององค์ประกอบ r จากสมการที่ (3.1) จะได้ว่า

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = -\frac{e}{m}(E_r + r\dot{\theta}B_0) \quad (3.12)$$

ในกรณีที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลม $\ddot{r} = 0$ จากรูปที่ 3.2 สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าใน Brillouin cloud (บริเวณ I) ได้ดังนี้

$$E_{r1} = \frac{r\dot{\theta}(\dot{\theta} - \omega_c)}{e/m} = -\frac{eB_0^2}{m4}r\left(1 - \frac{r_c^4}{r^4}\right) \quad (3.13)$$

จากสมการปัวส์ซอง: $\rho_0 = \epsilon_0 \nabla \cdot E$ ดังนั้น

$$\rho_0 = \frac{\epsilon_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_{r1}) = -\frac{eB_0^2}{2m\epsilon_0} \left(1 + \frac{r_c^4}{r^4}\right) \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) พบว่า ความหนาแน่นของประจุบริเวณที่ใกล้กับขั้วแคโทดจะมีค่ามากที่สุด และสามารถเพิ่มความหนาแน่นประจุได้โดยการเพิ่มสนามแม่เหล็ก

ส่วนสนามไฟฟ้าภายนอก Brillouin cloud (บริเวณ II) หาได้จากทฤษฎีของเกาส์ (Gauss' Theorem) ซึ่งกล่าวว่า ผลรวมของฟลักซ์ไฟฟ้า (\bar{D}) ที่ออกจากพื้นผิวปิดมีค่าเท่ากับประจุที่บริเวณพื้นผิว (\bar{s})

$$\int \vec{D} \cdot d\vec{s} = \epsilon_0 E_{rII} 2\pi r dz = \text{charge enclosed } Q \quad (3.15)$$

$$= \int_{r_c}^{r_0} \rho_0(r) 2\pi r dr dz = -2\pi \frac{eB_0^2 \epsilon_0}{2m} \frac{r_0^4 - r_c^4}{2r_0^2} dz$$

ดังนั้น

$$E_{rII} = -\frac{eB_0^2}{4m} \left(\frac{r_0^4 - r_c^2}{r_0^2} \right) \frac{1}{r} \quad (3.16)$$

โดยความต่างศักย์ (V_A) ที่ตกคร่อมระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด เพื่อให้รัศมีภายนอกของ Brillouin cloud มีค่าเป็น r_0 คือ

$$V_A = -\int_{r_c}^{r_0} \vec{E}_r \cdot d\vec{r} = -\int_{r_c}^{r_0} E_{rI} dr - \int_{r_0}^{r_c} E_{rII} dr \quad (3.17)$$

$$V_A = \frac{e}{m} \frac{B_0^2}{8} \left[\left(\frac{r_0^2 - r_c^2}{r_0} \right)^2 + \frac{r_0^4 - r_c^4}{r_0^2} \ln \left(\frac{r_0}{r_c} \right)^2 \right] \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.14) และ (3.18) ถ้าป้อนสนามแม่เหล็ก (B_0) และความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด (V_A) เมื่อรู้ค่าของรัศมีแคโทด (r_c) และรัศมีของแอโนด (r_a) จะสามารถคำนวณความหนาแน่นของประจุ (ρ_0) และรัศมีวงนอกสุดของ Brillouin cloud (r_0) ได้

จากคำอธิบายของฮิลล์ที่มีต่อพฤติกรรมของอิเล็กตรอนภายในขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะเห็นว่า สนามแม่เหล็กจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊ส โดยเมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มมากจะทำให้อิเล็กตรอนมีเส้นทางในการเดินทางมากขึ้น (ไม่ชนขั้วแอโนด) ซึ่งส่งผลทำให้มีโอกาสในการชนกับโมเลกุลของแก๊สมากขึ้น นั่นหมายความว่า จะทำให้มีไอออนเกิดมากขึ้นด้วย โดยไอออนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนจะเกิดที่บริเวณใกล้กับขั้วแคโทดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยเช่นกัน [13]

ขั้วแคโทดของ HOCAM ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นตะแกรงทรงกระบอก ซึ่งนอกจากเป็นการลดพื้นที่ของการเข้าชนของไอออนกับขั้วแคโทด ตะแกรงนี้ยังทำหน้าที่รวบรวมไอออนไว้ภายในทรงกระบอกด้วย ซึ่งทำให้การนำไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยระบบการดึงไอออน (ion extraction) มีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.2 การดึงไอออน (Ion Extraction)

ส่วนประกอบหลักที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของแหล่งกำเนิดไอออนนอกเหนือจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแล้วได้แก่ ระบบการดึงไอออน ส่วนนี้จะทำหน้าที่ดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมา ทำให้เกิดลำไอออนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ระบบหรือสิ่งที่ใช้ในการดึงไอออนออกมาใช้งานนี้เรียกว่า ตัวดึงไอออน (ion extractor)

3.2.1 หลักการพื้นฐานของตัวดึงไอออน

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แรงที่กระทำต่ออนุภาคจะเป็นไปตามสมการแรงของโลเร็นตซ์ (Lorentz Force Equation) จากสมการที่ (3.1) ในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก $\vec{B} = 0$

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (3.19)$$

หลักการพื้นฐานของระบบการดึงไอออน คือ การใช้สนามไฟฟ้าในการดึงอนุภาคที่มีประจุออกมา ดังนั้นระบบการดึงไอออนจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งถูกป้อนด้วยค่าความต่างศักย์สูง (high voltage) ขั้วไฟฟ้านี้จะมีรูขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ไอออนที่ถูกดึงด้วยสนามไฟฟ้าสามารถวิ่งผ่านออกมาได้เพื่อนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ได้ ลักษณะของระบบการดึงไอออนแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยกระแสไอออนสูงสุดที่สามารถดึงได้จากระบบการดึงไอออนจะมีความสัมพันธ์กับค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบการดึงไอออน ซึ่งเป็นไปตามกฎของไซลด์-แลงมัวร์ ดังสมการ

$$j = \frac{4}{9}\epsilon_0 \sqrt{\frac{2q}{m_i}} \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (3.20)$$

เมื่อ

j = ความหนาแน่นของกระแสไอออน

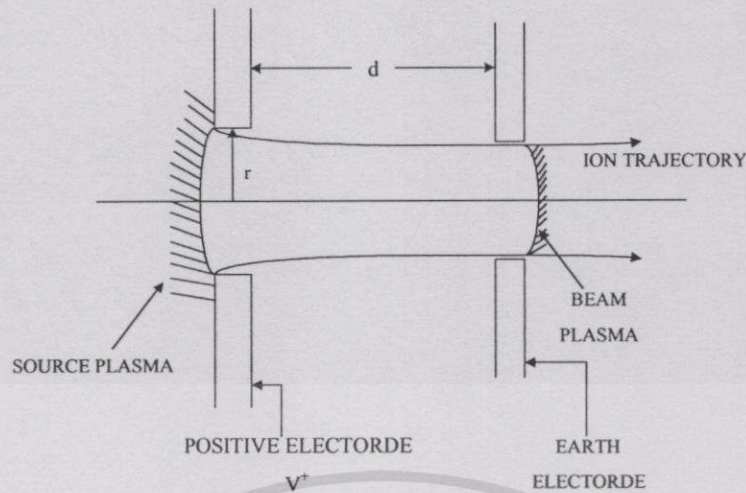
q = ประจุของไอออน

m_i = มวลของไอออน

V = ความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบ

d = ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (extraction gap width)

ϵ_0 = เพอร์มิติวิตีของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m



รูปที่ 3.4 ระบบการดึงไอออน

ระบบการดึงที่นำมาใช้กับกฎของ ไชลด์-แลงมัวร์ [13] ได้นั้นต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็น ไอออนภายในระบบต้องมีค่าน้อยมาก
2. ความหนาซีทของไอออนในระบบการดึงต้องมีความบางมากพอในระดับที่มีการชนกันของไอออนภายในซีทเพียง 2-3 ครั้งเท่านั้น
3. กระแสของลำไอออนที่ดึง ได้สูงสุดจะต้องไม่ขึ้นกับ ไอออนในแหล่งกำเนิดพลาสมา [1]

3.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อลำไอออนของตัวดึงไอออน [1]

สำหรับระบบดึงไอออนที่มีเฉพาะสนามไฟฟ้า ไอออนจะถูกแรงกระทำเพื่อให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นแรงไฟฟ้า (flux line) ของระบบดึงไอออนหรือโนติสตั้งฉากกับเส้นสมศักย์ (equipotential line) นอกจากนี้ลักษณะรูปร่างของลำไอออนยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างด้วยกันแต่ที่สำคัญ ๆ ได้แก่ ระดับความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบ (applied high voltage) รูปร่างพื้นผิวของแหล่งกำเนิด (shape of emitting surface) และความหนาแน่นของประจุ (space charge density)

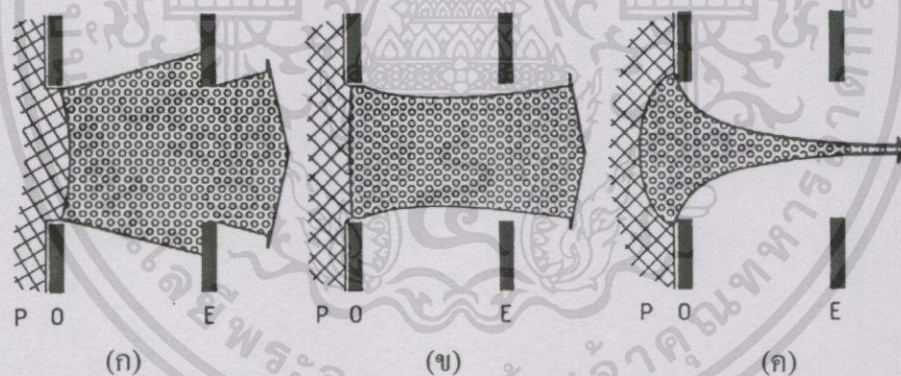
1) ระดับความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบดึงไอออน

ขั้วไฟฟ้าขั้วแรกที่สัมผัสกับพลาสมาในแหล่งกำเนิดพลาสมาในรูปที่ 3.4 ซึ่งเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าพลาสมา (plasma electrode) ซึ่งจะมีศักย์ที่สูงที่สุดในระบบการดึงไอออน เพื่อที่จะเร่งหรือผลักอนุภาคที่มีประจุบวกออกจากระบบ ขั้วไฟฟ้าขั้วที่สองเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าตัวดึง (extractor electrode) จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ ทำหน้าที่ดึงไอออนที่มีประจุบวกที่ถูกผลักออกมาโดยขั้วไฟฟ้าขั้วแรกให้

ออกสู่นอกระบบเพื่อเกิดเป็นลำไอออนต่อไป นอกจากนั้น ขั้วไฟฟ้าตัวดึง ยังทำหน้าที่ผลักอนุภาคที่เป็นลบหรืออิเล็กตรอน ไม่ให้ออกมากับลำไอออนด้วย

2) รูปร่างพื้นผิวของการเปล่งแสง

พื้นผิวของการเปล่งแสงคือรอยต่อระหว่างพลาสมาดิซาร์จกับอนุภาคที่ถูกดึงออกมา รูปร่างพื้นผิวของการเปล่งแสงมีอยู่หลายลักษณะด้วยกัน ซึ่งอาจจะมีรูปร่างพื้นผิวที่แน่นอน (solid) หรืออาจมีลักษณะที่ยืดหยุ่นคือมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงได้ (flexible) รูปร่างพื้นผิวของการเปล่งแสงที่มีลักษณะคงตัวจะพบได้ในแหล่งกำเนิดไอออนแบบพื้นผิวและแบบใช้สนามไฟฟ้า ส่วนรูปร่างพื้นผิวของแหล่งกำเนิดแบบยืดหยุ่นได้จะพบได้ในแหล่งกำเนิดพลาสมา (plasma source) ในกรณีที่เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาพื้นผิวของการเปล่งแสง เรียกว่า เมนิคัส (meniscus) ซึ่งก็คือ พลาสมาชิต นั่นเอง รูปร่างลักษณะของเมนิคัสจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเงื่อนไขหลายประการ ได้แก่ ขอบเขตของสนามที่ป้อนให้กับระบบ ความหนาแน่นของไอออน และ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา ตลอดจนจำนวนไอออนที่อยู่ในบริเวณพื้นผิว โดยที่ความดันลิกและตำแหน่งของเมนิคัสจะมีผลต่อลักษณะของลำไอออนที่ดึงออกมาได้ดังแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะลำไอออนที่ดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา

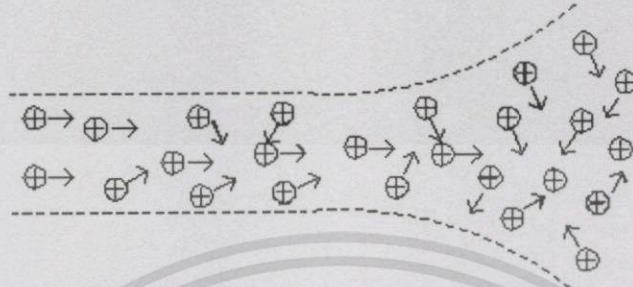
- (ก) พลาสมามีความหนาแน่นมากเกินไป
- (ข) พลาสมามีความหนาแน่นปานกลาง
- (ค) พลาสมามีความหนาแน่นต่ำเกินไป

3) ความหนาแน่นของประจุ

เมื่ออนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันมาอยู่รวมกันทำให้เกิดแรงผลักรังซึ่งกันและกัน เป็นผลให้ลำไอออนมีลักษณะบานออก การบานของลำไอออนเป็นปัญหาสำคัญโดยเฉพาะกรณีที่กระแสลำ

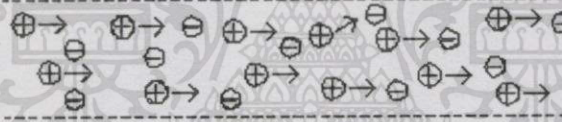
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนที่มีค่าสูงแต่พลังงานต่ำ [14] เนื่องจากภายในลำไอออนมีความหนาแน่นของไอออนสูงมาก และไอออนที่มีพลังงานต่ำนั้นจะเคลื่อนที่ได้ช้าทำให้เมื่อเคลื่อนที่ได้เพียงระยะหนึ่งก็จะทำให้ลำไอออนนั้นบานออกเนื่องจากแรงผลักระหว่างประจุดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะการบานของลำไอออนกระแสสูงพลังงานต่ำ

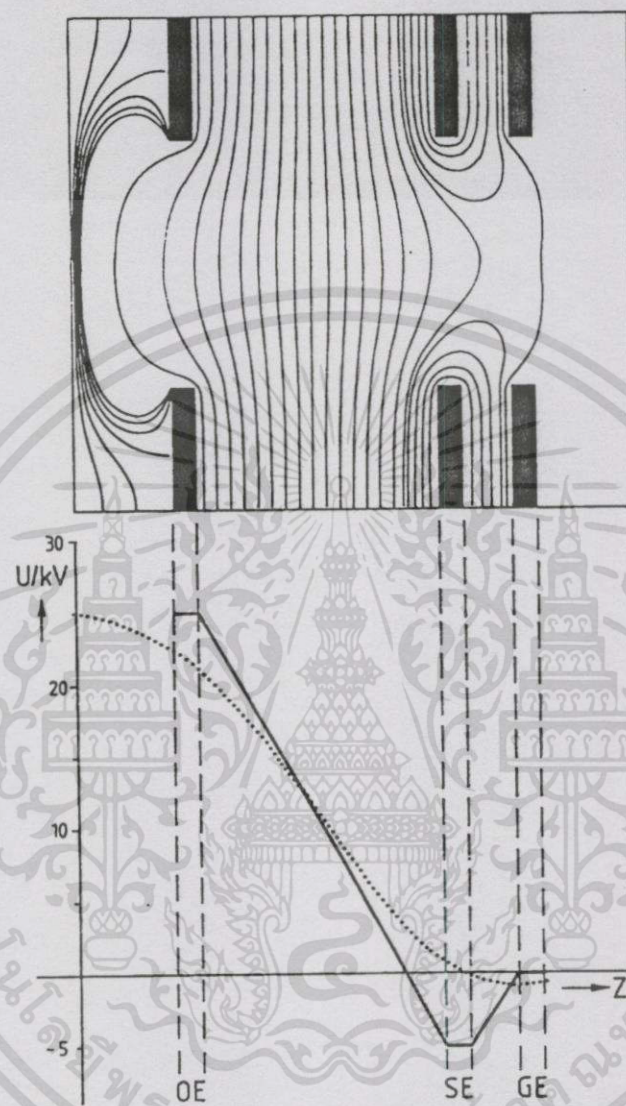
ผลจากแรงผลักกันระหว่างประจุนี้สามารถลดลงได้โดยการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนภายในบริเวณช่องว่างของชุดตัวค้ำไอออน (extraction gap) เพื่อเป็นการลดแรงผลักระหว่างประจุบวกภายในลำไอออน



รูปที่ 3.7 ลักษณะลำไอออนที่มีการลดแรงผลักกันระหว่างประจุด้วยอิเล็กตรอน

จำนวนอิเล็กตรอนในบริเวณช่องว่างของชุดตัวค้ำไอออนสามารถสร้างเพิ่มขึ้นได้โดยการยอมให้มีอนุภาคของแก๊สหลงเหลือ (residual gas particle) อยู่ภายในช่องว่างของชุดตัวค้ำไอออนบ้างเล็กน้อย อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นโดยกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากถูกชนโดยไอออน การเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนนั้นนอกจากจะมีผลคือทำให้ลำไอออนมีการบานน้อยลงแล้วก็มีผลเสียติดตามมาด้วยเช่นกัน ผลเสียดังกล่าวคือ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าของระบบการค้ำไอออนดึงให้วิ่งย้อนกลับเข้าสู่แหล่งกำเนิดพลาสมา ทำให้เกิดการหักล้างกับประจุบวกในพลาสมา เป็นผลให้ความหนาแน่นของไอออนพลาสมาในแหล่งกำเนิดพลาสมาลดลงอย่างมาก และยังทำให้อิเล็กตรอนภายในระบบค้ำไอออนน้อยลงด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนวิ่งกลับเข้าสู่แหล่งกำเนิดพลาสมา จึงต้องพยายามกักอิเล็กตรอนเหล่านี้ไว้ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มขั้วไฟฟ้าให้กับระบบอีกหนึ่งขั้ว ขั้วไฟฟ้านี้เรียกว่า ขั้วไฟฟ้ากำบัง (screening electrode) และเรียกกระบวนการค้ำไอออนแบบนี้ว่าระบบเร่ง/หน่วง (accel/decel system) แสดงดังรูปที่ 3.7 ศักย์ไฟฟ้าของขั้ว

ไฟฟ้ากำบัง จะเป็นลบที่มีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดบ่อศักย์ (negative potential well) และ อิเล็กตรอนจะถูกกักโดยบ่อศักย์นี้



รูปที่ 3.8 รูปบน : ตัวอย่างระบบการดึงแบบเร่ง/หน่วง และ เส้นสมศักย์ของระบบเมื่ออยู่ในระบบสุญญากาศ

รูปล่าง : ไดอะแกรมแสดงศักย์ไฟฟ้า (U) ตามแนวแกน Z

เส้นทึบ ขณะไม่มีลำไอออนวิ่งผ่านระบบ

เส้นประ ขณะมีลำไอออนวิ่งผ่านระบบ

3.3 การวัดกระแสไอออน

ปัจจุบันมีการนำเอาลำไอออนไปประยุกต์ใช้งานจำนวนมากในสายงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น การพัฒนาในระบบการผลิตทางอุตสาหกรรมหรือการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำการสร้างแหล่งกำเนิดไอออนให้มีลำไอออนออกมาตามที่ต้องการเพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานต่าง ๆ จึงจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบพารามิเตอร์หลัก ๆ ที่บ่งบอกสมบัติของลำไอออน พารามิเตอร์ที่สำคัญของลำไอออน ได้แก่

1. กระแสลำไอออน
2. รูปร่างลำไอออน (Beam Profile)

ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงวิธีการวัดกระแสลำไอออน

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบอุปกรณ์สำหรับวัดกระแสของลำไอออน [7] ก็คือระดับพลังงานของลำไอออน ความหนาแน่นของไอออน กำลังของลำไอออน และ อัตราการบันทึกของเครื่องมือวัด โดยหลักใหญ่ ๆ ของการวัดกระแสของลำไอออนแยกออกเป็นสองเทคนิคด้วยกัน ได้แก่ การวัดแบบทำลาย (Destructive Measuring) และการวัดแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Measuring) สำหรับรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดกระแสลำไอออนด้วยฟาราเดย์ (faraday cup) เท่านั้นซึ่งเป็นการวัดแบบทำลาย

ด้วยฟาราเดย์เป็นเครื่องมือวัดกระแสไอออนที่ใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งจะดึงเอาไอออนจากลำไอออนมาเก็บไว้ในถ้วย (cup) ที่ทำด้วยโลหะ โดยประจุที่สะสมในถ้วยจะถูกวัดโดยผ่านตัวต้านทานที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว จะเห็นได้ว่าการวัดค่ากระแสไอออนด้วยวิธีนี้เป็นกรวัดแบบทำลาย ซึ่งในการวัดกระแสด้วยวิธีนี้จะต้องสูญเสียอนุภาคไอออนไปในการวัด ในการวัดกระแสไอออนด้วยถ้วยฟาราเดย์นั้น ผลการวัดจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นถ้าเกิดปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้

- มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิหรืออนุภาคอื่น ๆ จากถ้วยฟาราเดย์
- เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สที่อยู่ภายในถ้วยฟาราเดย์
- เกิดกระแสรั่วไหลเนื่องจากความเสื่อมของวัสดุที่เป็นฉนวน เนื่องจากถูกเคลือบด้วยโลหะจากการสปัตเตอร์ (sputtering) หรือ อาจเกิดจากอุณหภูมิที่สูงมาก
- เกิดกระแสรั่วไหลเนื่องจากจากนำไฟฟ้าของระบบหล่อเย็น
- ความร้อนที่สูงขึ้นเนื่องจากกำลังของลำไอออนที่มีค่าสูง

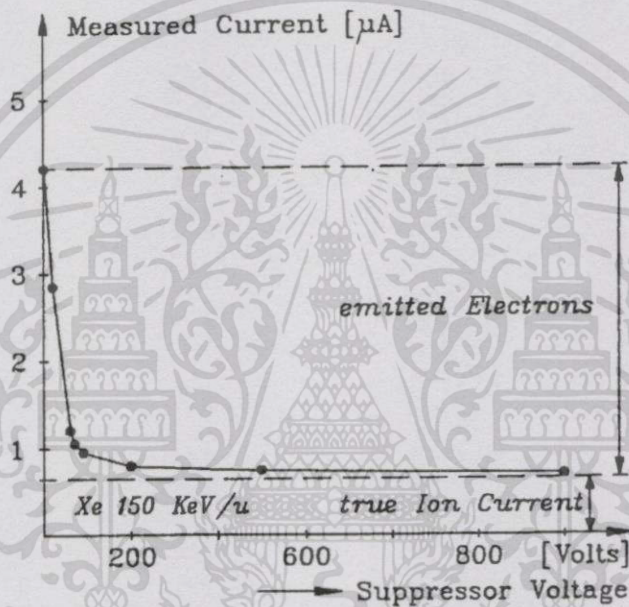
ในกรณีของไอออนของไนโตรเจนที่มีพลังงานต่ำกว่า 300 keV สัมประสิทธิ์การเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าอยู่ในช่วง 1-10

เนื่องจากฟลักซ์ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าแปรผันกับ $\cos \theta$ โดย θ เป็นมุมระหว่างทิศทางของอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับแนวแกนลำไอออน ดังนั้นฟลักซ์ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (flux of

secondary electron , f ที่วิ่งออกมาจากถ้วยจึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความกว้างของปากถ้วย (R) กับ ความลึกของถ้วย (L_{FC}) ซึ่งในการประมาณค่าสามารถประมาณได้ว่า

$$f \approx \frac{\sin^2 \theta_1}{2} = \frac{R^2}{2(R^2 + L_{FC}^2)} \quad (3.21)$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{R}{L_{FC}} \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.9 ผลของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ากักกัน (suppressor voltage) ที่มีต่อกระแสที่วัดได้

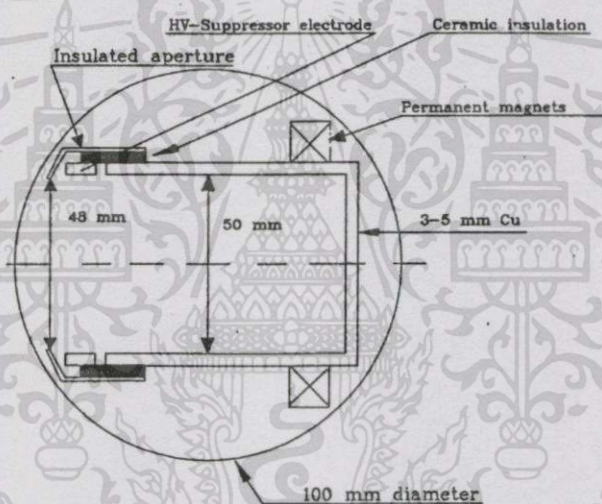
เพื่อลดจำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วิ่งออกจากถ้วยฟาราเดย์ ในการออกแบบถ้วยฟาราเดย์จึงต้องออกแบบให้ $L_{FC} \gg R$ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ แต่จำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วิ่งออกจากถ้วยฟาราเดย์สามารถลดลงได้โดยการใช้สนามไฟฟ้ากักกัน ซึ่งทำได้โดยใส่ขั้วไฟฟ้ากักกัน (suppressor electrode) ไว้ข้างหน้าถ้วย จากรูปที่ 3.9 แสดงค่ากระแสไอออนของ Xe ซึ่งมีพลังงาน 150 keV/u โดยกระแสที่วัดได้จากถ้วยจะมีค่าขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้ากักกัน (suppressor voltage) ประสิทธิภาพในการกักกันอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะดีขึ้นถ้ามีสนามแม่เหล็กมาช่วยทำให้อิเล็กตรอนโคจรรอบขั้วด้วยรัศมีที่น้อยกว่าความกว้างของปากถ้วย ดังสมการ

$$\rho_e = \frac{\sqrt{2m_e E_e}}{eB} \approx 3.37 \frac{\sqrt{E_e}}{B} \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ
- ρ_c = รัศมีการโคจรของอิเล็กตรอน (mm)
 - E_c = พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน (eV)
 - B = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (mT)

รูปที่ 3.10 แสดงโครงสร้างของถ้วยฟาราเดย์แบบที่ไม่มีระบบหล่อเย็น โครงสร้างนี้มีการลดความผิดพลาดเนื่องจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิด้วยการใช้ขั้วไฟฟ้ากักกันและยังลดผลเนื่องจากการสปีดเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลด้วยการใส่ฉนวนซึ่งเป็นเซรามิก โดยทั่วไปเมื่อมีอนุภาคไอออนที่มีพลังงานเพียงพอตกกระทบถ้วยฟาราเดย์ จะทำให้เกิดการสปีดเตอร์ ค่ายึดค้ำของการสปีดเตอร์ของโลหะจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาทำถ้วยฟาราเดย์และพลังงานของไอออนที่ตกกระทบ



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของถ้วยฟาราเดย์แบบที่ไม่มีระบบหล่อเย็น

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดไอออนชนิด HOCAM

ในการสร้างแหล่งกำเนิดไอออนนั้นนอกจากการออกแบบระบบของแหล่งกำเนิดพลาสมาให้เหมาะสมแล้วนั้น การสร้างและออกแบบระบบสุญญากาศยังเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการสร้างแหล่งกำเนิดไอออนอีกด้วย ส่วนประกอบอีกอย่างหนึ่งที่ต้องออกแบบและสร้างสำหรับงานวิจัยนี้และสำคัญต่อแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮอโลโทดคือส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็ก ส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้เป็นแบบขดลวดโซลินอยด์ ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบของส่วนประกอบต่าง ๆ จะได้อธิบายต่อไป

4.1 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ ได้แก่

4.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ

ระบบปั๊มสุญญากาศ ทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากระบบ ในการสร้างแหล่งกำเนิดไอออนจำเป็นต้องเลือกขนาดของปั๊มให้มีขนาดเหมาะสม มีอัตราการปั๊มสูงพอที่จะสามารถรักษาความดันให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานได้ ระบบปั๊มสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วยปั๊ม 2 ตัวได้แก่ ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (diffusion pump) และ ปั๊มโรตารี (rotary pump)

1) ปั๊มไอฟุ้งกระจาย

ปั๊มไอฟุ้งกระจาย สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้รุ่นดิฟสแต็ค 160/700 (Diffstak 160/700) ของบริษัท Edwards มีความเร็วปั๊ม (pumping speed) 700 l/s ซึ่งเป็นความเร็วของการปั๊มที่ปากของปั๊มในการใช้งานจะต้องมีการต่อท่อเชื่อมระหว่างตัวปั๊มกับแชมเบอร์สุญญากาศ (vacuum chamber) เป็นผลให้ความเร็วปั๊มที่แท้จริงที่เรียกว่า ความเร็วปั๊มยังผล (effective pumping speed) ของระบบมีค่าลดลง [15] ซึ่งสามารถคำนวณ ได้โดย

$$\frac{1}{S_c} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ S_c = ความเร็วปั๊มยังผล
 S_p = ความเร็วปั๊มของ ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
 C = ค่าความนำ (conductance) ของท่อ

สำหรับงานวิจัยนี้ ท่อต่อระหว่างแชนเบอร์สุญญากาศกับตัวปั๊มไอฟุ้งกระจาย มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 mm มีความยาว 10 cm จากตารางค่าความนำของท่อแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก1 [16]จะได้ว่าท่อมีค่าความนำ 1484 l/s ดังนั้นจากสมการที่ 4.1 จะได้ว่า

$$\frac{1}{S_c} = \frac{1}{700} + \frac{1}{1484}$$

$$S_c = 475.64 \text{ l/s} \quad (4.2)$$

2) ปั๊มโรตารี (rotary pump)

สำหรับปั๊มโรตารีการคำนวณความเร็วปั๊มสามารถทำได้ดังนี้

$$S_{\text{rot}} \geq \frac{Q_{\text{max}}}{\text{CBP}} \quad (4.3)$$

เมื่อ S_{rot} = ความเร็วปั๊มของปั๊มโรตารี
 Q_{max} = อัตราส่งผ่านสูงสุด (maximum throughput)
 CBP = ความดันท้ายวิกฤต (critical backing pressure)

Q_{max} หาได้จากกราฟแสดงอัตราการปั๊ม (pump curve) โดยทั่วไปที่ความดัน 10^{-2} mbar จะมีความเร็วปั๊ม = 60 l/s ดังนั้น $Q_{\text{max}} = (60 \text{ l/s})(10^{-2} \text{ mbar}) = 0.6 \text{ mbar.l/s}$ สำหรับ CBP เป็นสมบัติของน้ำมันที่ใช้กับปั๊มในที่นี้เลือกใช้น้ำมันเบอร์ 704EU ของ Edwards มีค่า $\text{CBP} = 0.8 \text{ mbar}$ จากสมการที่ 4.3 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 S_{rot} &\geq \frac{Q_{max}}{CBP} \\
 &\geq \frac{0.6 \text{ mbar.l/s}}{0.8 \text{ mbar}} \\
 &\geq 0.75 \text{ l/s} \\
 &\geq \frac{(0.75 \text{ l/s})(3600 \text{ s/hr})}{(1000 \text{ l/m}^3)} \\
 &\geq 2.7 \text{ m}^3/\text{hr}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ปั๊มโรตารีแวน (Rotary Vane Pump) รุ่น RV12 ของบริษัท Edwards ซึ่งมี ความเร็วปั๊ม $12 \text{ m}^3/\text{hr}$

ในการออกแบบแหล่งกำเนิดไอออนเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจะต้องทดลองปรับอัตรา การไหลของแก๊สที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดไอออน ดังนั้นต้องคำนวณว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของ แก๊สแล้วระบบสุญญากาศที่ออกแบบไว้ยังสามารถรักษาระดับความดันได้หรือไม่

เมื่ออัตราการป้อนแก๊ส = 5 sccm

$$Q = \frac{(5/1000 \text{ l/min})(1013 \text{ mbar})}{(60 \text{ s/min})} = 0.0844 \text{ mbar.l/s} \tag{4.5}$$

ถ้าเช่นนั้นเมื่อมีอัตราการป้อนแก๊ส 5 sccm และใช้ปั๊มไอฟุ้งกระจายซึ่งมีความเร็วปั๊มยังคง ซึ่งคำนวณได้ในสมการที่ (4.2) ($S_e = 475.64 \text{ l/s}$) จะได้ว่า

$$\text{ความดันในระบบสุญญากาศ} = \frac{Q}{S_e} = \frac{0.0844 \text{ mbar.l/s}}{475.64 \text{ l/s}} = 1.77 \times 10^{-4} \text{ mbar} \tag{4.6}$$

เมื่อ อัตราการป้อนแก๊ส = 10 sccm ความดันในระบบสุญญากาศ = $3.55 \times 10^{-4} \text{ mbar}$

เมื่อ อัตราการป้อนแก๊ส = 15 sccm ความดันในระบบสุญญากาศ = $5.33 \times 10^{-4} \text{ mbar}$

เมื่อ อัตราการป้อนแก๊ส = 20 sccm ความดันในระบบสุญญากาศ = $7.10 \times 10^{-4} \text{ mbar}$

จากการคำนวณพบว่า ระบบสุญญากาศในการทดลองนี้สามารถรองรับการป้อนแก๊สได้ใน อัตราถึง 15 sccm

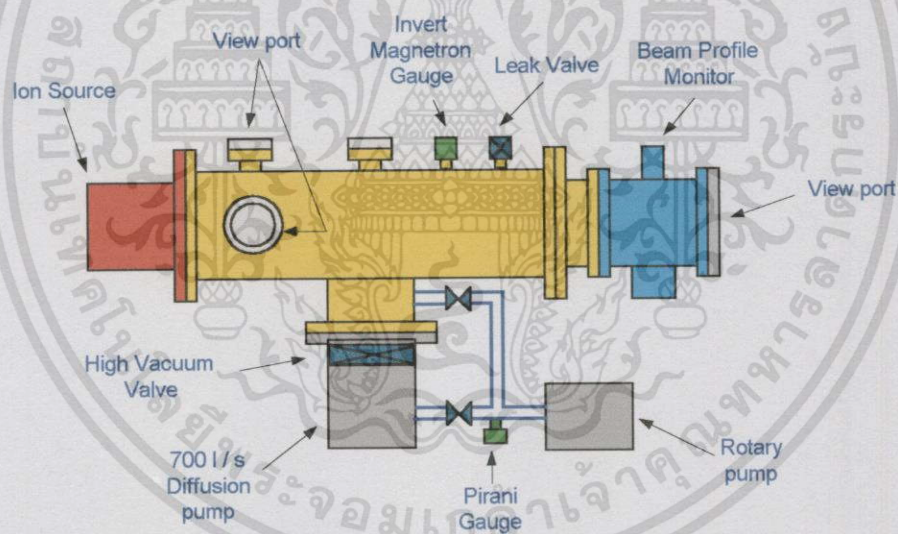
4.1.2 แคมเบอร์สุญญากาศ

แคมเบอร์สุญญากาศ เป็นบริเวณที่ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง จะต้องออกแบบให้มีปริมาตรเหมาะสมกับระบบปั๊มสุญญากาศและมีรูปร่างเหมาะสมสำหรับที่จะติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดที่มีรวมถึงอุปกรณ์ที่อาจมีในอนาคตด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิจัยนี้ แคมเบอร์สุญญากาศทำด้วยสเตนเลสมีลักษณะเป็นทรงกระบอกในแนวนอน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.19 cm ยาว 45 cm ที่ปลายทั้งสองเป็นหน้าแปลนขนาด ASA200 โดยในแนวยาวสามารถต่อเพิ่มได้ถ้าจำเป็น ปลายด้านหนึ่งถูกปิดด้วยหน้าแปลนที่มีพอร์ตสำหรับติดตั้งขั้วไฟฟ้าขนาด NW40 จำนวน 4 ช่อง และขนาด DN40CF สำหรับติดตั้งแหล่งกำเนิดไอออนจำนวน 1 ช่อง ปลายอีกด้านหนึ่งปิดด้วยหน้าแปลนลดขนาด โดยลดจาก ASA200 ไปเป็น DN100CF สำหรับติดตั้งเครื่องวัดขนาดลำไอออน จำนวน 1 ช่อง ด้านบนของแคมเบอร์มีพอร์ตขนาด NW25 และ NW10 สำหรับติดตั้งหัววัดความดันและวาล์วปล่อยอากาศ (leak valve) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีช่องมอง (sight glass) ขนาด NW50 และ ASA100 ที่ด้านบนและด้านข้างของแคมเบอร์ ตามลำดับ ระบบสุญญากาศนี้ใช้หัววัดความดันของบริษัท Edwards 2 ชนิด ได้แก่ หัววัดชนิดพิรานี (Pirani Gauge) 1 ตัว ใช้วัดความดันในช่วงไม่ต่ำกว่า 10^{-3} mbar และใช้หัววัดชนิดเพนนิง (Invert Magnetron Gauge) 1 ตัว สำหรับวัดความดันในช่วง 10^{-3} - 10^{-7} mbar

โครงสร้างของระบบสุญญากาศสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 แหล่งกำเนิดไอออนจะติดตั้งทางด้านซ้ายของแคมเบอร์ ส่วนระบบสุญญากาศที่ประกอบเรียบร้อยแล้วแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบสุญญากาศ

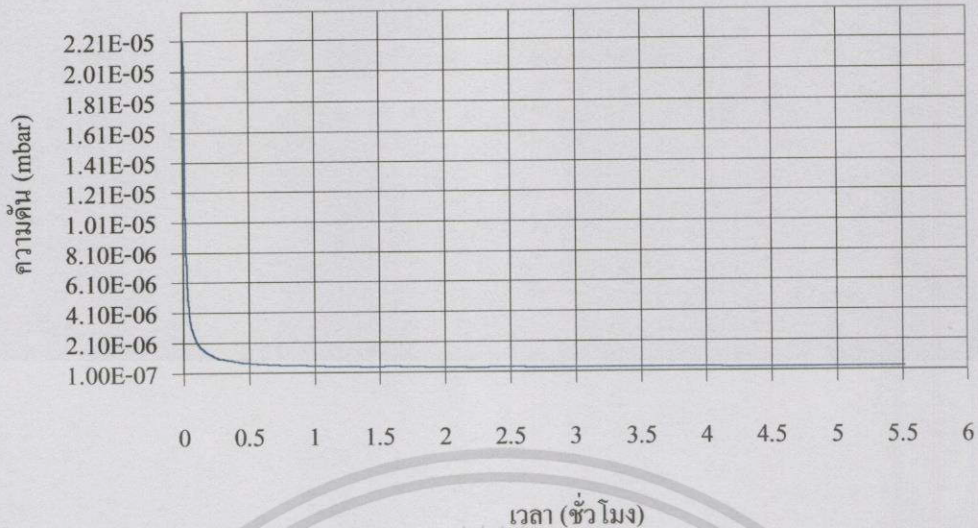


รูปที่ 4.2 ระบบสุญญากาศ

4.1.3 การทดสอบระบบสุญญากาศ

หลังจากการแก้ไขปัญหาการรั่วของระบบสุญญากาศเรียบร้อยแล้วพบว่าระบบสามารถทำความดันได้ถึง 10^{-7} mbar ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบปั๊มชนิดนี้ จึงสรุปได้ว่าระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ได้

การวัดความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลาที่ใช้ในการปั๊มจะทำในขณะที่ยังไม่ได้ติดตั้งระบบการดึงไอออน โดยการเปิดปั๊มทิ้งไว้วันละ 6-7 ชั่วโมง เป็นเวลา 4 วันติดต่อกัน สังเกตได้ว่าระบบสุญญากาศจะถึงความดันต่ำสุดด้วยเวลาที่น้อยลงเรื่อย ๆ หลังจากนั้นจึงทำการบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดัน ผลการทดลองปรากฏว่า ความดันจะลดลงจนต่ำกว่า 10^{-7} mbar ภายในเวลา 20 นาที หลังจากเปิดควาล์ว จากนั้นความดันจะลดลงอย่างช้า ๆ จนมีความดันต่ำกว่า 3.5×10^{-7} mbar ภายในเวลา 3 ชั่วโมง และระบบสุญญากาศนี้สามารถทำความดันได้ถึง 2.9×10^{-7} mbar (2.2×10^{-7} Torr) ในเวลาประมาณ 5.5 ชั่วโมง โดยความดันในระบบมีค่าลดลงตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความดันในระบบสุญญากาศ

เมื่อติดตั้งระบบการดึงไอออนเข้ากับแชมเบอร์ของพลาสมา จะทำให้ตอนนี้แชมเบอร์ของพลาสมา กับแชมเบอร์สุญญากาศ ถูกเชื่อมก่อนกันด้วยรูขนาดเพียง 2 มิลลิเมตร เท่านั้น เมื่อเดินปั๊ม จึงทำให้เกิดความแตกต่างกันของความดันระหว่างแชมเบอร์ทั้งสองอย่างมาก กล่าวคือความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศ มีค่าประมาณ 10^{-7} mbar (อ่านค่าความดันด้วยหัววัดชนิดเพนนิ่งของบริษัท Edwards) ในขณะที่ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา จะมีค่าประมาณ 10^{-4} mbar (อ่านค่าความดันด้วยหัววัดชนิดไพรานิกของบริษัท Edwards เช่นกัน) ซึ่งค่าความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา ระดับนี้ถือว่ามีความสูงเกินไปที่จะใช้งานได้ เพื่อให้ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา มีค่าต่ำลงทำได้โดยการทำบายพาส (bypass) ระหว่างพอร์ตขนาด DN16CF ของแชมเบอร์ของพลาสมา กับปั๊มไอฟุ้งกระจาย หลังจากการทำบายพาสทำให้ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา ได้ถึงระดับ 10^{-5} mbar ในขณะที่ความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศมีค่าอยู่ที่ระดับ 10^{-7} mbar

4.2 สนามแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดพลาสมา

เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กมีอยู่หลายแบบด้วยกัน การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับความเหมาะสม สำหรับในงานวิจัยนี้สนามแม่เหล็กสร้างจากขดลวดโซลินอยด์ [17] โซลินอยด์ทำหน้าที่สร้างฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลในขดลวด โซลินอยด์มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบธรรมดา (normal solenoids) และ แบบตัวนำยิ่งยวด (superconducting solenoids) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบธรรมดา โซลินอยด์แบบธรรมดาสร้างได้โดยการพันลวดทองแดงรอบแกนทรงกระบอกแล้วทำการป้อนกระแสให้กับขดลวด จากขนาดของแกนทรงกระบอกดังแสดงรูปที่ 4.4 สนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ P ตามแนวแกนมีค่าเป็น

$$H = \frac{4\pi ni}{10L} \left[\frac{L+2x}{2\sqrt{D^2+(L+2x)^2}} + \frac{L-2x}{2\sqrt{D^2+(L-2x)^2}} \right] \quad (4.7)$$

- เมื่อ n = จำนวนรอบของลวดที่พันรอบแกน
 i = กระแสที่ป้อนให้กับขดลวด
 H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Oesteds)
 L = ความยาวของแกนขดลวด
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแกนขดลวด

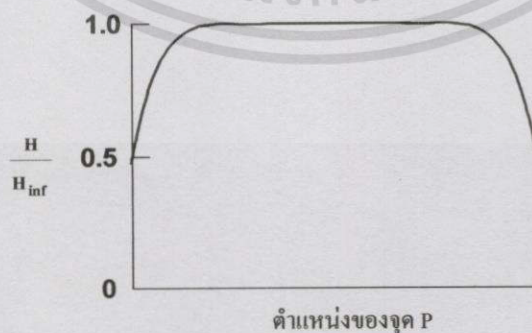
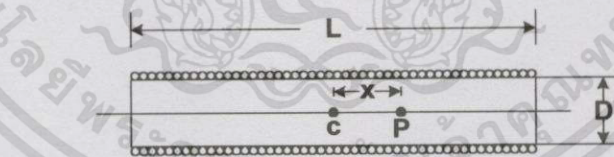
ที่จุดกึ่งกลางตามแนวแกน ($x=0$) จะได้ว่า

$$H = \frac{4\pi ni}{10L} \left[\frac{L}{\sqrt{D^2+L^2}} \right] \quad (4.8)$$

และ ถ้า $L \gg D$ จะได้ว่า

$$H = \frac{4\pi ni}{10L} = \frac{1.257 ni}{L} \quad (4.9)$$

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H_{inf}) ตามแนวแกนของขดลวดโซลินอยด์ ที่มีความยาวมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางมาก ๆ ($L \gg D$) จะมีค่าแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตามแนวแกนของขดลวดโซลินอยด์ซึ่งพันด้วยขดลวดเพียงชั้นเดียว

ในกรณีที่ต้องการสนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มมาก จากสมการเห็นได้ว่าทำได้โดยเพิ่มจำนวนรอบในการพันลวดหรือเพิ่มค่ากระแส แต่โดยทั่วไปถ้าต้องการเพิ่มความเข้มสนามจะทำโดยการเพิ่มจำนวนรอบในการพันลวด (โดยพันลวดมากกว่า 1 ชั้น) แทนการเพิ่มปริมาณกระแส เพราะว่าอัตราการสูญเสียพลังงานซึ่งสูญเสียออกมาในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นกับขดลวดมีค่าเป็น i^2R เมื่อ R คือ ความต้านทานของขดลวด อย่างเช่น ในกรณีที่เราต้องการความเข้มสนามเพิ่มเป็น 2 เท่า สามารถทำได้โดยการพันลวดเพิ่มเป็น 2 ชั้น ซึ่งทำให้มีการสูญเสียพลังงานเพิ่มเป็น 2 เท่า แต่เมื่อเพิ่มกระแสเป็น 2 เท่า จะทำให้สูญเสียพลังงานเพิ่มเป็น 4 เท่า การสูญเสียพลังงานเป็นปริมาณมาก จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นกับระบบ ซึ่งอาจจะส่งผลเสียหายต่อขดลวด โดยทั่วไปโซลินอยด์ที่สร้างสนามแม่เหล็กได้มากกว่า 1000 Oe จึงมีการระบายความร้อนด้วยระบบหล่อเย็น

โดยทั่วไปความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใช้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาจะมีค่าไม่เกิน 1000 Oe [7] ดังนั้นโซลินอยด์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงไม่จำเป็นต้องสร้างสนามแม่เหล็กได้เกินกว่า 1000 Oe ซึ่งจำนวนรอบในการพันลวดทองแดงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.9) ข้อจำกัดของโซลินอยด์นอกจากจะขึ้นอยู่กับความร้อนที่เกิดขึ้นกับขดลวด โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องพันลวดเป็นจำนวนหลาย ๆ ชั้นแล้ว ยังขึ้นกับเครื่องจ่ายกระแสซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญมากอีกชั้นหนึ่ง สำหรับการสร้างสนามแม่เหล็กด้วยขดลวดโซลินอยด์ เพราะค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้ขึ้นขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสด้วยดังสมการที่ (4.7) – (4.9) และเนื่องจากความสามารถในการจ่ายกระแสของแหล่งจ่ายกระแสขึ้นอยู่กับความต้านทานของขดลวดด้วย เนื่องจากแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้ในการทดลองมีกำลัง 450 วัตต์ จ่ายกระแสได้สูงสุด 30 A และปรับโวลเตจได้สูงสุด 30 V ดังนั้นถ้าต้องการให้มีกระแสสูงสุด ความต้านทานของขดลวดโซลินอยด์จะต้องมีค่าไม่เกิน 2 โอห์ม โดยความต้านทานของขดลวดคำนวณได้จาก

$$R_c = \rho \frac{L}{A} \quad (4.10)$$

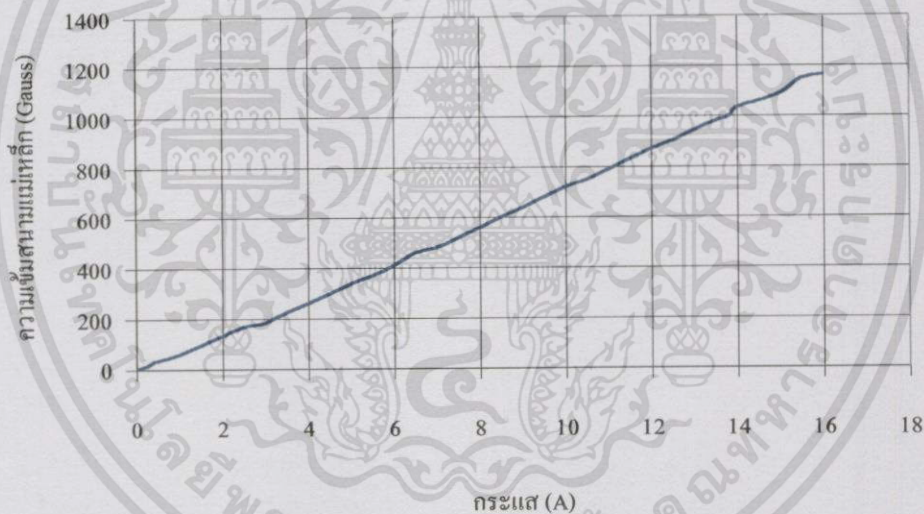
- R_c = ความต้านทานของขดลวด
- ρ = สภาพความต้านทานของขดลวด
- L = ความยาวทั้งหมดของขดลวด
- A = พื้นที่หน้าตัดของลวด

ในงานวิจัยฉบับนี้สนามแม่เหล็กเกิดจากการพันลวดทองแดงอาบนํ้ายาเบอร์ 13 รอบแกนท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75.2 mm ในช่วงความยาว 75.2 mm ลวดทองแดงมีค่าสภาพความต้านทาน $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ที่อุณหภูมิ 20 °C [18] เส้นลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 mm

ซึ่งมีความต้านทาน $6.76 \Omega/\text{km}$ [19] จำนวนรอบ 780 รอบ โดยในแต่ละชั้นพันลวดจำนวน 39 รอบ ทั้งหมด 20 ชั้น เมื่อพันลวดเสร็จขดลวดมีความต้านทานทั้งสิ้น 1.82Ω

4.2.1 การทดสอบสนามแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดพลาสมา

การทดสอบสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่พันรอบแหล่งกำเนิดพลาสมาทำโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟชนิดกระแสคงที่ (constant current source) แล้วทำการวัดสนามแม่เหล็กที่จุดกึ่งกลางของแชมเบอร์ของพลาสมาด้วยมิเตอร์วัดความเข้มสนามแม่เหล็ก (gauss meter) ของ Yokogawa Type 3251 Model 325100 ใช้หัววัดรุ่น 3252 01 (gauss probe Model 3252 01) โดยในขณะที่ทำการทดลองได้เปิดน้ำหล่อเย็นให้กับแชมเบอร์ของพลาสมาด้วย แต่ใช้น้ำจากท่อประปา อุณหภูมิประมาณ 28°C สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงสุด 1165 G เมื่อป้อนกระแส 16 A ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับกระแสแสดงในรูปที่ 4.5



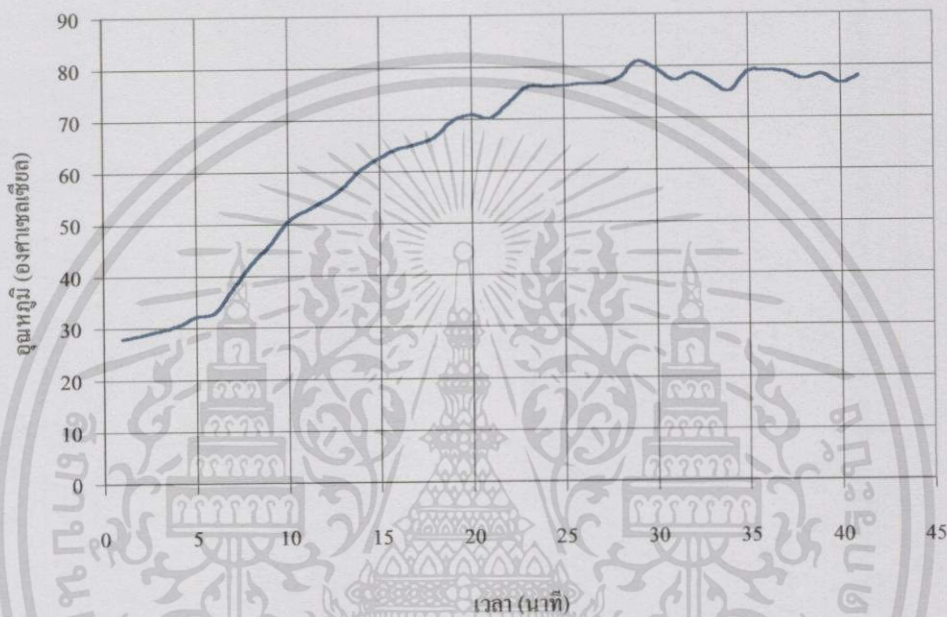
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กในแชมเบอร์ของพลาสมา กับกระแสของขดลวด

ข้อจำกัดในการสร้างสนามแม่เหล็กคือความร้อนในขดลวดแม่เหล็ก เนื่องจากระหว่างชั้นของขดลวดไม่มีการระบายความร้อน จึงเกิดความร้อนสะสมในขดลวดมาก ดังนั้นถ้าป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดมากเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ขดลวดได้

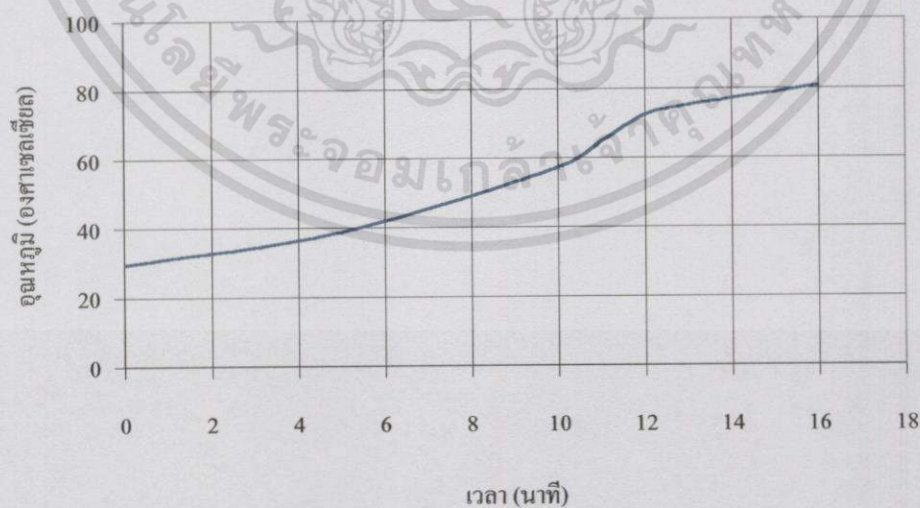
ความร้อนของขดลวดได้ถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลโดยวัดที่กึ่งกลางของชั้นบนสุดของขดลวด แล้วป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่ขดลวด 9 A ซึ่งจะได้สนามแม่เหล็ก 640 Gauss พบว่าอุณหภูมิของขดลวดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิประมาณ 80°C ในเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แต่เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่ขดลวด 14.5 A จะได้สนามแม่เหล็ก 1060 G

พบว่าอุณหภูมิของขดลวดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าประมาณ 80° C ในเวลาประมาณ 15 นาที และยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ดังแสดงในรูปที่ 4.7

จากการทดสอบสรุปได้ว่า ถ้าอุณหภูมิที่ผิวของขดลวดที่ทำการวัดได้ค่า 80° C นั้น ภายในของขดลวดที่จุดกึ่งกลางจะต้องมีอุณหภูมิสูงกว่านี้มาก แต่อย่างไรก็ตามยังคงไม่เกิดความเสียหายแก่ขดลวด ดังนั้นถ้าต้องการใช้สนามแม่เหล็กต่ำกว่า 600 G จะสามารถใช้งานได้โดยไม่จำกัดเวลา แต่ถ้าต้องการใช้สนามไฟฟ้าถึง 1000 G จะใช้งานได้ไม่เกิน 15 นาที



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิของขดลวดเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อป้อนกระแส 9 A



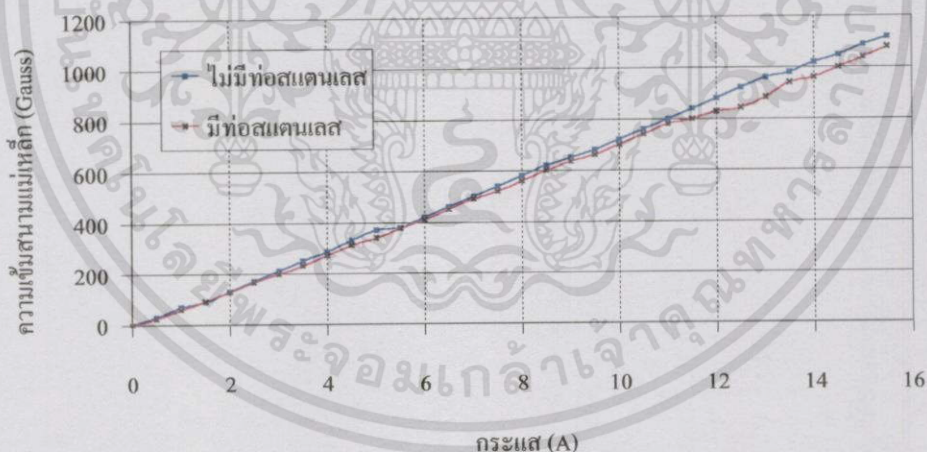
รูปที่ 4.7 อุณหภูมิของขดลวดเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อป้อนกระแส 14.5 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

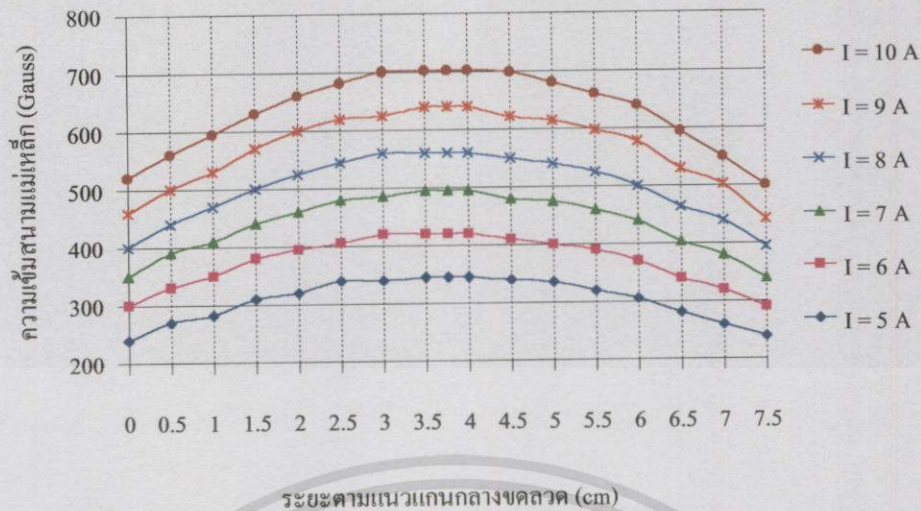
4.2.2 การทดสอบการลดทอนสนามแม่เหล็ก

การวัดสนามแม่เหล็กภายใน แชมเบอร์ของพลาสมา ดังกล่าวข้างต้น กระทำในขณะที่ยังไม่ได้ติดตั้งขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกสเตนเลสของแหล่งกำเนิดพลาสมา เนื่องจากพลาสมาจะเกิดภายในขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกสเตนเลส (เพอร์มิบิลิตีของสเตนเลสมีค่า 1.003-1.005 เมื่อวัดในสนามแม่เหล็กความเข้ม 200 Oe [20]) ที่ทำหน้าที่เป็นแอโนด ดังนั้นจึงต้องวัดสนามแม่เหล็กภายในขั้วไฟฟ้านี้ว่าถูกลดทอนลงหรือไม่ อย่างไร

การศึกษาทำโดยนำท่อสเตนเลสอีกท่อหนึ่งสวมเข้าไปภายในแชมเบอร์ของพลาสมา แล้วทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กภายในท่อสเตนเลส ผลการทดลองแสดงดังกราฟในรูปที่ 4.8 จากกราฟจะเห็นได้ว่า ท่อสเตนเลสไม่มีผลต่อการลดทอนค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นในการสร้างสนามแม่เหล็กให้แก่แหล่งกำเนิดไอออนจึงยังคงใช้ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับกระแสที่วัดไว้แล้วดังรูปที่ 4.5 ในตอนต้นได้ โดยเราสามารถทราบค่าสนามแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดไอออนได้จากกระแสที่ป้อนให้แก่ขดลวดนั่นเอง นอกจากนี้ยังได้วัดสนามแม่เหล็กตามแนวแกนของขดลวด พบว่าสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางและจะลดลงที่บริเวณปลายทั้งสองด้านดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 ความเข้มสนามแม่เหล็กในแชมเบอร์ของพลาสมาเมื่อป้อนกระแสให้กับขดลวดค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.9 ความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกนของขดลวดภายในแชมเบอร์ของพลาสมาเมื่อป้อนกระแสค่าต่าง ๆ ให้กับขดลวด

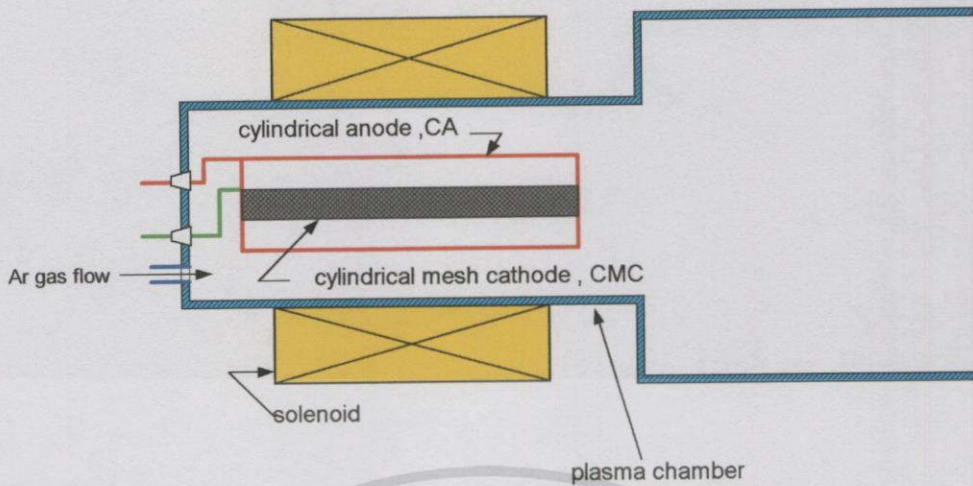
4.3 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดไอออน

แหล่งกำเนิดไอออนสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮอโลแคโทดแมกนีตรอนและระบบคิงไอออน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 แหล่งกำเนิดพลาสมา

แหล่งกำเนิดพลาสมาที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮอโลแคโทดแมกนีตรอนเนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายสามารถสร้างได้รวดเร็วและชิ้นส่วนต่าง ๆ สามารถหาได้ภายในประเทศ

แหล่งกำเนิดพลาสมาฮอโลแคโทดแมกนีตรอนมีโครงสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก 2 ชิ้นสวมกัน (coaxial cylindrical diode) แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮิลอนโลแคโทดแมกนีตรอน

เมื่อมีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นเล็กน้อยในแหล่งกำเนิดพลาสมา ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สหรือเกิดจากปรากฏการณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวของขั้วไฟฟ้าเนื่องจากรังสีคอสมิก อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายใต้แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศตั้งฉากกัน เป็นผลทำให้เกิดการกระตุ้นและการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊ส ซึ่งเป็นกระบวนการเกิดแก๊สไอออไนซ์ของระบบ

แหล่งกำเนิดพลาสมาประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ขั้วแอโนดทรงกระบอก ขั้วแคโทดทรงกระบอกซึ่งทำเป็นตะแกรง ขดลวดสนามแม่เหล็ก แหล่งจ่ายไฟตรงความต่างศักย์สูงและระบบจ่ายแก๊ส

1) ขั้วแอโนด

ขั้วแอโนดของแหล่งกำเนิดพลาสมามีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง (cylindrical anode, CA) ทำจากสแตนเลสแสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 23 mm ความยาวของกระบอกที่ใช้ทำงานมีทั้งขนาด 128 mm และ 65 mm



รูปที่ 4.11 ลักษณะของขั้วแอโนดและชุดจับยึด

2) ขั้วแคโทด

ขั้วแคโทดทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทั้งปฐุมภูมิและทุติยภูมิ ดังนั้นในการเลือกชนิดหรือรูปแบบและวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดจึงเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับในงานวิจัยนี้ขั้วแคโทดมีลักษณะเป็นตะแกรงลวดทรงกระบอกกลวง (cylindrical mesh cathode, CMC) หรือที่เรียกว่า hollow cathode ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเช่นเดียวกับขั้วแอโนดแต่มีขนาดเล็กกว่า สวมอยู่ภายในขั้วแอโนดโดยทำจากลวดแคนทัล (kanthal) ซึ่งเป็นลวดที่ใช้ทำลวดความร้อน (heater) โดยขั้วไฟฟ้าทั้งสองถูกยึดติดกันและวางอยู่กึ่งกลางภายใน แชนเบอร์ของพลาสมา ซึ่งเป็นระบบสุญญากาศด้วยชุดจับยึดเซรามิก แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ขั้วแคโทดพร้อมชุดจับยึดและการติดตั้งกับขั้วแอโนดความยาว 128 mm
 (ก) ขั้วแคโทดพร้อมชุดจับยึด แบบที่ใช้กับขั้วแอโนดความยาว 128 mm
 (ข) ขั้วไฟฟ้าที่ติดตั้งในแชนเบอร์ของพลาสมา

สาเหตุที่เลือกใช้ขั้วแคโทดที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก เนื่องจากขั้วแคโทดในลักษณะนี้มีพื้นที่ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้มากกว่าขั้วแคโทดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ (planar) ซึ่งส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลทำให้เกิดพลาสมาที่มีความหนาแน่นได้มากกว่าช่วงแคโทดในลักษณะอื่น ๆ และการที่ออกแบบให้เป็นตะแกรงจะช่วยให้ไอออนถูกกักกันไว้ภายในทรงกระบอกของแคโทดได้

เนื่องจากการเกิดพลาสมาทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริง (sputtering) ซึ่งทำให้เกิดการสึกกร่อนที่ขั้วแคโทด ดังนั้นการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ทำขั้วนั้นก็ต้องเป็นวัสดุที่มีค่าyieldของการสปัตเตอริง (sputter yield) ต่ำ จากตารางแสดงค่าyieldของการสปัตเตอริงดังแสดงในตารางที่ ก2 [21] พบว่าโลหะที่เหมาะสม ได้แก่ ทังสแตน เนื่องจากมีค่าyieldของการสปัตเตอริงเพียง 0.62 แต่เนื่องจากทังสแตนบริสุทธิ์ที่หาได้ในประเทศไทยจะทำมาสำหรับใช้เป็นลวดเชื่อม ซึ่งมีขนาดใหญ่และแข็งมากไม่สามารถใช้ทำเป็นตะแกรงทรงกระบอกได้ จึงหันมาใช้ลวดแคนดัลซึ่งเป็นลวดที่ใช้ทำลวดทำความร้อนแทน เนื่องจากลวดชนิดนี้มีองค์ประกอบของทังสแตนเป็นหลักและมีส่วนผสมของนิโครม (Nichrome) อยู่เล็กน้อย (นิโครมเป็นโลหะผสม : Ni 60% , Cr 15% และ Fe 25% [18] ถึงแม้ Ni , Cr และ Fe จะมีค่าyieldของการสปัตเตอริงสูงก็ตามแต่เป็นเพียงองค์ประกอบส่วนน้อย)

3) ขดลวดแม่เหล็ก

ช่วงกึ่งกลางของแชนเบอร์ของพลาสมาจะถูกพันไว้ด้วยลวดทองแดงอาน้ำยาเบอร์ 13 เพื่อทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อเพิ่มอัตราการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊ส เส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.80 มิลลิเมตร ความต้านทาน 6.76 โอห์มต่อกิโลเมตร พันด้วยจำนวนรอบ 780 รอบ ในช่วงความยาว 75 มิลลิเมตร เมื่อพันเสร็จขดลวดมีความต้านทานทั้งสิ้น 1.82 โอห์ม โดยสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วแคโทดและเคลื่อนที่แบบควงสว่างเข้าสู่แอโนดหรืออาจกล่าวได้ในอีกลักษณะหนึ่งว่าเป็นการเพิ่มเส้นทางการเดินทาง (path length) ของอิเล็กตรอนเพื่อเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดการแตกตัวของแก๊ส

ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่ำสุดที่ต้องป้อนให้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาที่สามารถทำให้เกิดพลาสมาได้จะมีค่าเป็น ไปความสัมพันธ์ของฮุลล์ (Hull relation) ดังกล่าวข้างต้น

4) แหล่งกำเนิดไฟตรงความต่างศักย์สูง

สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาสร้างจากแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าได้ในช่วง 0-500 โวลต์ แหล่งจ่ายไฟนี้จะต้องมีตัวต้านทานจำกัดกระแส เพื่อป้องกันการจ่ายกระแสสูงเกินกว่าจะแหล่งจ่ายไฟจะทนได้ในขณะแก๊สเกิดดิสชาร์จ ตัวต้านทานจำกัดกระแสนี้มีขนาด 200 โอห์ม 90 วัตต์ ต่ออนุกรมเข้ากับวงจร

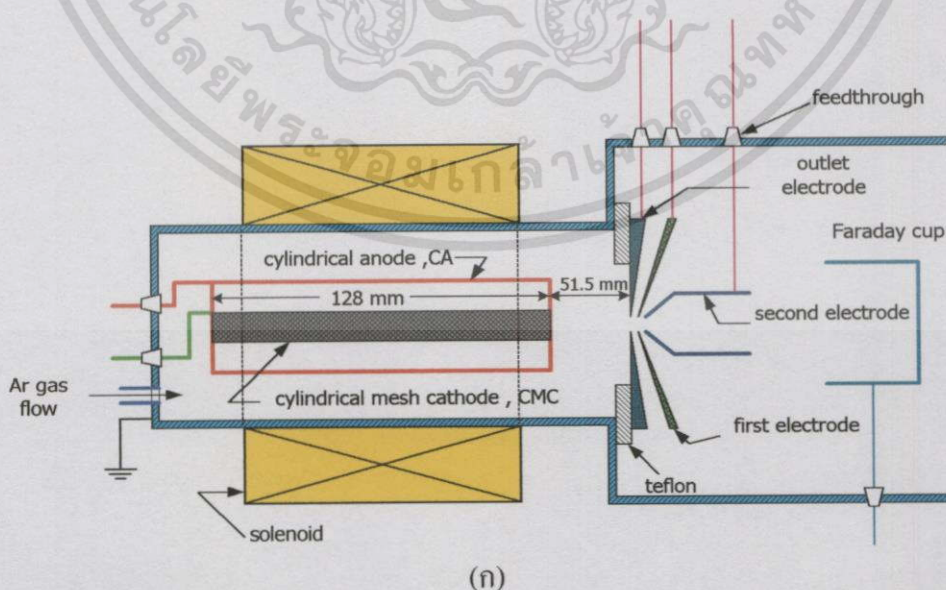
5) ระบบจ่ายแก๊ส

แก๊สที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแก๊สอาร์กอน ระบบจ่ายแก๊สจะทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สที่เข้าไปสู่แชมเบอร์ของพลาสมา ระบบจ่ายแก๊สประกอบด้วยวาล์วปรับหยาบและวาล์วปรับละเอียด (needle valve) อัตราการไหลของแก๊สจะถูวัดและควบคุมด้วยตัวควบคุมอัตราการไหลของมวล (mass flow controller) แต่เนื่องจากชุดควบคุมดังกล่าวได้รับความเสียหายจากการทดลอง การทดลองในช่วงหลังจึงใช้เพียงวาล์วปรับหยาบและวาล์วปรับละเอียดซึ่งเป็นการควบคุมระดับความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมาเท่านั้น

4.3.2 ระบบดิ่งไอออน

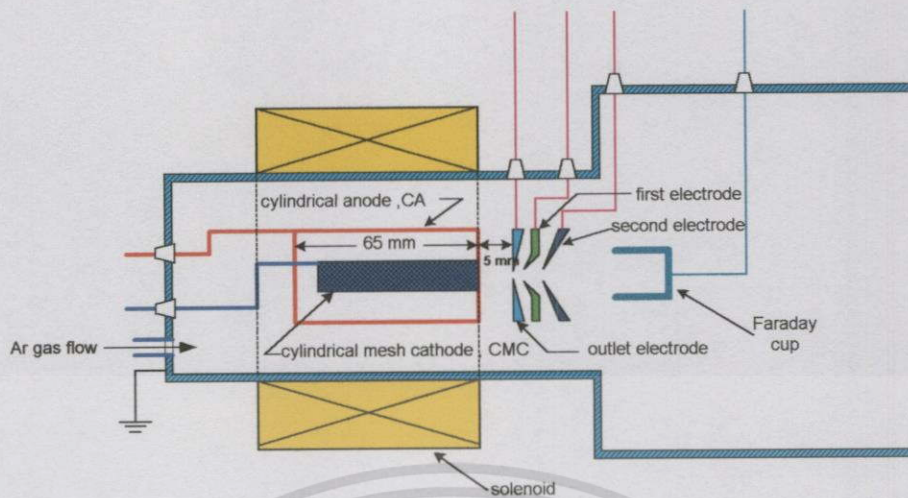
ระบบดิ่งไอออนสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าทางออกหรือขั้วไฟฟ้าพลาสมา (outlet electrode or plasma electrode) ขั้วไฟฟ้าที่หนึ่ง (first electrode) และขั้วไฟฟ้าที่สอง (second electrode) ขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้วทำมาจากสแตนเลสเจาะรูไว้ที่กึ่งกลางของแผ่นโลหะสแตนเลส สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแหล่งกำเนิดพลาสมาและระบบการดิ่งไอออนอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 4.13

โดยทั่วไปลักษณะการวางและรูปร่างของขั้วไฟฟ้านำมาทำเป็นชุดดิ่งไอออนจะมีผลต่อกระแสและรูปร่างของลำไอออนที่ดิ่งออกมาได้ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้มีการศึกษาถึงตำแหน่งการวางของขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อกระแสไอออนด้วย ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป



รูปที่ 4.13 แหล่งกำเนิดไอออนซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาและระบบการดิ่งไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

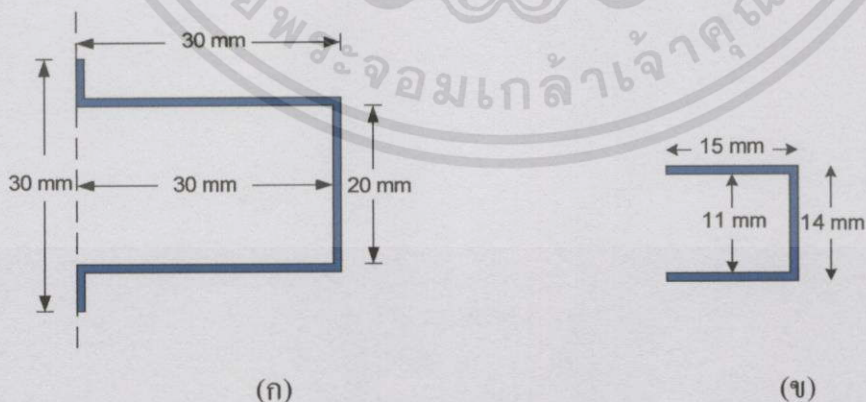
รูปที่ 4.13 แหล่งกำเนิดไอออนซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาและระบบการดึงไอออน

(ก) แหล่งกำเนิดไอออนแบบที่แหล่งกำเนิดพลาสมาใช้ขั้วแอโนดที่มีความยาว 128 mm และระบบการดึงไอออนอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดพลาสมาเป็นระยะ 51.5 mm

(ข) แหล่งกำเนิดไอออนแบบที่แหล่งกำเนิดพลาสมาใช้ขั้วแอโนดที่มีความยาว 65 mm และระบบการดึงไอออนอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาเป็นระยะ 5 mm

4.4 ถ้วยฟาราเดย์ (Faraday Cup)

ถ้วยฟาราเดย์เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้วัดกระแสไอออน โดยออกแบบให้สามารถติดตั้งได้ง่าย ถ้วยฟาราเดย์มีลักษณะเป็นรูปถ้วย ทำด้วยโลหะสแตนเลส เมื่อมีไอออนวิ่งเข้าชนถ้วยจะทำให้เกิดกระแสที่สามารถวัดได้ด้วยแอมป์มิเตอร์



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.14 ลักษณะของถ้วยฟาราเดย์

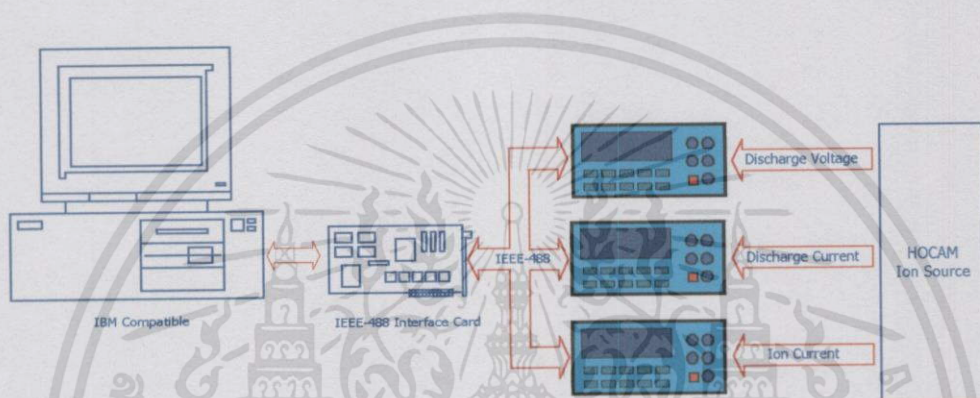
(ก) ถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้กับระบบในรูปที่ 4.13(ก)

(ข) ถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้กับระบบในรูปที่ 4.13(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การจักระบบการวัดด้วยคอมพิวเตอร์

การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะของแหล่งกำเนิดไอออน ทำโดยการเก็บข้อมูลของกระแสดิสชาร์จ โวลเตจดิสชาร์จ และกระแสลำไอออนด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น HP34401A ข้อมูลถูกส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์ ผ่านระบบสายข้อมูล IEEE488 Bus โปรแกรมควบคุมการวัดเขียนขึ้นด้วย Graphical Programming Language HP VEE 5.0 ของบริษัท Hewlett Packard ระบบการวัดด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับการวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด

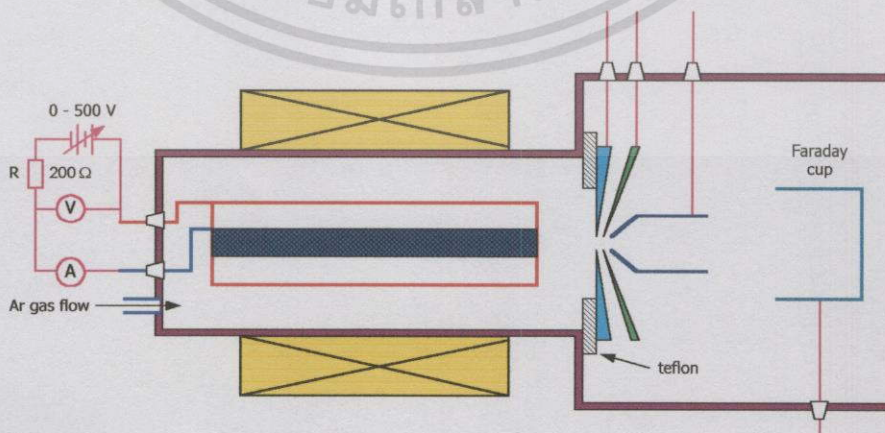
บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

แหล่งกำเนิดไอออนโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ แหล่งกำเนิดพลาสมา (plasma source) และ ระบบทำหน้าที่ในการดึงและควบคุมการเคลื่อนที่ของไอออน (ion optics) สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ในการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดไอออนจะแยกออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ด้วยกัน คือ การศึกษาในส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา ซึ่งทำหน้าที่สร้างไอออนและอีกส่วนหนึ่งคือระบบการดึงไอออน เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เลือกเฉพาะไอออนออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา ซึ่งทำให้เกิดเป็นลำไอออนเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

5.1 การทดลองการเกิดดิซชาร์จของพลาสมา (plasma discharge)

การทดลองเพื่อศึกษาการเกิดดิซชาร์จของแหล่งกำเนิดพลาสมาภายในแชมเบอร์ของพลาสมา ในตอนแรกนี้กระทำโดยจัดเครื่องมือวัดดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นระบบดังแสดงในรูปที่ 4.13(ก) จากนั้นป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าในแชมเบอร์ของพลาสมา ในอัตราการไหลที่ต้องการซึ่งถูกควบคุมโดยชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส ซึ่งประกอบด้วยวาล์วปรับหยาบและวาล์วปรับละเอียด และตัวควบคุมอัตราการไหลของมวล (mass flow controller) รอสักครู่เพื่อให้ความดันภายในแชมเบอร์ทั้งสองคงที่ จากนั้นป้อนไฟตรงจากแหล่งจ่ายไฟที่ปรับค่าได้ระหว่าง 0 - 500 โวลต์ ให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองของ HOCAM (CA และ CMC) แล้วจึงทำการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสคงที่ (constant current source) ให้กับขดลวดแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยในขณะที่ทำการทดลองได้เปิดน้ำหล่อเย็นให้กับแชมเบอร์ของพลาสมาด้วย (ใช้น้ำประปาที่อุณหภูมิ น้ำเข้า 29 °C)



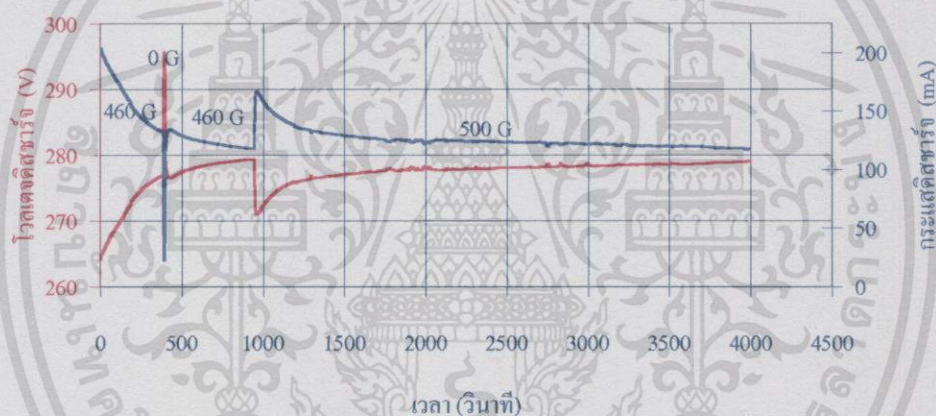
รูปที่ 5.1 ระบบการศึกษาการเกิดดิซชาร์จของพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 การศึกษาเสถียรภาพของการดิสชาร์จ

การทดสอบในขั้นตอนนี้ เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาเสถียรภาพของการดิสชาร์จโดยการวัดกระแสดิสชาร์จที่เปลี่ยนไปตามเวลา เริ่มต้นด้วยการป้อนแก๊สด้วยอัตรา 4.7 sccm ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 300 โวลต์ ป้อนสนามแม่เหล็กขนาด 460 และ 560 G ซึ่งทำได้โดยการป้อนกระแสให้แก่ขดลวดแม่เหล็กขนาด 6.5 และ 8 A ตามลำดับ ผลของกระแสดิสชาร์จ (discharge current) และ โวลเตจดิสชาร์จ (discharge voltage) ที่เปลี่ยนไปตามเวลาแสดงดังรูปที่ 5.2

จากรูปจะเห็นว่ากระแสดิสชาร์จและ โวลเตจดิสชาร์จซึ่งเป็นโวลเตจที่ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า CA และ CMC ของ HOCAM มีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ เมื่อกระแสดิสชาร์จมีค่าสูงขึ้น ส่วนค่าโวลเตจดิสชาร์จจะมีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากมีโวลเตจไปตกคร่อมที่ตัวต้านทานจำกัดกระแสมากขึ้นเมื่อมีกระแสดิสชาร์จมากขึ้น



รูปที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงของโวลเตจดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จกับเวลาเมื่อมีอัตราการไหลของแก๊ส 4.7 sccm ที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก 460 และ 560 G

จากกราฟรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีค่า 460 G จะมีกระแสดิสชาร์จประมาณ 200 mA และจะลดลงตามเวลาอย่างรวดเร็ว และเมื่อทดลองหยุดป้อนสนามแม่เหล็ก พบว่ากระแสดิสชาร์จมีค่าลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ นั่นคือแทบไม่มีการดิสชาร์จถ้าไม่มีสนามแม่เหล็ก และเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กดังเดิมก็จะเกิดการดิสชาร์จต่อไป โดยกระแสยังคงลดลงตามเวลา เมื่อทดลองเพิ่มสนามแม่เหล็กเป็น 580 G พบว่า กระแสดิสชาร์จจะเพิ่มขึ้นทันที และมีค่าลดลงตามเวลาต่อไป แต่เมื่อเวลาผ่านไปกระแสดิสชาร์จจะเริ่มคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง

หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบการเกิดดิสชาร์จอีกหลายครั้ง โดยเปลี่ยนอัตราการป้อนแก๊สและความเข้มสนามแม่เหล็ก สรุปได้ว่า ในกรณีที่มีอัตราการป้อนแก๊สต่ำจะทำให้ได้กระแสดิสชาร์จที่มีค่าต่ำด้วย ส่วนความเข้มของสนามแม่เหล็กมีผลต่อการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊ส

เป็นอย่างมาก ในกรณีที่เราไม่ได้ป้อนสนามแม่เหล็กให้กับระบบ ค่าของกระแสดิซาร์จก็จะมีค่าอยู่ในระดับ μA เท่านั้น แต่ถ้าเราป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปจนถึงค่าที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนแล้ว ก็จะมีผลทำให้เกิดกระแสดิซาร์จเกิดขึ้นในระดับถึง 100-200 mA และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะได้กล่าวถึงผลกระทบของอัตราการป้อนแก๊สและสนามแม่เหล็กที่มีต่อการเกิดดิซาร์จต่อไป นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าที่ค่ากระแสดิซาร์จต่างกันความสว่างของพลาสมาก็จะต่างกันด้วย ดังแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ความสว่างของพลาสมาตามระดับของกระแสดิซาร์จ

(ก) กระแสดิซาร์จ 55 mA

(ข) กระแสดิซาร์จ 70 mA

(ค) กระแสดิซาร์จ 140 mA

5.1.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสดิซาร์จ

จากผลการทดสอบการเกิดดิซาร์จพลาสมา (plasma discharge) ดังรูปที่ 5.2 พบว่ากระแสดิซาร์จมีค่าลดลงตามเวลา โดยเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีค่า 460 G จะมีกระแสดิซาร์จประมาณ 200 mA และจะลดลงตามเวลาอย่างรวดเร็วและเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กเป็น 560 G พบว่ากระแสดิซาร์จจะเพิ่มขึ้นทันที และมีค่าลดลงตามเวลาต่อไป แต่เมื่อเวลาผ่านไปกระแสดิซาร์จจะเริ่มคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง ทำให้เข้าใจในเบื้องต้นว่าขั้วไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไอออนขณะนี้เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว และหวังว่าเมื่อเปิดเครื่องครั้งต่อไปจะได้กระแสดิซาร์จที่มีค่าเท่าเดิมเมื่อตั้งการทำงานไว้ที่สภาวะเดียวกัน แต่เมื่อใช้งานจริงผลที่ปรากฏไม่เป็นไปอย่างที่คาด กล่าวคือตอนเริ่มต้นจะมีกระแสดิซาร์จสูงและลดลงตามเวลาเช่นเดิม ผลลักษณะนี้เกิดขึ้นทุกครั้งที่ใช้งาน จึงมีคำถามว่าอะไรเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผลเช่นนี้

ในการหาสาเหตุ ได้ตั้งข้อสมมติฐานไว้ 2 ข้อ

- 1) เกิดจากการเสื่อมสภาพของขั้ว CMC
- 2) เกิดจากอุณหภูมิของแก๊สที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสื่อมสภาพของขั้ว CMC อันเนื่องจากการสึกกร่อนหรือสิ่งแปลกปลอมมาเคลือบที่ผิว อาจเป็นสาเหตุให้กระแสติสซาร์จลดลงได้ ซึ่งการสึกกร่อนของขั้ว CMC จะเกิดเนื่องจากขบวนการสปีดเตอร์ ปฏิกิริยาการกัดกร่อนดังกล่าวจะเห็นได้อย่างชัดเจนและรวดเร็วถ้าขั้ว CMC ที่ใช้เป็นขั้วที่ทำจากสแตนเลส ผลของการสปีดเตอร์ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.4 สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของแก๊สสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ระยะปลอดการชนเฉลี่ยมีค่ายาวขึ้น ดังนั้นโอกาสในการชนกันแล้วทำให้เกิดแตกตัวเป็นไอออนจึงลดลง ซึ่งทำให้กระแสติสซาร์จลดลงได้เช่นกัน

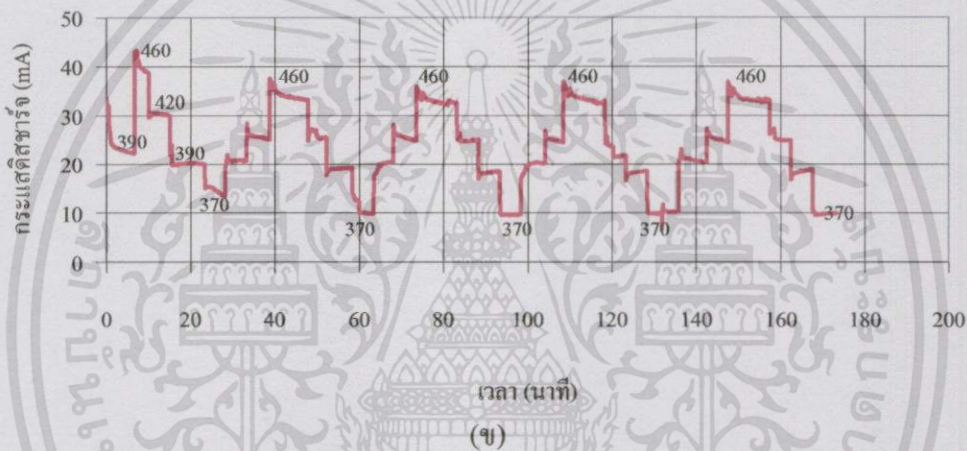
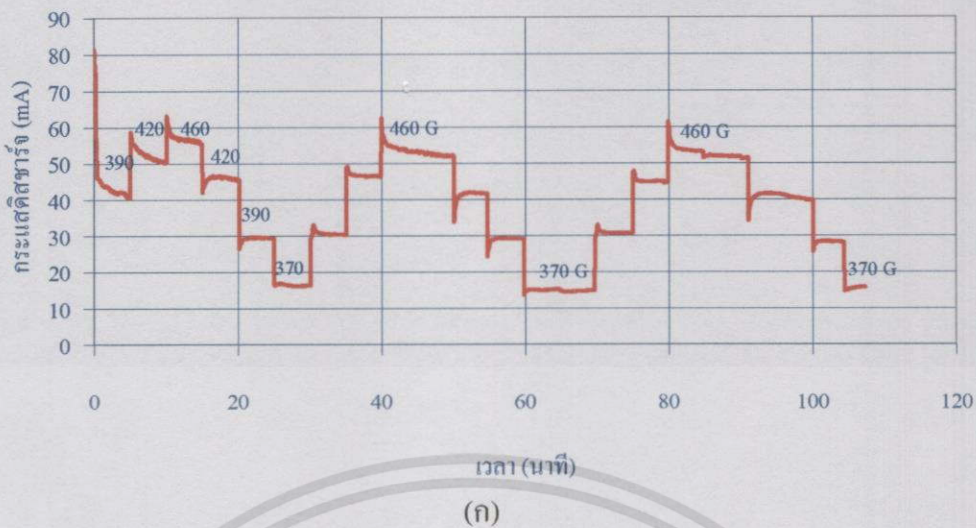


รูปที่ 5.4 การสึกกร่อนของขั้ว CMC ที่ทำมาจากโลหะสแตนเลสและมีโลหะมาเคลือบที่ขั้ว CA

1) การศึกษาการเสื่อมสภาพของขั้ว CMC

ในการทดสอบข้อสมมติฐานที่ว่ากระแสติสซาร์จลดลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพของ CMC นั้นสามารถทำการทดลองโดยการวัดค่ากระแสติสซาร์จเป็นช่วง ๆ ช่วงละ 5 นาทีเป็นอย่างน้อย โดยแต่ละช่วงให้ใช้สนามแม่เหล็กคงที่ เริ่มช่วงแรกให้ใช้สนามแม่เหล็กน้อยสุด และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงต่อ ๆ ไป จนถึงค่าสูงสุดที่ต้องการ จากนั้นให้ลดสนามแม่เหล็กลงเป็นช่วง ๆ จนถึงค่าต่ำสุด ถือเป็น 1 รอบ ทำเช่นนี้ต่อเนื่องอย่างน้อย 3 รอบ ถ้าค่ากระแสติสซาร์จ ในช่วงขาขึ้นและช่วงขาลงใน 1 รอบ มีค่าไม่เท่ากันและเมื่อเทียบกับผลการวัดรอบถัดไปแล้ว ถ้ากระแสติสซาร์จมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ แสดงว่า มีการเสื่อมสภาพของขั้ว CMC จริง

การทดลองทำโดยใช้แหล่งกำเนิดไอออน HOCAM ที่มีขั้ว CMC ที่ทำจากลวดแคนธัล (Kanthal) สานเป็นตะแกรง ในขณะที่ทดลองควบคุมความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมาเป็น 4.0×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจระหว่าง CA กับ CMC 400 V สนามแม่เหล็กที่ใช้ทดลองในแต่ละขั้นคือ 370 G, 390 G, 420 G และ 460 G ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.5(ก) นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดลองโดยใช้ขั้ว CMC ที่ทำจากลวดแคนธัลพันเป็นเกลียว ในสถานะเดียวกัน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.5(ข)

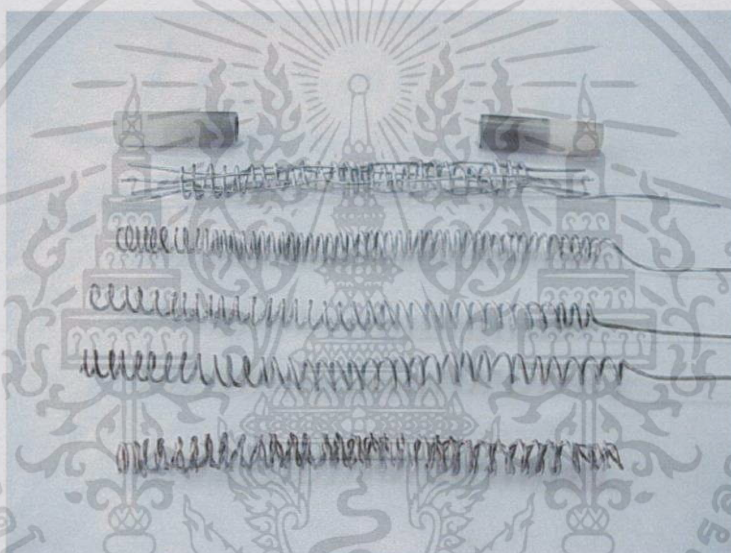


รูปที่ 5.5 กระแสดีสชาร์จเปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็ก เมื่อความดันในแชมเบอร์ของพลาสมาเป็น 4.0×10^{-2} mbar และ ป้อน โวลเตจให้กับขั้ว CA และ CMC 400 V
 (ก) ขั้ว CMC มีโครงสร้างเป็นตะแกรง
 (ข) ขั้ว CMC มีโครงสร้างเป็นเกลียว

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกระแสดีสชาร์จ ในขณะที่เพิ่มและลดสนามแม่เหล็กพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อใช้สนามแม่เหล็กเท่ากัน และในแต่ละรอบการวัดยังได้ผลไม่เปลี่ยนแปลงอีกด้วย ถึงแม้จะใช้เวลาในการวัดรวมทั้งสิ้นเกือบ 2 ชั่วโมงก็ตาม จึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของสภาพขั้ว CMC เนื่องจากการเสื่อมสภาพจากการใช้งาน ไม่มีผลหรือถ้ามีก็มีน้อยมากต่อการลดลงของกระแสดีสชาร์จในช่วงเวลาการใช้งาน 2 ชั่วโมงที่ทำการทดลอง

จากการทดลองโดยการใช้ลวดแคนดัลมาทำเป็นขั้ว CMC ในลักษณะต่าง ๆ เช่น ทำเป็นเกลียวด้วยลวดทั้งขนาดเล็กและใหญ่ มีระยะห่างระหว่างเกลียวกว้างและแคบ และนำมาสานเป็นตะแกรง เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เมื่อทดลองนำไปใช้งานพบว่า โครงสร้างของ CMC ที่เป็น

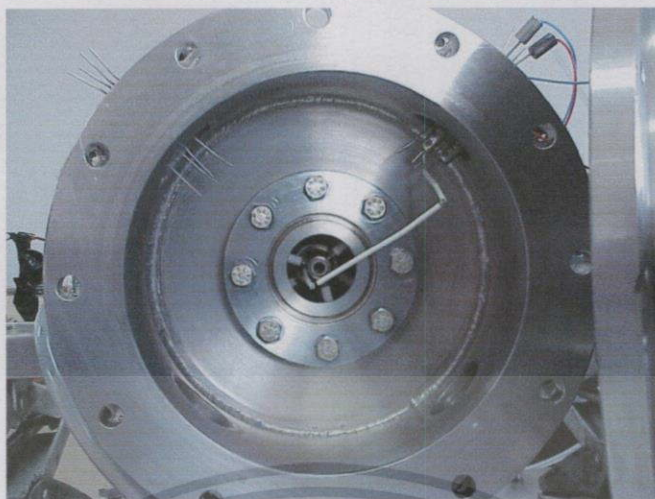
เกลียวจะใช้งานได้ไม่นาน เนื่องจากเวลาเกิดคิสซาร์จพลาสมาจะมีความร้อนค่อนข้างสูงเป็นผลให้ ขั้ว CMC ที่เป็นเกลียวนั้นมีการงอตัวมากจนกระทั่งไปแตะกับส่วนของ CA ได้ จึงไม่สามารถใช้งานได้ แต่โครงสร้างของ CMC ที่นำลวดเคนต์มาสานเป็นตะแกรงจะสามารถใช้งานได้ยาวนานโดยไม่เสียรูป จึงได้ใช้โครงสร้างแบบนี้ในการทดลองต่อมา จากการทดสอบการใช้งานพบว่า ขั้วไฟฟ้าแบบนี้มีอายุการใช้งานนานถึง 80 – 100 ชม. ก่อนที่จะเกิดการสปีดเตอร์จนเส้นลวดขาด โดยเส้นลวดเคนต์ที่ใช้สานเป็นตะแกรงสำหรับงานวิจัยนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm โดยตะแกรงมีระยะห่างระหว่างเกลียว 3.5 mm พื้นบนแกนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 mm ด้วยเส้นลวดในแนวแกนตั้ง 4 เส้น จากผลการทดลองในรูปที่ 5.5(ก) และ 5.5(ข) พบว่าเสถียรภาพของกระแสคิสซาร์จที่ได้จาก CMC แบบตะแกรงนั้นดีกว่าแบบเกลียว



รูปที่ 5.6 ลักษณะของ CMC ที่ทำด้วยลวดเคนต์แบบต่างๆ

2) การศึกษาผลของอุณหภูมิ

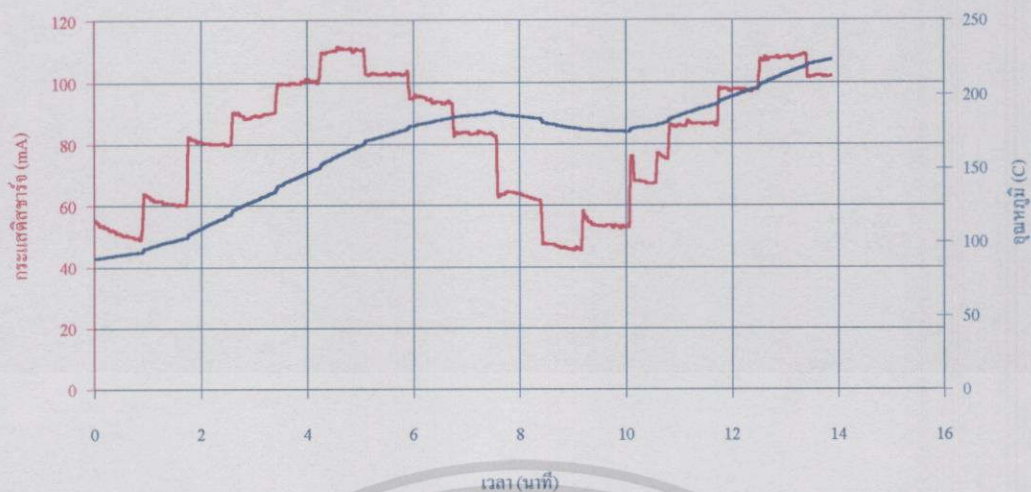
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสคิสซาร์จ จะต้องมีการวัดอุณหภูมิของแก๊สในขณะที่เกิดการคิสซาร์จ แต่เนื่องจากอุณหภูมิของแก๊สกับขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับแก๊สนั้นถือว่ามีค่าเท่ากัน ในการทดลองนี้จึงได้ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิซึ่งในที่นี้ใช้เทอร์มอคัปเปิลชนิด K (thermocouple type K) และกับขั้วด้านในของขั้วแอโนดทรงกระบอก (CA) และต่อผ่านออกมายังเครื่องวัดซึ่งอยู่นอก 챔เบอร์ของพลาสมาผ่านทางขั้วไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างบรรยากาศกับระบบสุญญากาศ (electrical feedthrough) ดังรูปที่ 5.7 จากนั้นจึงทำการวัดอุณหภูมิและกระแสคิสซาร์จ ในขณะที่ความดันภายใน 챔เบอร์ของพลาสมามีค่า 3.5×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจระหว่างขั้ว CA กับ CMC 400 V



รูปที่ 5.7 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิของแก๊ส

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.8(ก) พบว่า เมื่อมีการควบคุมให้กระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง โดยการควบคุมสนามแม่เหล็กจะมีผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามกระแสไฟฟ้าด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าก่อนที่จะเกิดการดีสชาร์จ แก๊สมีอุณหภูมิ 146°C (เกิดจากการทดลองก่อนหน้านี้) เมื่อเริ่มต้นเกิดการดีสชาร์จ โดยให้สนามแม่เหล็กคงที่ พลาสมาจะมีกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นทันทีเป็นประมาณ 160 mA ในขณะที่อุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นด้วย จากนั้นภายในเวลาเพียงประมาณ 20 วินาที กระแสไฟฟ้าก็ลดลงจนมีค่าคงที่ ที่ประมาณ 50 mA ในขณะที่อุณหภูมิก็มีค่าคงที่เช่นกัน และเมื่อการเกิดดีสชาร์จหยุดลง อุณหภูมิก็เริ่มลดลงด้วย ดังรูปที่ 5.8(ข)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นอุณหภูมิของแก๊สก็จะสูงขึ้นด้วยและอุณหภูมิจะลดลงเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำลง แต่เนื่องจากข้อผิดพลาดของเครื่อง CA มีความหนาและความยาวค่อนข้างมากจึงมีมวลมาก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงเกิดขึ้นช้ากว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเล็กน้อย และในกรณีที่ให้สนามแม่เหล็กคงที่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของแก๊สยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัวเช่นในกรณีกำลังมีค่าสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าก็จะมีค่าสูง ต่อเมื่ออุณหภูมิของแก๊สเข้าสู่สภาวะคงตัวกระแสไฟฟ้าจึงมีค่าลดลงและมีค่าคงที่ด้วย อธิบายได้ว่า ในขณะที่อุณหภูมิของแก๊สยังต่ำอยู่การชนเจ็ลลี่จะมีความถี่ต่ำ (แต่ยังคงเป็นค่าที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน) ด้วย ดังนั้นโอกาสในการชนกันแล้วทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนจึงมีมาก ทำให้กระแสไฟฟ้ามีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเริ่มสูงขึ้นเนื่องจากความร้อนของพลาสมาทำให้การชนเจ็ลลี่เริ่มมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นโอกาสในการชนกันแล้วทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนจึงมีน้อยลง เป็นผลให้กระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำลง เมื่ออุณหภูมิกว่าที่การชนเจ็ลลี่ก็มีค่าคงที่ด้วย จึงทำให้กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ความดันภายในแชมเบอร์ของ
 พลาสมา 3.5×10^{-2} mbar และป้อน โวลเตจระหว่าง CA กับ CMC 400 V
 (ก) เมื่อเปลี่ยนสนามแม่เหล็กขึ้นลง
 (ข) เมื่อป้อนสนามแม่เหล็ก 370 G

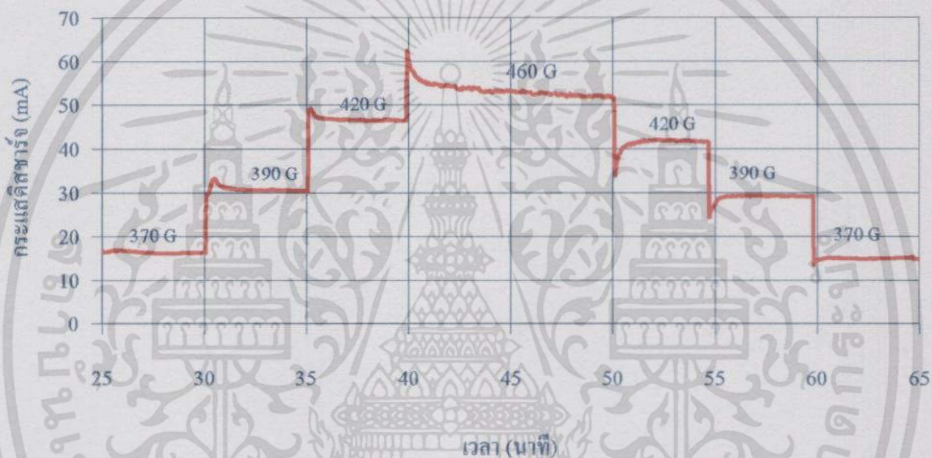
ในกรณีของผลการทดลองในรูปที่ 5.8(ข) พบว่า กระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลงต่ำกว่าค่าที่อย่างรวดเร็ว ซึ่งต่างจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ เช่น กรณีดังรูปที่ 5.2 ที่กว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลงต่ำกว่าที่กินเวลาราว 15 - 20 นาที ทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิเริ่มต้นของแก๊ส (ของขั้ว CA) ในกรณีดังรูปที่ 5.8(ข) อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าสูง ต่างจากอุณหภูมิที่สภาวะสมดุลเพียงเล็กน้อย ส่วนในกรณีดังรูปที่ 5.2 นั้น อุณหภูมิเริ่มต้นเป็นอุณหภูมิห้อง จึงใช้เวลานานกว่าในการเข้าสู่สภาวะสมดุล

นอกจากนี้ เมื่อนำผลการทดลองในรูปที่ 5.5(ก) มาขยายดูในรายละเอียดของการวัด 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่า ในช่วงขาขึ้น เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กกระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด โดยจะมีค่าสูงแล้วจึงลดลงสู่ค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังได้กล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้างต้น แต่เมื่อสังเกตผลเมื่อมีการลดสนามแม่เหล็ก พบว่ากระแสสสารจะลดลงอย่างทันทีทันใดเช่นกัน แต่จะมีค่าต่ำกว่าปกติก่อนที่จะเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าคงที่ ซึ่งเกิดเนื่องจาก เมื่อลดสนามแม่เหล็กลงทันทีทันใด อุณหภูมิของแก๊สไม่ได้ลดลงทันที เมื่ออุณหภูมิยังสูงอยู่ระยะปลอดการชนเฉลี่ยก็ยังคงสูง กระแสสสารจึงเกิดน้อย เมื่ออุณหภูมิเริ่มค่อยลดลง กระแสสสารจึงมีค่าสูงขึ้นและมีค่าคงที่ในที่สุด

ปรากฏการณ์ดังกล่าวอธิบายได้ว่า การลดลงของกระแสสสารจะตามเวลาเป็นผลเนื่องจาก อุณหภูมิพลาสมาที่สูงขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นเกิดเนื่องจากในระบบมีการชนกันระหว่างอนุภาคและระหว่างอนุภาคกับผนังมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิพลาสมาสูงขึ้นจะทำให้ระยะปลอดการชนเพิ่มขึ้น โอกาสในการชนกันระหว่างอนุภาคจะน้อยลงทำให้กระแสสสารจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงของกระแสสสารเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนไป เมื่อความดันใน 챔เบอร์ของพลาสมามีค่า 4.0×10^{-2} mbar และป้อนโวลเตจระหว่าง CA กับ CMC 400 V

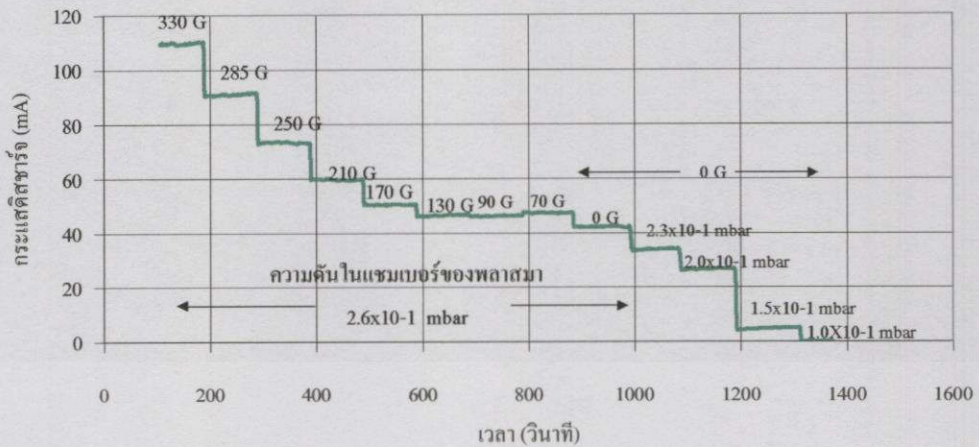
ผลจากการทดลองข้างต้นทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้มากขึ้น จนสามารถควบคุมการทำงานให้มีเสถียรภาพ การทดลองและการวัดต่าง ๆ มีความน่าเชื่อถือและสามารถทำซ้ำได้ ตลอดจนสามารถแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรอื่น ๆ อีกที่มีผลต่อการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ ได้แก่ สนามแม่เหล็กและความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา เป็นต้น จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาพฤติกรรมของแหล่งกำเนิดไอออนเพิ่มเติม

5.1.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสดิซาร์จเนื่องจากความดันและสนามแม่เหล็ก

การศึกษาผลของความดันและสนามแม่เหล็กที่มีต่อการเกิดดิซาร์จพลาสมา มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาว่า ถ้าป้อนโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงให้แก่ขั้ว CA และ CMC คงที่ค่าหนึ่งแล้ว (โวลเตจดิซาร์จ ซึ่งหมายถึงโวลเตจตกคร่อมระหว่างขั้ว CA และ CMC จะมีการเปลี่ยนแปลงตามกระแสดิซาร์จ ถึงแม้จะป้อนโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงมีค่าคงที่ เนื่องจากมีตัวต้านทาน 200Ω 90 W ต่ออนุกรมอยู่) ความดันและสนามแม่เหล็กจะมีผลอย่างไรต่อกระแสดิซาร์จ การทดลองทำโดยป้อนโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรง 400 V แล้ววัดกระแสดิซาร์จ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันในแชมเบอร์ของพลาสมาและสนามแม่เหล็ก

จากการทดลองพบว่า ที่ความดันคงที่ค่าหนึ่งกระแสดิซาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นและที่สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ค่ากระแสดิซาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันและโดยทั่วไปถ้าความดันอยู่ในระดับ 10^{-2} mbar จะต้องใช้สนามแม่เหล็กสูงกว่า 200 G จึงจะเริ่มเกิดดิซาร์จได้ แต่ถ้าเป็นความดันสูงเช่นในระดับ 10^{-1} mbar ขึ้นไป ดิซาร์จพลาสมาสามารถดำรงอยู่ได้โดยไม่ต้องใช้สนามแม่เหล็ก หมายความว่าถ้าไม่ใช้สนามแม่เหล็กก่อนก็จะไม่เกิดดิซาร์จเป็นพลาสมา แต่ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกระตุ้นให้เกิดดิซาร์จพลาสมาขึ้นก่อนแล้วจึงลดสนามแม่เหล็กลงจนเป็นศูนย์ดิซาร์จพลาสมาก็จะยังคงเกิดต่อไปได้ ดังผลการทดลองในรูปที่ 5.10 จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าคงที่ $2.6 \times 10^{-1} \text{ mbar}$ กระแสดิซาร์จจะมีค่าลดลงตามสนามแม่เหล็ก และเมื่อสนามแม่เหล็กลดลงจนเป็นศูนย์ ยังคงมีกระแสดิซาร์จประมาณ 40 mA แต่จะมีค่าลดลงเมื่อความดันลดลงและจะเป็นศูนย์ที่ความดัน $1.0 \times 10^{-1} \text{ mbar}$

ปรากฏการณ์เหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากระยะปลอดการชนเฉลี่ยมีค่าแปรผกผันกับความดัน (โดยที่ระยะปลอดการชนเฉลี่ยดังกล่าวเป็นค่าที่สามารถทำให้เกิดการแตกตัวได้) ที่ความดันสูงระยะปลอดการชนเฉลี่ยจะมีค่าน้อยโอกาสในการชนกันแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนมีมากกว่าที่ความดันต่ำ และสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวช่วยให้อิเล็กตรอนวิ่งควงเป็นเกลียวซึ่งเป็นการเพิ่มทางเดินของอิเล็กตรอน ทำให้มีโอกาสในการชนแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนมากกว่าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าความดันสูงถึงระดับหนึ่งระยะปลอดการชนเฉลี่ยจะมีค่าสั้นประกอบกับในสภาพที่เกิดดิซาร์จพลาสมาอยู่ก่อนแล้วจึงมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มากพอที่จะเกิดการชนอย่างต่อเนื่องต่อไป จึงทำให้เกิดการดิซาร์จพลาสมาต่อไปได้แม้ว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อลดความดันลงระยะปลอดการชนเฉลี่ยจะยาวขึ้นเรื่อย ๆ ในที่สุดโอกาสในการชนกันระหว่างอนุภาคจะมีน้อยลง ซึ่งทำให้เกิดการรวมตัว (recombination) มากกว่าการเกิดดิซาร์จพลาสมาจึงยุติลง



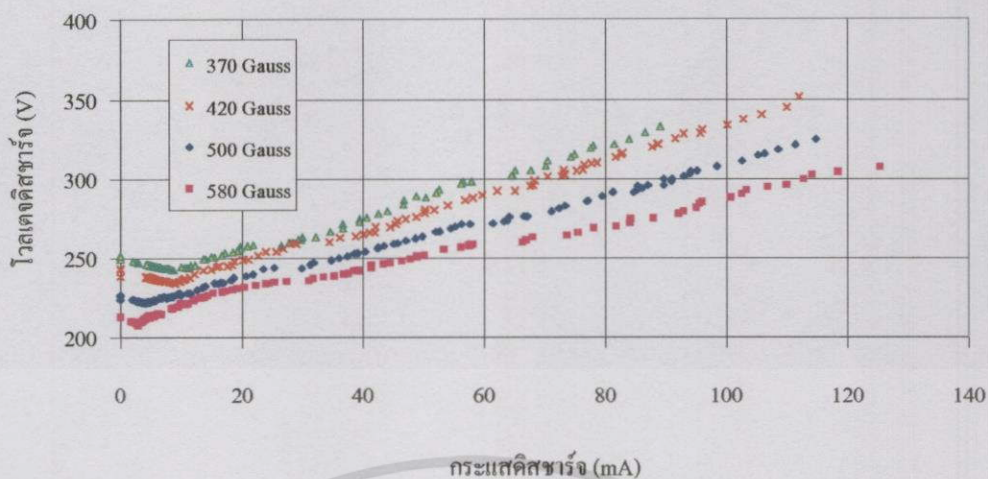
รูปที่ 5.10 ผลของความดันและสนามแม่เหล็กต่อกระแสดีสชาร์จ

5.1.4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับโวลเตจ (I-V Characteristic)

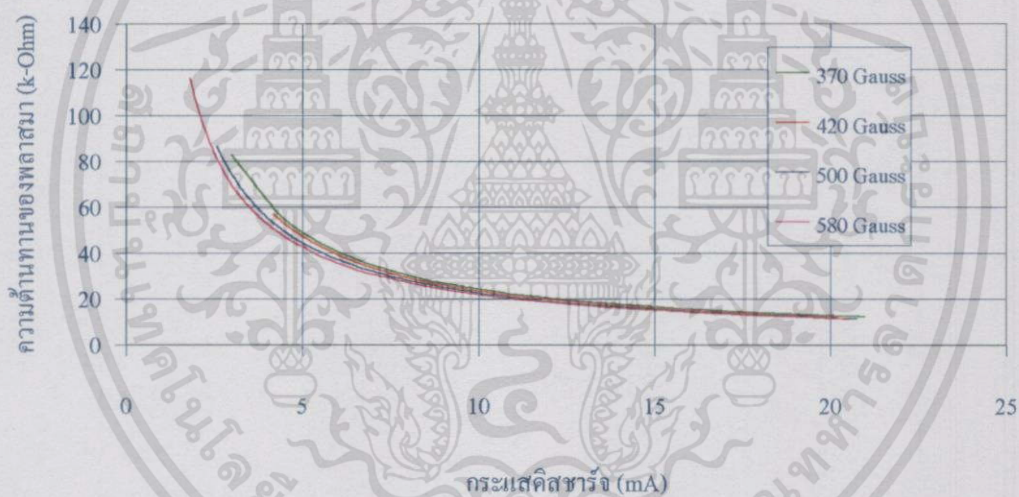
การศึกษความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดีสชาร์จกับโวลต์เตจดีสชาร์จ มีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดีสชาร์จกับโวลเตจดีสชาร์จที่ความดัน สนามแม่เหล็กและโวลเตจที่ป้อนให้กับระบบค่าต่าง ๆ โดยศึกษาที่ความดันระหว่าง 10^{-2} - 10^{-1} mbar ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่า 200 - 600 G และป้อนโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงมีค่าอยู่ระหว่าง 200 - 500 V

1) ความดันคงที่

การทดลองทำโดยใช้ความดันคงที่ 5.0×10^{-2} mbar เมื่อให้สนามแม่เหล็กคงที่ค่าหนึ่ง เช่น 370 G เพิ่มโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงจนกระทั่งเกิดกระแสดีสชาร์จ ประมาณ 100 mA วัดค่ากระแสดีสชาร์จและโวลเตจดีสชาร์จ ในขณะที่ลดโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงลงเรื่อย ๆ จนกระแสดีสชาร์จเป็นศูนย์ จากนั้นเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กแล้วทำการทดลองเช่นเดิม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.11 นำค่ากระแสดีสชาร์จและโวลเตจดีสชาร์จ มาคำนวณหาความต้านทานของพลาสมา จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.12 จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ไม่พบความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานตามสนามแม่เหล็กอย่างเด่นชัด ยกเว้นเมื่อกระแสดีสชาร์จมีค่าต่ำกว่า 10 mA เท่านั้น



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดีสชาร์จกับโวลเตจดีสชาร์จที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ เมื่อกระแสดีสชาร์จเปลี่ยนแปลงด้วยสนามไฟฟ้าและความดันภายในแอมเบอร์ของพลาสมามีค่าคงที่ 5.0×10^{-2} mbar



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ของความต้านทานของพลาสมากับกระแสดีสชาร์จที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ เมื่อกระแสดีสชาร์จเปลี่ยนแปลงด้วยสนามไฟฟ้าและความดันภายในแอมเบอร์ของพลาสมามีค่าคงที่ 5.0×10^{-2} mbar

จากการทดลองข้างต้นพบว่า ถ้าต้องการทำให้ระบบที่ใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กค่าน้อยมีอัตราการแตกตัวของแก๊ส (สังเกตจากค่าของกระแสดีสชาร์จ) เท่ากับระบบที่ใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่สูงกว่า จะต้องเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งเห็นได้จากกราฟรูปที่ 5.11

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.11 พบว่าในช่วงที่กระแสต่ำกว่าประมาณ 10 mA โวลเตจดีสชาร์จมีค่าลดลง เมื่อกระแสดีสชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้น ($dI/dV < 0$) ทั้งนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าถูกรบกวนด้วยอิทธิพลของประจุ (space charge) ในช่วงกระแสนี้ มีการเกิดกระบวนการอะวาลานซ์

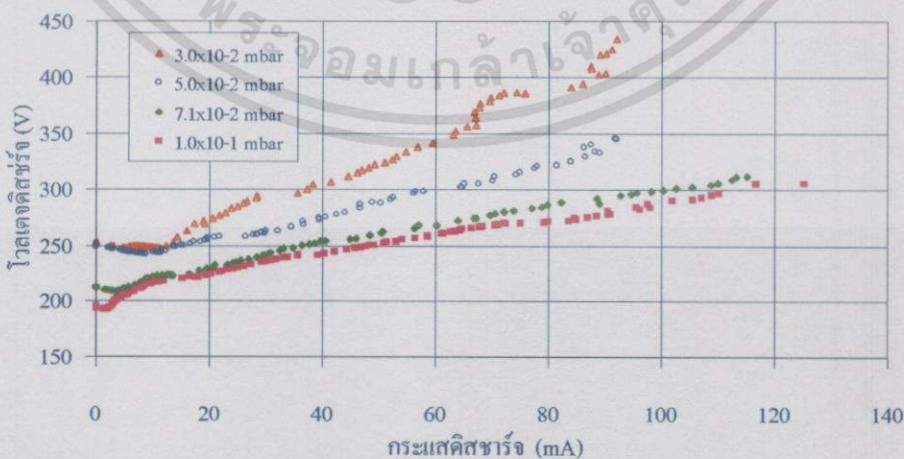
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(avalanche process) ขึ้น เป็นผลให้ความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็ว จากระดับ $M\Omega$ สู่ ระดับ $k\Omega$ จากนั้นการโกลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) ซึ่งเริ่มต้นบริเวณขั้ว CMC ก่อน จะเริ่มแผ่ออกไปยังขั้ว CA อย่างรวดเร็ว ในขณะที่กระแสจะเพิ่มขึ้นมากและความต้านทานก็ยังคงลดลงแต่มีอัตราการลดลงช้ากว่าในช่วงแรก ในที่สุดเมื่อการโกลว์ดิสชาร์จเกิดอย่างสม่ำเสมอในระหว่าง CA กับ CMC แล้วความต้านทานจะมีค่าเกือบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น

จากกราฟรูปที่ 5.12 เห็นได้ว่าที่ค่ากระแสดิสชาร์จเท่ากัน ความต้านทานของพลาสมามีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้อธิบายได้จากปรากฏการณ์การเกิดดิสชาร์จของแก๊สได้ดังนี้ เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากจะส่งผลทำให้บริเวณที่เป็นเนกาทีฟโกลว์จะเลื่อนเข้ามาใกล้กับแคโทดมากขึ้นด้วย [3] และในทางกลับกันถ้าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยลงจะทำให้บริเวณที่เป็นเนกาทีฟโกลว์เลื่อนห่างออกจากขั้วแคโทดมากขึ้น เมื่อบริเวณที่เป็นเนกาทีฟโกลว์อยู่ห่างจากขั้วแคโทดมากขึ้น จะส่งผลทำให้ไอออนบวกจากเนกาทีฟโกลว์และอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเคลื่อนที่ผ่านช่วงมีดแคโทดได้ยากกว่าในกรณีที่ระยะของเนกาทีฟโกลว์อยู่ใกล้กับขั้วแคโทด สาเหตุนี้จึงทำให้ระบบที่มีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยจะมีค่าความต้านทานของพลาสมามากกว่าในระบบที่มีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก

2) สนามแม่เหล็กคงที่

การทดลองทำโดยใช้สนามแม่เหล็กคงที่ 420 G ที่ความดันคงที่ค่าหนึ่ง เช่น 3.0×10^{-2} mbar เพิ่มโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงจนกระทั่งเกิดกระแสดิสชาร์จประมาณ 100 mA วัดค่ากระแสดิสชาร์จและโวลเตจดิสชาร์จ ในขณะที่ลดโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงลงเรื่อย ๆ จนกระแสดิสชาร์จเป็นศูนย์ จากนั้นเปลี่ยนความดันแล้วทำการทดลองเช่นเดิม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.13

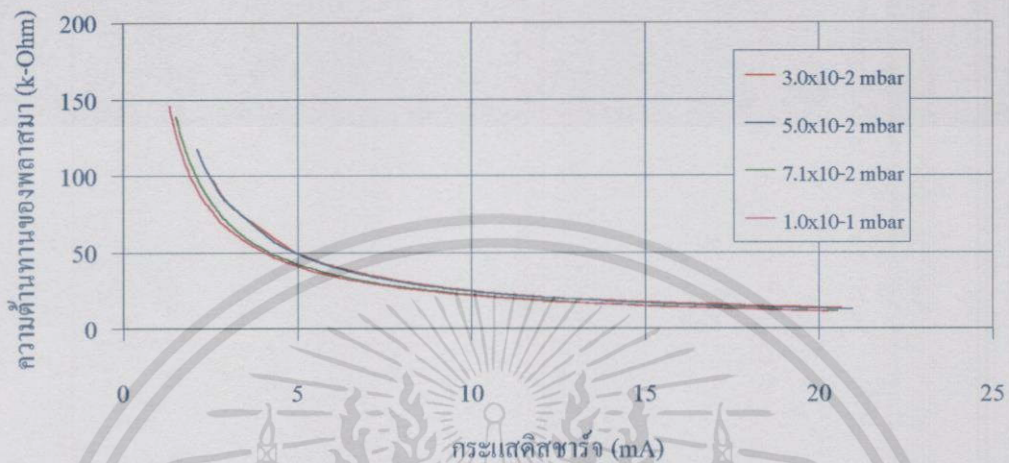


รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิสชาร์จกับโวลเตจดิสชาร์จที่ค่าความดันค่าต่าง ๆ

เมื่อกระแสดิสชาร์จเปลี่ยนแปลงด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ 420 G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่ากระแสดิซาร์จและโวลเตจดิซาร์จมาคำนวณหาความต้านทานของพลาสมา จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.14 ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับกรณีที่มีความดันคงที่ คือ ไม่พบความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานตามความดันอย่างเด่นชัด ยกเว้นเมื่อกระแสดิซาร์จมีค่าต่ำกว่า 10 mA เท่านั้น



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ของความต้านทานของพลาสมา กับกระแสดิซาร์จที่ความดันค่าต่าง ๆ เมื่อกระแสดิซาร์จเปลี่ยนแปลงด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น 420 G

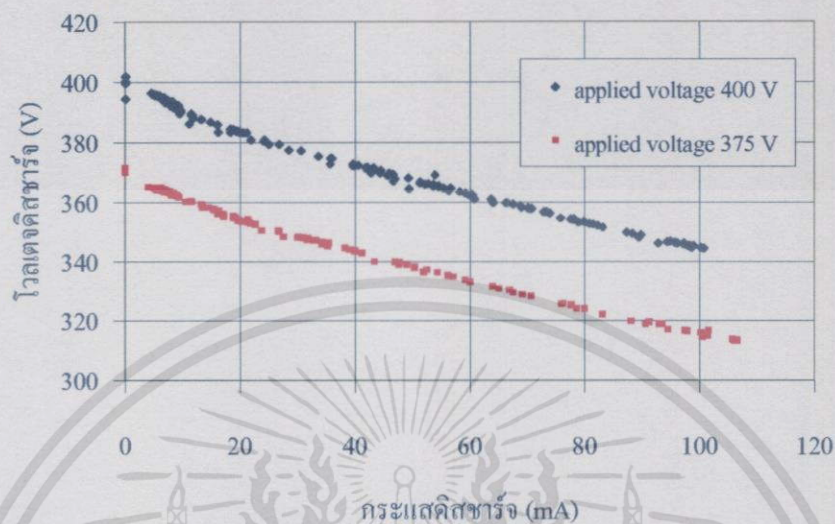
จากการทดลองข้างต้นพบว่า ถ้าต้องการให้ระบบที่ใช้ความดันต่ำ มีอัตราการแตกตัวของแก๊ส (สังเกตจากค่าของกระแสดิซาร์จ) เท่ากับระบบที่ใช้ความดันสูงกว่า จะต้องเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งเห็นได้จากกราฟรูปที่ 5.13

จากกราฟรูปที่ 5.13 และ 5.14 เป็นการศึกษาความต้านทานของพลาสมาโดยที่สนามแม่เหล็กที่ค่าเท่ากันที่แต่ละระดับความดัน จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 5.14 จะเห็นว่า ที่ค่ากระแสดิซาร์จค่าเดียวกันซึ่งถือว่า มีอัตราการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สเท่ากันนั้น ความต้านทานของพลาสมาในกรณีที่มีความดันต่ำมีค่าสูงกว่าที่ความดันสูง อธิบายได้จากพฤติกรรมของระบบแก๊สดิซาร์จดังนี้ เมื่อระบบมีความดันสูงขึ้นจะส่งผลทำให้บริเวณที่เป็นเนกาทีฟโกลด์หอดัวและเลื่อนเข้ามาใกล้กับขั้วแคโทดมากขึ้น ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา จึงทำให้เมื่อความดันของระบบสูงขึ้น ความต้านทานของพลาสมาจึงมีค่าต่ำลง

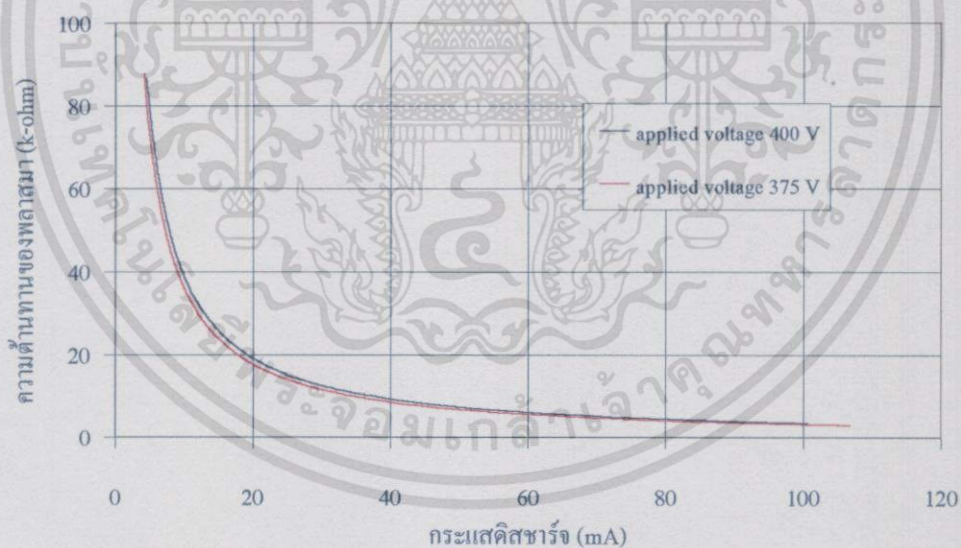
3) สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบคงที่

การทดลองทำโดยป้อนโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงมีค่าคงที่ 375 V และ 400 V ที่ความดันคงที่ 4.0×10^{-2} mbar เพิ่มสนามแม่เหล็กจนกระทั่งเกิดกระแสดิซาร์จประมาณ 100 mA วัดค่ากระแสดิซาร์จและโวลเตจดิซาร์จ ในขณะที่ลดสนามแม่เหล็กลงเรื่อย ๆ จนกระแสดิซาร์จเป็นศูนย์

ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.15 นำค่ากระแสคิซาร์จและโวลเตจคิซาร์จมาคำนวณหาความต้านทานของพลาสมาโดยใช้กฎของโอห์ม ได้ผลดังแสดงรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคิซาร์จกับโวลเตจคิซาร์จที่ความดัน 4.0×10^{-2} mbar เมื่อกระแสคิซาร์จเปลี่ยนแปลงด้วยสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคิซาร์จกับความต้านทานของพลาสมาที่ความดัน 4.0×10^{-2} mbar เมื่อโวลเตจที่ป้อนให้กับระบบมีค่าต่างกัน

จากการทดลองในกราฟรูปที่ 5.16 ที่กระแสคิซาร์จค่าเดียวกัน ความเข้มของสนามแม่เหล็กในกรณีที่ป้อนโวลเตจ 400 V จะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ป้อนโวลเตจ 375 V ซึ่งทำให้ความต้าน

ทานของพลาสมาในกรณีที่ป้อนโวลเตจ 375 V มีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ป้อนด้วยโวลเตจ 400 V ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับกรณีข้างต้น

ความต้านทานของพลาสมาที่แสดงในรูป คำนวณจาก ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิสชาร์จกับโวลต์เตจดิสชาร์จของพลาสมาโดยใช้กฎของโอห์มเช่นเดียวกันกับกราฟที่ผ่านมา พบว่าความต้านทานมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงกระแสดิสชาร์จต่ำและจะมีค่าเกือบคงที่เมื่อกระแสดิสชาร์จสูง แสดงว่ามีขบวนการเกิดดิสชาร์จของพลาสมาต่างกันในแต่ละช่วงของกระแส ซึ่งโดยทั่วไปในกระบวนการเกิดโกลว์ดิสชาร์จจะมีอยู่ 3 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงการเรืองแสงแบบต่ำกว่าปกติ (subnormal glow) แบบปกติ (normal glow) และ แบบผิดปกติ (abnormal glow)

ช่วงการเรืองแสงแบบต่ำกว่าปกติเป็นช่วงที่กระแสดิสชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่โวลเตจดิสชาร์จมีค่าลดลง ดังนั้นช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่ความต้านทานของพลาสมามีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ถัดจากช่วงช่วงการเรืองแสงแบบต่ำกว่าปกติ จะถึงช่วงการเรืองแสงแบบปกติ ช่วงนี้กระแสดิสชาร์จจะเพิ่มขึ้นในขณะที่โวลเตจดิสชาร์จมีค่าคงที่ เป็นผลให้ความต้านทานพลาสมาในช่วงนี้ยังคงมีค่าลดลงแต่ในอัตราที่ช้ากว่าในช่วงแรก จากนั้นการดิสชาร์จของแก๊สจะเข้าสู่ช่วงการเรืองแสงแบบผิดปกติ ซึ่งเป็นช่วงที่กระแสดิสชาร์จมีค่าสูงขึ้นในขณะที่โวลเตจดิสชาร์จก็มีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่ความต้านทานของพลาสมามีค่าเกือบคงที่

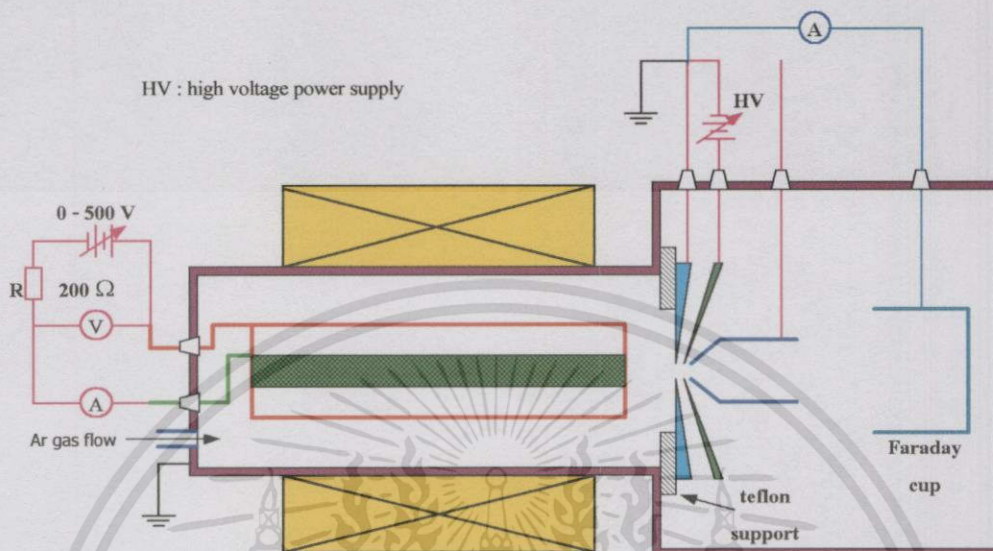
5.2 การทดลองการดึงไอออน

สำหรับงานวิจัยนี้การศึกษากระบวนการดึงไอออนที่นำมาศึกษาเมื่ออยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ ดังแสดงไว้ในไดอะแกรมรูปที่ 4.13 และภาพถ่ายในภาคผนวก ข รูปที่ ข5 ระบบแรกเป็นระบบที่ใช้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาที่มีความยาวของขั้วแอโนด 128 mm และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าพลาสมา กับแหล่งกำเนิดพลาสมามีระยะห่างถึง 51.5 mm ดังแสดงในไดอะแกรมรูปที่ 4.13(ก) ส่วนในระบบที่สองนั้นเป็นการปรับปรุงจากระบบแรกโดยการปรับให้ระยะห่างระหว่างระบบการดึงไอออนกับแหล่งกำเนิดพลาสมาให้สั้นลง ดังแสดงในรูปที่ 4.13(ข) ซึ่งจะได้อำนาจถึงในหัวข้อต่อไป โดยระบบการดึงไอออนที่นำมาศึกษาในหัวข้อนี้เป็นระบบในรูปที่ 4.13 (ก)

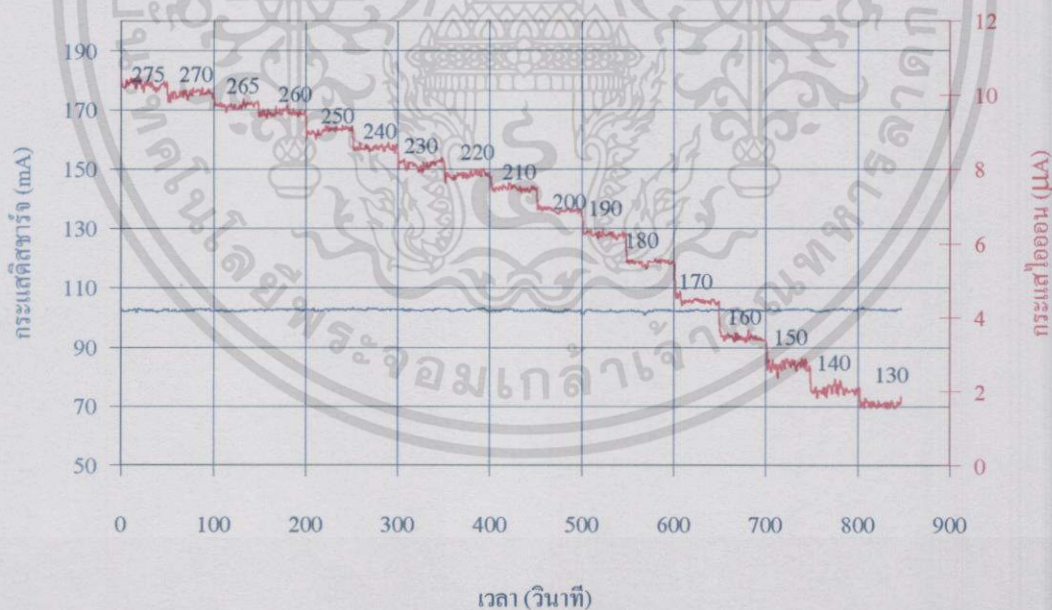
ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาการทำงานของระบบการดึงไอออนทำได้โดยการป้อนโวลเตจสูงให้กับระบบการดึงไอออน ในขณะที่แหล่งกำเนิดพลาสมา กำลังทำงานอยู่ ซึ่งการจัดวางระบบการดึงไอออน การป้อนโวลเตจสูงให้กับขั้วไฟฟ้าของระบบการดึงไอออน และการจัดเครื่องมือวัดจะได้กล่าวถึงโดยละเอียดต่อไป

การทดลองในขั้นแรกนี้ทำโดยการต่อวงจรดังรูปที่ 5.17 ปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบ HOCAM 400 V ปลอ่ยขั้วไฟฟ้าที่สอง ลอย ขณะทำการทดลอง ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่า 1.0×10^{-1} mbar และ กระแสดิสชาร์จมีค่าคงที่ 100 mA ปรับค่า HV (แหล่งกำเนิด

ไฟฟ้ากระแสตรงโวลเตจสูงของระบบการดึงไอออน) ทุก ๆ 50 วินาที (บันทึกค่าทุก ๆ 2 วินาที) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.18 นำค่ากระแสไอออนสำหรับแต่ละค่าของ HV มาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำมาพล็อตกับ HV จะได้กราฟดังรูปที่ 5.19

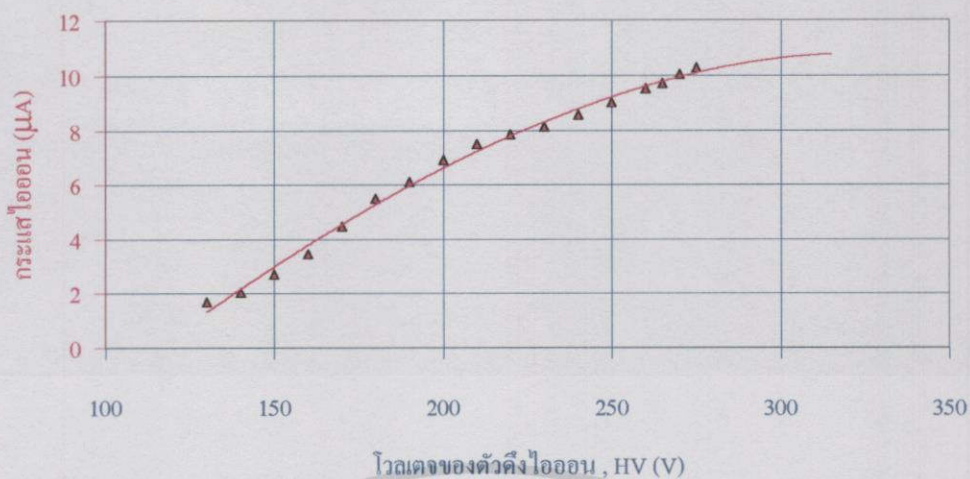


รูปที่ 5.17 ระบบการดึงไอออน มี 3 ขั้วต่อขั้วไฟฟ้าพลาสมาเป็นกรวด ป้อน HV ให้กับขั้วไฟฟ้าขั้วที่หนึ่ง และ บล่อยขั้วไฟฟ้าที่สองลอย



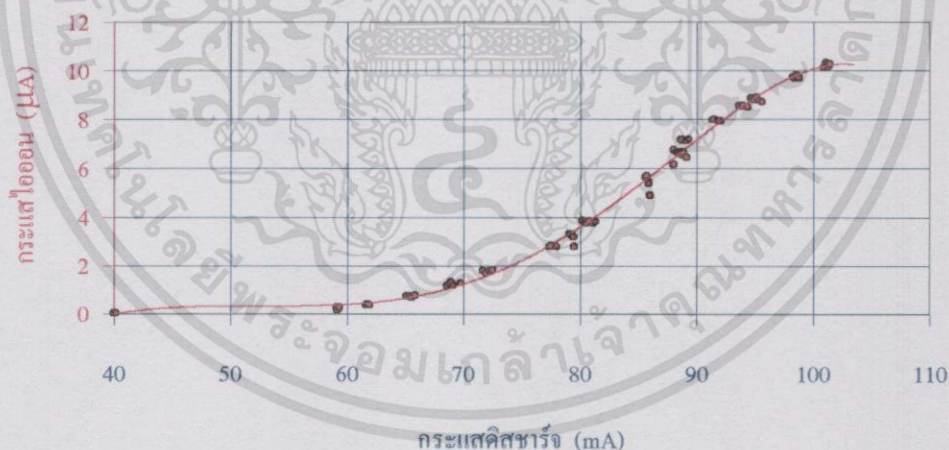
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและกระแสไอออนกับเวลาที่ค่า HV ค่าต่าง ๆ เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมาเป็นค่าเป็น 1.0×10^{-1} mbar และ ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและโวลเตจของตัวดึงไอออน เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา 1.0×10^{-1} mbar กระแสคิซาร์จ 100 mA และป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V

ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับกระแสคิซาร์จโดยตั้ง HV เป็น 260 V เปลี่ยนค่ากระแสคิซาร์จโดยการปรับสนามแม่เหล็ก บันทึกค่ากระแสไอออนและกระแสคิซาร์จ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและกระแสคิซาร์จ เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา 1.0×10^{-1} mbar ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V และป้อน HV 260 V

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.19 พบว่ากระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตามโวลเตจของตัวดึงไอออน (extraction voltage) แต่ในช่วงที่โวลเตจของตัวดึงไอออนมีค่าสูงขึ้น กระแสไอออนมีแนวโน้มที่จะไม่เพิ่มขึ้นอีก (saturate) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกระแสคิซาร์จมีค่าคงที่ซึ่งแสดงว่าความหนา

แน่นหรือปริมาณของไอออนในพลาสมาที่มีค่าคงที่ด้วย ในขณะที่ไอออนที่ถูกดึงออกสูงสุดแล้วเมื่อเพิ่มโวลเตจให้กับตัวดึงขึ้นอีกก็ไม่สามารถเพิ่มกระแสไอออนได้ (การทดลองนี้ได้พยายามเพิ่มโวลเตจให้กับตัวดึงไอออนขึ้นอีกแต่เกิดการตัดวงจร (trip) ของแหล่งจ่ายไฟตรงแรงดันสูง (HV) จึงไม่สามารถเก็บข้อมูลได้) หรืออีกสาเหตุหนึ่งน่าจะเกิดจากการที่ปริมาณไอออนมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มโวลเตจให้กับตัวดึงไอออน เมื่อไอออนมีปริมาณมากทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกัน ซึ่งทำให้ลำไอออนนั้นบานมากจนไอออนส่วนที่บานออกไปนั้นวิ่งชนกับผนังหรือขั้วอิเล็กโทรดขั้วที่สองแทนที่จะวิ่งชนด้วยฟาราเดย์ โดยขั้วที่สองนี้มีลักษณะเป็นจานขนาดใหญ่วางขวางทางเดินของลำไอออนและมีช่องตรงกลาง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 2 mm

เมื่อให้โวลเตจของตัวดึงไอออนมีค่าคงที่ ดังผลการทดลองในรูปที่ 5.20 พบว่ากระแสไอออนเพิ่มขึ้นตามกระแสดีสชาร์จ แต่เมื่อกระแสดีสชาร์จเพิ่มสูงระดับหนึ่งแล้ว กระแสไอออนมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความแรงของสนามไฟฟ้าของตัวดึงไอออนมีค่าคงที่ถึงแม้กระแสดีสชาร์จจะมีค่าสูงขึ้นหรือปริมาณของไอออนเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่อัตราการดึงไอออนออกมีค่าคงที่เนื่องจากโวลเตจของตัวดึงไอออน (HV) มีค่าคงที่ จึงไม่มีกระแสไอออนเพิ่มขึ้นถึงแม้จะเพิ่มกระแสดีสชาร์จ

ในทางกลับกัน จากการทดลองนี้พบว่า ในช่วงที่กระแสดีสชาร์จต่ำกว่า 40 mA ก็ไม่สามารถดึงไอออนออกมาได้ เนื่องจากมีไอออนบวกในพลาสมาน้อยเกินไปที่ระบบนี้จะดึงไอออนออกมาได้ ประกอบกับระบบนี้ยังไม่สมบูรณ์นักและปัญหาของแหล่งจ่ายไฟสูงที่ไม่ค่อยมีเสถียรภาพ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดึงไอออนค่อนข้างต่ำ

5.3 การปรับปรุงระบบการดึงไอออน

จากการศึกษาและผลการทดลองเท่าที่ผ่านมาทำให้เข้าใจพฤติกรรมของแหล่งกำเนิดพลาสมาและระบบการดึงไอออนมากขึ้น ประกอบกับการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดพลาสมากับระบบการดึงไอออน [22] นั้น พบว่าประสิทธิภาพในการดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมาที่ยังต่ำอยู่นั้นน่าจะเกิดเนื่องจากระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดพลาสมากับขั้วไฟฟ้าขั้วแรกของระบบการดึงไอออน (ขั้วไฟฟ้าพลาสมา) มีมากเกินไป (51.5 mm) จึงจำเป็นต้องลดระยะให้สั้นลง เนื่องจากชุดจับยึดขั้วไฟฟ้า CMC ของแหล่งกำเนิดพลาสมาที่ออกแบบไว้เดิมนั้นประกอบด้วยชุดจับยึดของขั้ว CMC ทั้งด้านที่ติดกับระบบการดึงไอออนและด้านหลัง ทำให้ไม่สามารถเลื่อนชุดดึงไอออนให้เข้าใกล้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาได้ เนื่องจากติดชุดจับยึดขั้ว CMC ด้านหน้า จึงต้องออกแบบชุดจับยึดขั้วไฟฟ้า CMC ใหม่ โดยตัดชุดจับยึดด้านหน้าที่ติดกับขั้วไฟฟ้าพลาสมาออก เหลือไว้เฉพาะด้านหลังและเพื่อให้ขั้ว CMC อยู่ที่แนวแกนกลางของขั้ว CA ได้โดยที่ปลายไม่ตกลงมา สามารถทำได้โดยการลดความยาวของขั้วทั้ง CA และ CMC ลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของความยาวเดิม และเพิ่มความมั่นคงในการจับยึดทางด้านหลังโดยการเพิ่มความยาวของท่อเซรามิกและท่อแก้วสำหรับชุดจับยึด ดังแสดงในรูปที่ 5.21 เมื่อติดตั้งร่วมกับระบบดึงไอออนพบว่าขั้วไฟฟ้าของ HOCAM อยู่ห่างจากขั้วไฟฟ้าพลาสมาเพียง 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.13(ข) โดยระบบดึงไอออนที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงไว้ในภาคผนวก ข รูปที่ ข7 เมื่อทดลองใช้งานพบว่าการเกิดพลาสมาเป็นไปด้วยดีดังแสดงในรูปที่ 5.22 จากรูปที่ 5.22 (ค) จะเห็นพลาสมาเกิดล้าจากปลาย CA และระบบที่ใช้ในการทดลองดึงไอออนมีโครงสร้างดังรูปที่ 5.23



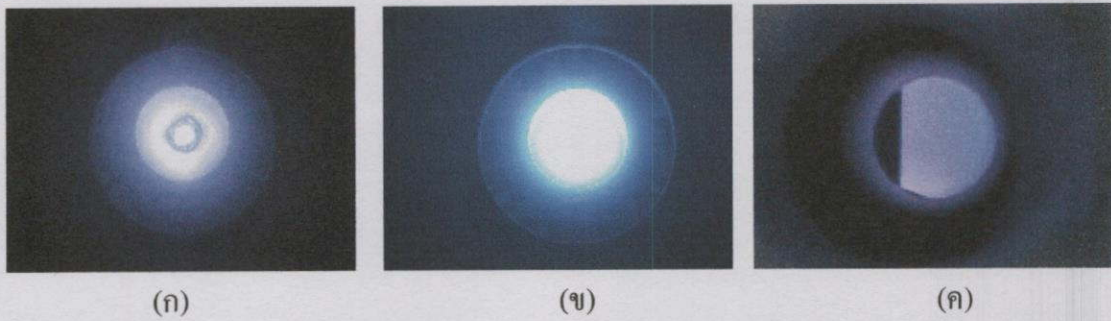
(ก)

(ข)

รูปที่ 5.21 ขั้วไฟฟ้า CA และ CMC พร้อมชุดจับยึด

(ก) ชุดจับยึดที่ออกแบบใหม่

(ข) CA และ CMC มีขนาดสั้นลงเมื่อเทียบกับแบบเดิม

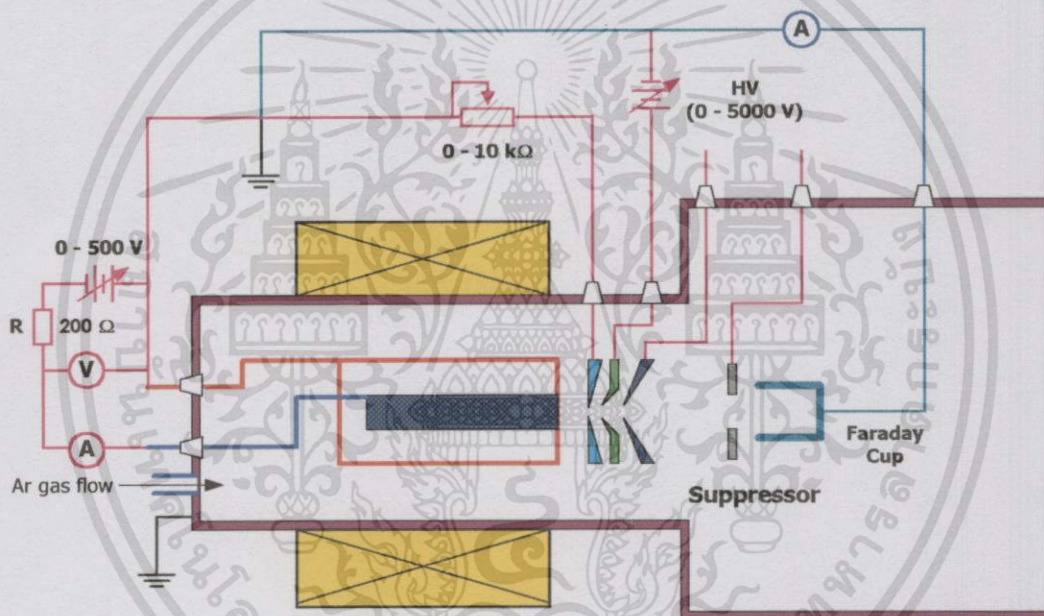


รูปที่ 5.22 การเกิดพลาสมาในระบบที่ออกแบบใหม่

(ก) กระแสดีสชาร์จ 15 mA

(ข) กระแสดีสชาร์จ 90 mA

(ค) พลาสมาในรูป (ก) เมื่อมองจากด้านข้าง (แถบสีดำซ้ายมือคือขอบปลายของ CA)



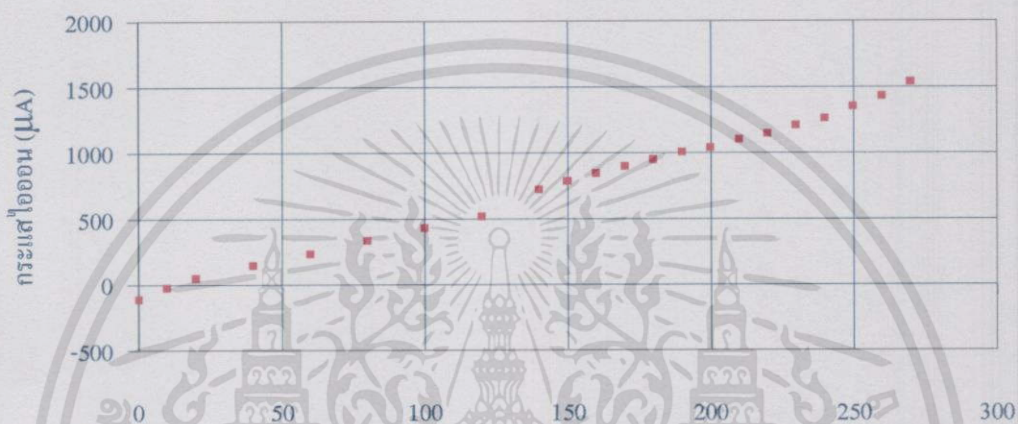
รูปที่ 5.23 ระบบการดึงไอออนที่ออกแบบให้ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดไอออนและระบบการดึงไอออนสั้นลง

5.3.1 ผลของการลดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าพลาสมากับแหล่งกำเนิดพลาสมา

เมื่อทำการปรับปรุงระบบของแหล่งกำเนิดพลาสมาและระบบการดึงไอออนดังกล่าวข้างต้นนั้นทำให้สามารถลดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดพลาสมากับขั้วไฟฟ้าพลาสมาลงได้ โดยการทดลองได้ติดตั้งขั้วไฟฟ้าพลาสมาห่างจากแหล่งกำเนิดพลาสมาประมาณ 5 mm แทนที่จะเป็น 51.5 mm แบบเดิม นอกจากนี้การลดขนาดของ CA และ CMC ให้สั้นลงจะส่งผลทำให้ปริมาตรของพลาสมาลดลง แต่ยังคงให้ความหนาแน่นของพลาสมาที่เท่าเดิมโดยใช้กระแสดีสชาร์จน้อยลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากการทดลองพบว่าแหล่งกำเนิดพลาสมาสามารถใช้งานได้ดีที่กระแสสัทธิจประมาณ 15 mA เทียบกับ 50 - 100 mA สำหรับขั้ว CA และ CMC แบบเดิม โดยผลการทดลองที่ได้จากระบบที่ออกแบบใหม่นี้ พบว่าแหล่งกำเนิดไอออนที่ทำการออกแบบใหม่นี้สามารถให้กระแสไอออนได้มากกว่า 1.5 mA ดังรูปที่ 5.24 เมื่อเทียบกับก่อนที่จะทำการปรับปรุงซึ่งให้กระแสไอออนไม่เกิน 20 μA พบว่าสามารถเพิ่มกระแสไอออนได้มากกว่า 50 เท่า โดยใช้กำลังงานน้อยลง 5 เท่า หมายความว่าระบบที่ได้รับการปรับปรุงนี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นประมาณ 250 เท่า



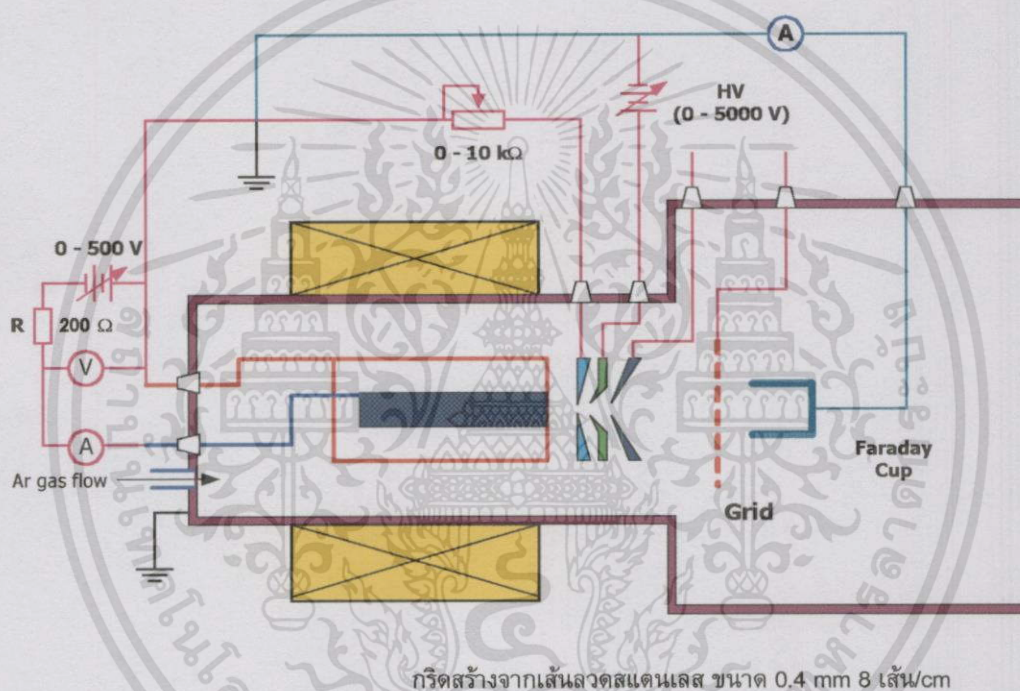
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและโวลเตจของตัวดึงไอออนของระบบที่ปรับปรุงใหม่ ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่า 9.2×10^{-2} mbar กระแสสัทธิจ 12 mA และป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V

5.3.2 ตรวจสอบการทำงานของระบบการดึงไอออน

เพื่อพิสูจน์ข้อสงสัยที่ว่าระบบการดึงไอออนที่ใช้สามารถทำงานได้ถูกต้องหรือไม่ กล่าวคือ กระแสที่วัดได้จากระบบโดยใช้ถ้วยฟาราเดย์เป็นกระแสไอออนบวกใช่หรือไม่ เนื่องจากถึงแม้ว่าทิศทางของกระแสที่วัดได้โดยถ้วยฟาราเดย์จะแสดงให้เห็นว่าเป็นกระแสบวกจากลำไอออน แต่ก็เป็นไปได้ว่ากระแสนั้นอาจเกิดจากกระแสอิเล็กทรอนิกส์จากแหล่งกำเนิดพลาสมาหรือจากแหล่งอื่นก็ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งให้มีพลังงานสูงพอเมื่อชนถ้วยฟาราเดย์ อาจทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดจากถ้วยฟาราเดย์ได้ และถ้าอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีมากกว่าอิเล็กตรอนที่เข้าชน จะทำให้กระแสที่วัดได้มีทิศของกระแสเช่นเดียวกับกระแสที่เกิดจากไอออนบวก การทดลองเพื่อพิสูจน์ชนิดของอนุภาคที่วัดได้จากถ้วยฟาราเดย์ทำโดยการติดตั้งกริดไว้หน้าถ้วยฟาราเดย์ดังแสดงในรูปที่ 5.25 แล้วทำการทดลองโดยใช้ข้อสมมุติฐานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ถ้าอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกริดเป็นไอออนบวก กริดจะต้องมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อเทียบกับกรวด แต่ถ้าอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกริดเป็นอิเล็กตรอน กริดจะต้องมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับกรวด
2. เมื่อป้อนโวลเตจที่เป็นบวกให้แก่กริดกระแสที่วัดได้โดยด้วยฟาราเดย์จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มโวลเตจขึ้นถ้ากระแสที่วัดได้เป็นกระแสไอออนบวก ในทางกลับกันถ้าอนุภาคนั้นเป็นอิเล็กตรอนกระแสที่วัดได้โดยด้วยฟาราเดย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น
3. เมื่อ ไอออนบวกที่มีพลังงานเพียงพอเข้าชนด้วยฟาราเดย์จะทำให้เกิดขบวนการสปัตเตอร์ขึ้น ในขณะที่อิเล็กตรอนไม่สามารถทำให้เกิดการสปัตเตอร์



รูปที่ 5.25 การติดตั้งกริดเพื่อศึกษาการทำงานของระบบการดึงไอออน

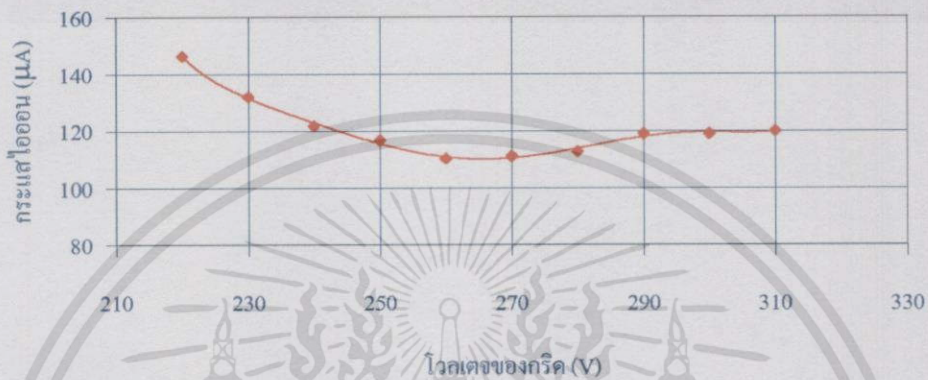
ผลการทดลองในการตรวจสอบการทำงานของระบบการดึงไอออนมีดังนี้

1. ศักย์ไฟฟ้าของกริดมีค่าประมาณ 200 V เป็นบวกเมื่อเทียบกับกรวด เนื่องจากมีไอออนบวกมาสะสมที่กริด
2. เมื่อป้อนโวลเตจที่กริดเป็นบวกมากกว่า 200 V กระแสที่วัดได้โดยด้วยฟาราเดย์มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.26 เนื่องจากสนามไฟฟ้าจากกริดจะผลักอนุภาคที่มีประจุบวกของลำไอออน
3. เมื่อถอดด้วยฟาราเดย์ออกมาตรวจสอบพบว่าการสปัตเตอร์เกิดขึ้น เนื่องจากไอออนบวกมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมากจึงมีโมเมนตัมสูง เมื่อวิ่งเข้าชนด้วยฟาราเดย์จึงเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สปีดเตอร์ในขณะที่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าไอออนมาก จึงมีโมเมนตัมไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสปีดเตอร์ได้

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า อนุภาคที่วัดได้เป็นไอออนบวก ดังนั้นระบบการดึงไอออนที่สร้างขึ้นจึงสามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลเตจของกริดกับกระแสไอออน เมื่อโวลเตจของตัวดึงไอออนมีค่า 250 V ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าเป็น 9.3×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V และกระแสดีสชาร์จ 22 mA

5.3.3 การทดสอบแหล่งกำเนิดไอออนที่ออกแบบใหม่

เนื่องจากระบบการดึงไอออนที่ใช้มีขั้วไฟฟ้าอยู่ใกล้กันหลายขั้ว เมื่อมีการป้อนโวลเตจให้กับขั้วไฟฟ้าเหล่านี้อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สขึ้นในบริเวณช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของระบบการดึงไอออน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่ากระแสไอออนที่ดึงได้นั้นมาจากการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สภายในบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าของระบบการดึงไอออน ไม่ได้มาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาโดยตรง เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าไอออนที่วิ่งเข้าชนด้วยฟาราเดย์มาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาจริงหรือไม่นั้น สามารถทำการทดลองโดยใช้ข้อสมมุติฐานดังนี้

ถ้ากระแสไอออนที่ดึงออกมาได้มาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาจริง เมื่อกระแสดีสชาร์จในแหล่งกำเนิดพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงกระแสไอออนควรจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แต่ถ้ากระแสไอออนที่ดึงได้มาจากการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สภายในช่องว่างของขั้วไฟฟ้าของระบบการดึงไอออน โดยแหล่งกำเนิดพลาสมาทำหน้าที่เป็นเพียงตัวกระตุ้นให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สในระบบการดึงไอออนเท่านั้น (เนื่องจากไม่พบว่ามีการแตกตัวเป็นไอออนในแหล่งกำเนิดพลาสมา) เมื่อเกิดการแตกตัวเป็นไอออนแล้วก็ไม่จำเป็นต้องอาศัยแหล่งกำเนิดพลาสมาอีกต่อไป ดังนั้นกระแสไอออนที่ดึงออกมาได้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของ

กระแสดิสชาร์จในแหล่งกำเนิดพลาสมา (ความหนาแน่นของพลาสมาในแหล่งกำเนิดพลาสมาเปลี่ยนไป)

การทดลองทำโดยการวัดค่ากระแสไอออน ในขณะที่ลดกระแสดิสชาร์จลงจากประมาณ 20 mA จนถึงประมาณ 14 mA ด้วยการลดสนามแม่เหล็ก พบว่ากระแสไอออนมีค่าลดลงตามกระแสดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจาก 300 μA จนถึงประมาณ 50 μA ดังแสดงในรูปที่ 5.27 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อลดกระแสดิสชาร์จต่ำกว่า 14 mA พลาสมาจะดับเป็นผลให้กระแสไอออนลดลงเป็นศูนย์ด้วย นอกจากนี้ จากกราฟรูปที่ 5.27 ยังสังเกตเห็นได้อีกว่า แม้ว่ากระแสดิสชาร์จจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากระบบยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุล (ที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง) กระแสไอออนที่วัดออกมาได้นั้นก็ยังมีค่าเปลี่ยนตามกระแสดิสชาร์จไปด้วย



รูปที่ 5.27 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไอออนตามกระแสดิสชาร์จ (ควบคุมด้วยสนามแม่เหล็ก) กับเวลา เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าเป็น 8.0×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V และ โวลเตจของตัวดึงไอออน 140 V

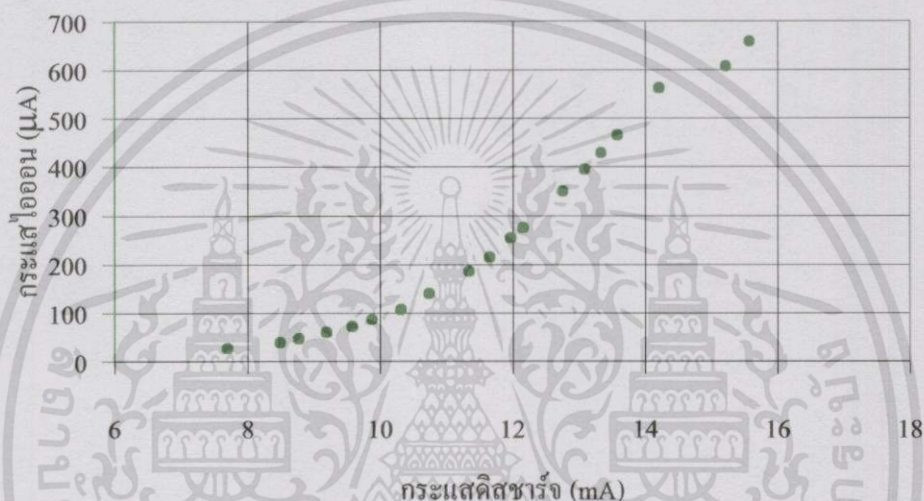
จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า กระแสไอออนที่ดึงออกมาได้นั้นมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา HOCAM มิได้เกิดเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สที่อยู่ภายในบริเวณช่องว่างของขั้วไฟฟ้าของระบบการดึงไอออนในขณะที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับระบบการดึงไอออน

1) การศึกษาผลของกระแสดิสชาร์จต่อกระแสไอออน

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับกระแสดิสชาร์จ ทำโดยให้โวลเตจของตัวดึงไอออน มีค่าคงที่ 140 V ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา 7.9×10^{-2} mbar และ

ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V โดยที่กระแสสสารจเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก

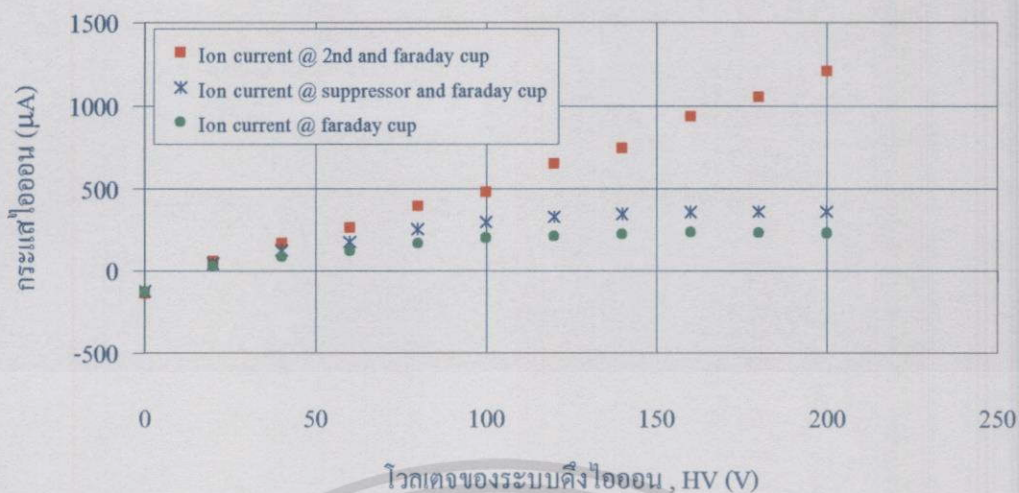
จากการทดลองพบว่ากระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตามกระแสสสารจดังแสดงในรูปที่ 5.28 จากรูปพบว่ากระแสไอออนมีค่าเพิ่มเป็นประมาณ 700 μA เมื่อกระแสสสารจเพิ่มถึง 16 mA โดยที่กระแสไอออนยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นได้อีก แต่จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสสสารจ สูงกว่า 16 mA แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (HV) จะตัดวงจร (trip) ทำให้ไม่สามารถทดลองต่อได้เนื่องจากถึงขีดจำกัดของแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสสารจและกระแสไอออน เมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าเป็น 9.2×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 365 V และโวลเตจของระบบคิงไอออน 140 V

2) การศึกษาผลของ โวลเตจของตัวคิงไอออนต่อกระแสไอออน

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับโวลเตจของตัวคิงไอออน ทำโดยให้โวลเตจของตัวคิงไอออนมีค่าคงที่ 140 V ความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมา 7.9×10^{-2} mbar และป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V



รูปที่ 5.29 ผลของโวลเตจของตัวดึง ไอออนต่อกระแสไอออนเมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าเป็น 8.2×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V และ กระแสคิซาร์จ 14.23 mA

ในการทดลองเพื่อวัดกระแสไอออนในที่นี้ได้ต่อแอมป์มิเตอร์เพื่อวัดกระแสในสามลักษณะ คือ 1) วัดกระแสที่ด้วยฟาราเดย์อย่างเดียว 2) วัดกระแสที่ด้วยฟาราเดย์รวมกับกระแสที่ขั้วไฟฟ้ากักกัน (suppressor electrode) และ 3) วัดกระแสที่ด้วยฟาราเดย์รวมกับกระแสที่ขั้วไฟฟ้าที่สอง ของชุดตัวดึงไอออน ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.29 จากรูปพบว่ากระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตามโวลเตจของตัวดึงไอออนที่เพิ่มขึ้นจนถึง 200 V จากผลการทดลองพบว่ากระแสไอออนจากการวัดทั้งสามแบบมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ถ้าโวลเตจของตัวดึงไอออนมีค่าน้อยกว่า 50 V แต่เมื่อโวลเตจของตัวดึงไอออน มีค่าสูงขึ้น กระแสไอออนที่วัดแบบที่ 3) จะมีค่าสูงกว่าการวัดแบบที่ 1) และ 2) มาก ซึ่งมีค่าถึง 1200 μA โดยที่กระแสจากด้วยฟาราเดย์ อย่างเดียวมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากด้วยฟาราเดย์รวมกับขั้วไฟฟ้ากักกันเล็กน้อยและมีค่าสูงสุดคือตัวที่ 200 μA และ 300 μA ตามลำดับ ในขณะที่กระแสที่วัดแบบที่ 3) นี้ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามโวลเตจของตัวดึงไอออนต่อไป

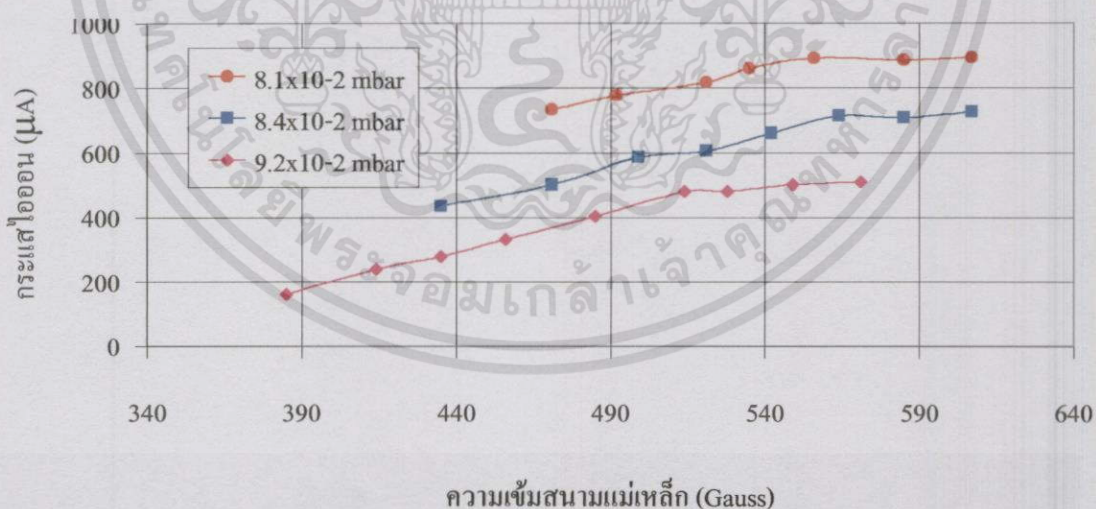
เมื่อพิจารณาจากผลการวัดแสดงว่า กระแสที่วัดได้สูงมากเมื่อจัดการวัดแบบที่ 3) ซึ่งกระแสที่ได้เป็นกระแสจากด้วยฟาราเดย์รวมกับกระแสจากขั้วที่สองของชุดตัวดึงไอออนนั้น กระแสส่วนใหญ่มาจากไอออนที่วิ่งเข้าชนขั้วที่สองของชุดตัวดึงไอออน ทั้งนี้เนื่องจากขั้วไฟฟ้าตัวนี้มีลักษณะเป็นจานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm การที่กระแสที่วัดได้จากทั้งสามกรณีในช่วงที่ใช้โวลเตจของตัวดึงไอออนต่ำๆ มีค่าไม่ต่างกันมากนัก แสดงว่าลำไอออนมีการบานออกไม่มากนัก ถ้าไอออนส่วนใหญ่จึงสามารถผ่านรูของขั้วที่สองของชุดตัวดึงไอออนไปถึงด้วยฟาราเดย์ได้ เมื่อโวลเตจของตัวดึงไอออนมีค่าสูงขึ้นการบานออกของลำไอออนจะมีมากขึ้น ถ้าไอออนส่วนใหญ่จะชนกับขั้วไฟฟ้าที่สองของชุดตัวดึงไอออน ส่วนที่ทะลุผ่านไปยัง

ด้วยฟาราเดย์จึงมีค่าจำกัด กระแสจึงมีลักษณะอิ่มตัวไม่เพิ่มขึ้นตามโวลเตจของตัวคิ่งไอออน ในขณะที่กระแสที่ขั้วไฟฟ้าที่สองของชุดตัวคิ่งไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าไอออนจะมีการบานมากขึ้นตามโวลเตจของตัวคิ่งไอออนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณไอออนมากขึ้นเมื่อเพิ่มโวลเตจให้กับตัวคิ่งไอออน เมื่อถ้าไอออนมีไอออนในปริมาณมากและในระบบนี้จัดว่าเป็นถ้าไอออนที่มีระดับพลังงานต่ำ จึงทำให้เกิดแรงผลักกันระหว่างประจุขณะเคลื่อนที่ เมื่อเกิดแรงผลักกันระหว่างประจุจะส่งผลทำให้ถ้าไอออนนั้นบานออกมากจนส่วนที่บานออกไปนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องของขั้วไฟฟ้าที่สองออกไปได้ จึงเป็นเหตุทำให้เกิดการอิ่มตัวของกระแสไอออนเมื่อมีการเพิ่มโวลเตจให้กับระบบคิ่งไอออนแล้ววัดกระแสไอออนที่ด้วยฟาราเดย์เพียงอย่างเดียว

3) การศึกษาผลของสนามแม่เหล็กต่อกระแสไอออน

การทดลองเพื่อศึกษาผลของสนามแม่เหล็กของ HOCAM ที่มีต่อกระแสไอออน ทำโดยควบคุมให้กระแสคิซาร์จคงที่ 14 mA ด้วยการเพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้นในขณะที่ลดโวลเตจที่ป้อนให้กับระบบ HOCAM ลง จะทำให้กระแสคิซาร์จมีค่าคงที่ได้ ในการทดลองนี้ใช้โวลเตจของตัวคิ่งไอออนคงที่ 140 V (โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลองต้องพิจารณาว่าโวลเตจคิซาร์จไม่ส่งผลต่อถ้าไอออนที่วิ่งเข้าชนด้วยฟาราเดย์)



รูปที่ 5.30 ผลของสนามแม่เหล็กต่อกระแสไอออนที่ค่าความดันต่าง ๆ เมื่อกระแสคิซาร์จมีค่าเป็น 14 mA และป้อนโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 140 V

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไอออนมีค่าสูงขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นและถึงจุดอิ่มตัวในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.30 เนื่องจากเมื่อให้สนามแม่เหล็กสูงขึ้นรัศมีการควงของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบๆ CMC ในแหล่งกำเนิดพลาสมาจะลดลง เป็นผลให้เกิดการแตกตัวของแก๊สเป็นไอออนรอบ ๆ CMC มากกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป ทำให้มีความหนาแน่นของไอออนรอบๆ CMC สูงกว่าเมื่อใช้สนามแม่เหล็กน้อย ๆ เป็นผลให้สามารถดึงไอออนได้ดีขึ้น แต่เมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงถึงระดับหนึ่งแล้ว กระแสไอออนก็จะถึงจุดอิ่มตัว ทั้งนี้เนื่องจากความแรงของสนามไฟฟ้าของตัวดึงไอออนมีค่าคงที่ ถึงแม้ปริมาณไอออนภายในขั้ว CMC จะมีค่ามากขึ้นก็ตาม แต่อัตราการดึงไอออนออกมามีค่าคงที่เนื่องจากโวลเตจของตัวดึงไอออน (HV) มีค่าคงที่

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากัน กระแสไอออนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันภายในแชมเบอร์ของพลาสมามีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากที่เมื่อความดันภายในพลาสมาแชมเบอร์มีค่าสูงจะส่งผลทำให้ความดันภายในระบบการดึงไอออนสูงตามไปด้วย เมื่อความดันภายในระบบการดึงไอออนสูงจะส่งผลทำให้ระยะปลอดकरणเฉลี่ยของไอออนจะมีค่าน้อยลง ทำให้เกิดการชนกันของไอออนกับโมเลกุลของแก๊สหรือระหว่างไอออนด้วยกันเองได้ง่าย เป็นผลให้มีไอออนวิ่งไปยังถ้วยฟาราเดย์น้อยลง



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นสรุปผลการทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาสมบัติและการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออน ซึ่งมีการศึกษาทั้งแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮอโลแคโทดแมกนีตรอนและระบบการดึงไอออนซึ่งทำหน้าที่ดึงไอออนจากแหล่งกำเนิดพลาสมา โดยจะกล่าวถึง ผลการทดสอบแหล่งกำเนิดไอออน ลักษณะของลำไอออนที่ดึงออกมาได้ รวมทั้งปัญหาต่าง ๆ ที่พบขณะทำงานวิจัย

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. แหล่งกำเนิดไอออนที่ออกแบบ สร้างและศึกษาในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮอโลแคโทดแมกนีตรอน (HOCAM) มีโครงสร้างประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20 mm สวมทับขั้วไฟฟ้าตะแกรงทรงกระบอกทำด้วยลวดแคนดัล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6.5 mm ทำหน้าที่เป็นแอโนดและแคโทดตามลำดับ ติดตั้งอยู่ภายในสนามแม่เหล็ก สำหรับระบบดึงไอออนประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีรูตรงกลาง 3 ขั้ว ทำหน้าที่ดึงไอออนบวกออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมา

2. แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กสำหรับแหล่งกำเนิดพลาสมาเป็นชนิดขดลวดโซลินอยด์ สร้างโดยการพันลวดทองแดงเบอร์ 13 รอบแอมแปร์ของพลาสมา 780 รอบ มีความต้านทานรวม 1.82Ω มีระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงสุดมากกว่า 1000 G

3. งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและสร้างระบบสุญญากาศสำหรับแหล่งกำเนิดไอออน ที่สามารถทำความดันได้ต่ำกว่า 3×10^{-7} mbar โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบฟุ้งกระจายมีมีความเร็วปั๊ม 700 l/s ร่วมกับปั๊มโรตารีขนาด $12 \text{ m}^3/\text{hr}$ ระบบมีการติดตั้งชุดควบคุมแก๊สอาร์กอนซึ่งประกอบด้วย วาล์วเปิดปิด วาล์วปรับละเอียดและเครื่องควบคุมการไหลของมวล

4. การศึกษาสมบัติของแหล่งกำเนิดไอออนในงานวิจัยนี้ ได้มีการออกแบบและสร้างระบบการวัด เก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ กระแสดิซชาร์จ โวลเตจดิซชาร์จและกระแสไอออนจะถูกวัดด้วยเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์แล้วส่งผลการวัดผ่านระบบบัสข้อมูล IEEE488 เข้าสู่คอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม HP VEE 5.0 ทำหน้าที่ควบคุมระบบการวัด ทำให้ระบบการวัดมีเสถียรภาพ แม่นยำ สะดวกรวดเร็วและมีความน่าเชื่อถือสูง

5. แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮอโลแคโทดแมกนีตรอนที่ออกแบบและสร้างขึ้น สามารถควบคุมค่ากระแสดิซชาร์จ (อัตราการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊ส) ของแหล่งกำเนิดพลาสมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยควบคุมจากศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ความเข้มสนามแม่เหล็กและความดันภายในแชนเบอ์ของพลาสมา ซึ่งสามารถให้ระดับกระแสดิสชาร์จสูงเพียงพอในระดับที่สามารถดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมาเพื่อมาใช้งานได้ ด้วยระบบการดึงไอออนที่ออกแบบและสร้างขึ้นด้วยโลหะสแตนเลสได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ากระแสไอออนที่ดึงออกมาได้มีค่าสูงสุดถึง 1.5 mA เมื่อแหล่งกำเนิดพลาสมาทำงานที่ระดับความดัน 9.2×10^{-2} mbar ป้อนระดับโวลเตจให้กับระบบ HOCAM 400 V และโวลเตจที่ป้อนให้กับระบบดึงไอออน 270 V โดยที่แหล่งกำเนิดพลาสมาผลิตกระแสดิสชาร์จ 14 mA

6. กระแสไอออนสูงสุด 1.5 mA นี้ได้จากระบบที่ได้รับการปรับปรุงโดยการออกแบบให้ขั้วไฟฟ้าของระบบ HOCAM มีขนาดสั้นลงรวมทั้งออกแบบระบบจับยึดใหม่ ทำให้สามารถลดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของระบบ HOCAM กับระบบดึงไอออนเหลือเพียง 5 mm แทนที่จะเป็น 51.5 mm ก่อนการปรับปรุง ผลของการปรับปรุงระบบนี้ทำให้ได้กระแสไอออนมากกว่าเดิมกว่า 20 เท่า ซึ่งก่อนการปรับปรุงสามารถดึงกระแสไอออนได้ไม่เกิน 10 μ A ในขณะที่ใช้กระแสดิสชาร์จต่ำลง 5 เท่า หมายความว่าระบบที่ได้รับการปรับปรุงนี้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่า 250 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากการปรับระยะระหว่างแหล่งกำเนิดพลาสมากับระบบการดึงไอออนให้ใกล้กันมากขึ้นจะส่งผลทำให้ความหนาแน่นของพลาสมาบริเวณผิวของขั้วพลาสมามากขึ้น ทำให้สามารถดึงไอออนออกไปได้ในปริมาณที่มากขึ้นด้วย

7. จากการศึกษางานของแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮอโลโกลโทดแมกนีตรอนพบว่า ที่สภาวะการทำงานที่มีระดับความดัน สนามแม่เหล็ก และระดับความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบ HOCAM คงที่ พบว่า กระแสดิสชาร์จและโวลเตจดิสชาร์จ (โวลเตจที่ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า CA และ CMC) มีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้ามกัน คือ เมื่อกระแสดิสชาร์จมีค่าสูงขึ้น โวลเตจดิสชาร์จจะมีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดโวลเตจไปตกคร่อมที่ตัวต้านทานจำกัดกระแสมากขึ้น เมื่อกระแสดิสชาร์จมีค่าสูงขึ้น

8. ภายในแหล่งกำเนิดพลาสมา ที่สภาวะการทำงานที่ค่าความดัน สนามแม่เหล็ก และระดับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบคงที่ เมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้นค่ากระแสดิสชาร์จจะมีค่าลดลง เนื่องจากระยะปลดการชนเฉลี่ยมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิของระบบ โดยเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าต่ำ ระยะปลดการชนเฉลี่ยจะมีค่าต่ำด้วย ดังนั้นโอกาสในการชนกันแล้วทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็นไอออนจึงมีมาก ทำให้กระแสดิสชาร์จมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้นระยะปลดการชนเฉลี่ยเริ่มมีค่าสูง โอกาสในการชนกันแล้วทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็นไอออนจึงมีน้อยลง ซึ่งส่งผลให้กระแสดิสชาร์จมีค่าต่ำลง และเมื่ออุณหภูมิของระบบคงที่ ระยะปลดการชนเฉลี่ยก็มีค่าคงที่ด้วย ทำให้กระแสดิสชาร์จมีค่าคงที่ด้วยเช่นกัน

9. เมื่ออุณหภูมิ ความดัน และระดับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ HOCAM คงที่ กระแส

คิซซาร์จของแหล่งกำเนิดพลาสมาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก สนามแม่เหล็กเป็นตัวช่วยให้อิเล็กตรอนวิ่งควงเป็นเกลียวซึ่งเป็นการเพิ่มทางเดินของอิเล็กตรอน ทำให้มีโอกาสนในการชนกันกับอนุภาคมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กสูงขึ้นทำให้มีอัตราการแตกตัวเป็นไอออนบริเวณ โดยรอบขั้วแคโทดมากขึ้นและระยะของเนกาทีฟโกลว์เคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทดมากขึ้น ส่งผลทำให้ความต้านทานของพลาสมาที่มีค่าต่ำลง และเมื่อทำการดึงไอออนด้วยระบบการดึงไอออน ในระบบที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงกว่าก็จะสามารถดึงไอออนออกมาได้ในปริมาณที่มากกว่า

10. เมื่ออุณหภูมิ สนามแม่เหล็ก และระดับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ HOCAM คงที่ ค่าของกระแสคิซซาร์จจากแหล่งกำเนิดพลาสมาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันมีค่าสูงขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากระยะปลดการชนเฉลี่ยมีค่าแปรผกผันกับความดัน ที่ความดันสูงระยะปลดการชนเฉลี่ยจะมีค่าน้อย โอกาสนในการชนกันแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนจะมีมากกว่าที่ความดันต่ำ และเมื่อความดันเพิ่มขึ้นยังส่งผลทำให้ช่วงมีแคโทดและระยะเนกาทีฟโกลว์หดตัวและเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทดมากขึ้น ซึ่งทำให้ความต้านทานของพลาสมาที่มีค่าลดลง (เนื่องจากอนุภาควิ่งข้ามผ่านช่วงมีแคโทดได้ง่ายขึ้น) ถึงแม้ระยะเนกาทีฟโกลว์จะอยู่ใกล้แคโทดมากขึ้น แต่สำหรับกรณีนี้จะไม่ส่งผลต่อการดึงไอออน เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มความดันให้กับแชนเบอร์ของพลาสมา ก็จะส่งผลทำให้ความดันภายในระบบของตัวดึงไอออนเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อความดันภายในระบบการดึงไอออนเพิ่มขึ้นระยะปลดการชนเฉลี่ยของไอออนก็จะลดลง ทำให้ไอออนวิ่งชนกับอนุภาคแก๊สเสียก่อนที่จะวิ่งถึงถ้วยฟาราเดย์ทำให้ปริมาณ ไอออนที่วัดได้มีค่าน้อยลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น

11. จากผลการทดลองพบว่าความต้านทานของพลาสมาที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสคิซซาร์จ เมื่อกระแสคิซซาร์จมีค่าน้อยความต้านทานของพลาสมาจะลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นความต้านทานจะลดลงในอัตราที่ช้ากว่าเมื่อกระแสคิซซาร์จมีค่าเพิ่มขึ้น จนในที่สุดความต้านทานมีค่าเกือบคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากในแต่ละช่วงของกระแสคิซซาร์จมีขบวนการเรืองแสงที่ต่างกัน โดยในช่วงที่กระแสคิซซาร์จมีค่าน้อย จะเป็นช่วงการเรืองแสงแบบต่ำกว่าปกติ ซึ่งเป็นช่วงที่โวลเตจคิซซาร์จมีค่าต่ำลงเมื่อกระแสคิซซาร์จมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานจึงลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะเป็นช่วงการเรืองแสงแบบปกติ ในช่วงนี้โวลเตจคิซซาร์จมีค่าคงที่เมื่อกระแสคิซซาร์จมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานจึงลดลงในอัตราที่ต่ำกว่าในช่วงแรก และในที่สุดจะเข้าสู่ช่วงการเรืองแสงแบบผิดปกติ ซึ่งในช่วงนี้โวลเตจคิซซาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสคิซซาร์จมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความต้านทานของพลาสมาจึงมีค่าเกือบไม่เปลี่ยนแปลง

12. ในขณะที่แหล่งกำเนิดพลาสมาทำงานที่สภาวะคงที่หนึ่ง (ความดัน สนามแม่เหล็ก ระดับโวลเตจที่ป้อนให้กับระบบ HOCAM รวมทั้งกระแสคิซซาร์จคงที่ด้วย) ค่ากระแสไอออนที่ดึงออกมาได้จากระบบการดึงไอออนจะมีค่าขึ้นกับโวลเตจที่ป้อนให้กับระบบดึงไอออนเพียงอย่างเดียว โดยเมื่อระดับโวลเตจที่ป้อนให้กับระบบตัวดึงไอออนมีค่าสูง ค่ากระแสไอออนก็จะมีค่าสูงขึ้น

ตามด้วย แต่จะส่งผลทำให้ลำไอออนมีความบานมากขึ้นด้วย ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ลำไอออนบานนั้น เนื่องจากแรงผลักกันระหว่างประจุในลำไอออน

13. ในขณะที่แหล่งกำเนิดพลาสมามีค่ากระแสดีซาร์จคงที่ ที่ค่าความดันคงที่ค่าหนึ่ง และระดับโวลเตจที่ป้อนให้กับตัวคิงไอออนมีค่าคงที่ ค่ากระแสไอออนที่ดึงออกมาได้จากแหล่งกำเนิดนั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็ก โดยเมื่อสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดพลาสมามีค่าสูงขึ้น กระแสไอออนก็จะมีค่าเพิ่มและถึงจุดอิ่มตัวในที่สุด ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากเมื่อสนามแม่เหล็กในแหล่งกำเนิดพลาสมามีค่าสูงขึ้น อัตราการแตกตัวบริเวณใกล้กับขั้ว CMC จะมีมากขึ้น ทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่แล้วถูกรวบรวมไว้ภายใน CMC ได้ง่ายและเป็นจำนวนมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้สามารถดึงไอออนออกมาได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงถึงระดับหนึ่งแล้ว กระแสไอออนก็จะถึงจุดอิ่มตัว ทั้งนี้เนื่องจากความแรงของสนามไฟฟ้าของตัวคิงไอออนมีค่าคงที่ถึงแม้ปริมาณไอออนภายในขั้ว CMC จะมีค่ามากขึ้นก็ตาม แต่อัตราการดึงไอออนออกมามีค่าคงที่เนื่องจากโวลเตจของตัวคิงไอออน (HV) มีค่าคงที่

6.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

จากการสร้างและศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดซอลโลแค โทดแมกนีตรอนในงานวิจัยนี้พบว่ามีปัญหาบางประการที่ควรได้ระบบการปรับปรุงต่อไป ได้แก่

1. วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าต่าง ๆ ในระบบ สำหรับงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่เลือกใช้สเตนเลส เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาไม่สูงนัก สามารถใช้ได้ในระบบสุญญากาศและสามารถดึงขึ้นรูปได้โดยโรงกลึงที่มีคุณภาพทั่วไป แต่การเลือกใช้สเตนเลสทำให้เกิดปัญหาบางประการ ทั้งนี้เนื่องจากสเตนเลสเป็นวัสดุที่มียึดของการสปัดเตอร์สูง หมายความว่าเมื่อถูกชนด้วยลำไอออนจะถูกสปัดเตอร์ได้ง่าย ผลของการสปัดเตอร์จะทำให้เกิดชั้นบาง ๆ ของโลหะเคลือบตามผิวของระบบจับยึดขั้วไฟฟ้าของระบบ HOCAM และระบบดึงไอออน เป็นผลให้สภาพความเป็นฉนวนของระบบจับยึดเสื่อมสภาพลง จนในที่สุดจะเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ HOCAM ทำให้ระบบที่สร้างขึ้นนี้มีอายุการใช้งานเพียงประมาณ 20 ชั่วโมงใช้งานเท่านั้น ปัญหานี้เป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นในการศึกษาในช่วงต้น ๆ การแก้ปัญหามาโดยการออกแบบและทดสอบระบบจับยึดใหม่หลายแบบ ในที่สุดก็ได้แบบที่เหมาะสม รวมทั้งได้เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดจากสเตนเลสเป็นลวดแคนดัลซึ่งมียึดของการสปัดเตอร์ต่ำกว่า ระบบที่ปรับปรุงใหม่นี้มีอายุการใช้งานประมาณ 80 – 100 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามอายุการใช้งานไม่ได้ถูกกำหนดโดยการลัดวงจรเนื่องจากการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนของระบบจับยึด แต่เป็นสาเหตุจากการสึกกร่อนเนื่องจากการสปัดเตอร์ของขั้วแคโทด ดังนั้นการยืดอายุการใช้งานอาจทำได้โดยการเลือกใช้วัสดุที่มียึดของการสปัดเตอร์ที่ต่ำกว่าลวดแคนดัล เช่น แทนทาลัม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การออกแบบระบบจับยึดขั้วไฟฟ้าใหม่ ถึงแม้จะสามารถแก้ปัญหาการลัดวงจรได้ดี แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งระบบ HOCAM เพื่อให้ทำงานได้ดีโดยใช้ระบบจับยึดนี้ยังคงต้องใช้เวลามากและต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญพอสมควร ในการติดตั้งระบบใหม่แต่ละครั้งต้องใช้เวลาราว 1 วัน เนื่องจากจะต้องทำการจัดวางขั้วไฟฟ้าทั้งสองให้อยู่ในแนวกึ่งกลางแชนเบอร์ของพลาสติกในแนวแกนรัศมี และขั้วแคโทดต้องทำการจัดให้อยู่ในแนวกึ่งกลางของขั้วแอโนดด้วยเช่นกัน โดยการจัดวางตำแหน่งดังกล่าวจะเกิดขึ้นหลังจากการประกอบชุดแหล่งกำเนิดพลาสติกเข้ากับแชนเบอร์ของพลาสติก ซึ่งแชนเบอร์ของพลาสติกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 52.5 mm ซึ่งถือว่ามีความเล็กพอสมควรเมื่อเทียบกับขนาดของมือ จึงควรมีการปรับปรุงระบบจับยึดรวมทั้งแชนเบอร์ของพลาสติกให้สามารถถอดและติดตั้งได้สะดวก รวมทั้งการจัดตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าทั้งสองให้สมมาตรกันได้จากภายนอกแชนเบอร์ของพลาสติก

3. ระบบสุญญากาศของแหล่งกำเนิดไอออนที่ดีจะต้องสามารถรักษาระดับความดันของระบบดึงไอออนให้ต่ำ เพื่อลดปัญหาการสปาร์กระหว่างขั้วไฟฟ้าของระบบดึงไอออนที่อยู่ใกล้กัน และต้องมีการป้องกันสปาร์ไฟฟ้าสูง (ในกรณีที่ต้องการศึกษาในอนาคต) ตลอดจนช่วยลดการชนกันระหว่างลำไอออนกับอะตอมของแก๊สที่คงหลงเหลือในระบบซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียของไอออนไป การควบคุมความดันที่ส่วนนี้สามารถทำได้โดยการต่อระบบปั๊มสุญญากาศเข้ากับส่วนที่ติดตั้งระบบดึงไอออน ในการออกแบบแหล่งกำเนิดไอออนสำหรับงานวิจัยนี้ไม่ได้คำนึงถึงส่วนนี้ เนื่องจากต้องใช้งบประมาณอีกมาก

4. แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กของระบบ HOCAM ที่สร้างขึ้น ถึงแม้จะใช้งานได้ดีสำหรับการศึกษานี้ เนื่องจากมีการใช้งานที่ไม่เกิน 600 G และถ้าจะใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงกว่านี้ จะต้องจำกัดเวลาการใช้งาน เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของขดลวดแม่เหล็กสูงเกินไป เนื่องจากในการศึกษานี้ใช้ระบบน้ำที่อุณหภูมิปกติ (น้ำประปา) ระบายความร้อน ดังนั้นข้อจำกัดนี้สามารถแก้ไขได้โดยการลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นลง โดยต่อระบบระบายความร้อนเข้ากับเครื่องทำน้ำเย็น

5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ใช้ในการศึกษาระบบดึงไอออนสำหรับงานวิจัยนี้มีกำลังเพียง 25 W (5000 V , 5 mA) ซึ่งถือว่าค่อนข้างน้อย จึงเกิดปัญหาการลัดวงจรของแหล่งจ่ายไฟนี้เสมอ (เนื่องจากมีจ่ายกระแสเกินขีดจำกัด) ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการศึกษาในส่วนนี้ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ใช้ในการศึกษาระบบดึงไอออนควรเลือกชนิดที่จ่ายกระแสได้ระหว่าง 10 – 20 mA จึงจะเหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มระดับปริมาณไอออนที่ดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสติกได้มากขึ้นได้ เมื่อทำการป้อนโวลเตจให้กับระบบดึงไอออนและใช้กระแสดีสชาร์จได้มากขึ้นได้โดยไม่เกิดปัญหาการลัดวงจรขึ้นกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

6. ด้วยฟาราเดย์ที่ใช้ในการวัดค่ากระแสไอออนสำหรับงานวิจัยนี้ ยังไม่สามารถวัดค่ากระแสของลำไอออนออกมาได้จริง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำด้วยฟาราเดย์นั้นเป็นโลหะ ดังนั้นเมื่อมี

ไอออนที่มีพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจะทำให้เกิดอิเล็กทริคิตีวูมิขึ้น วิ่งสวนทางออกมาทำให้ค่าที่วัดได้เกินความเป็นจริง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใส่ขั้วไฟฟ้ากักกัน (suppressor) ไว้หน้าด้วยฟาราเดย์ และทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่าด้วยฟาราเดย์ ขั้วไฟฟ้ากักกันนี้จะต้องมีฉนวนปิดไว้บริเวณผิวหน้าของขั้ว เพื่อป้องกันไม่ให้ไอออนวิ่งเข้าชนกับขั้วไฟฟ้ากักกัน

7. จากการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่า ถ้าไอออนที่ดึงออกมาได้ด้วยระบบการดึงเพียงอย่างเดียวนี้ยังมีความบานอยู่มาก การลดความบานของลำไอออนนั้นควรจะมีใส่ระบบการโฟกัสลำไอออนไว้ด้วย ซึ่งจะช่วยให้ลำไอออนมีขนาดเล็กลงได้

8. นอกจากนี้ยังควรทำการศึกษากล้องหรือความบานของลำไอออนที่ดึงออกมาได้ด้วยระบบการดึงที่ทำการสร้างขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้มอนิเตอร์รูปร่างของลำไอออน (beam profile monitor) หรืออาจทำได้โดยการใช้ฉากซึ่งมีขนาดรูเล็กกว่าลำไอออนวางไว้บริเวณด้านหน้าของด้วยฟาราเดย์ แล้วทำการเลื่อนฉากพร้อมกับด้วยฟาราเดย์ขึ้นลงตามแนวแกน y แล้วทำการวัดค่ากระแสที่ได้ในแต่ละตำแหน่ง โดยค่าของกระแสที่ได้จากตำแหน่งกึ่งกลางของลำไอออนจะมีค่าสูงสุดแล้ว จะมีค่าลดลง เมื่อทำการเลื่อนฉากและด้วยฟาราเดย์ห่างจากตำแหน่งกึ่งกลางมากขึ้นเรื่อย ๆ แล้วทำการหาขนาดของลำไอออนจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับระยะทางที่ทำการเลื่อนฉาก หลังจากนั้นทำการเลื่อนฉากและด้วยฟาราเดย์ออกไปให้ห่างจากแหล่งกำเนิดไอออนมากขึ้น (ตามแนวแกน x) แล้วทำการวัดค่ากระแสไอออนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกน y เช่นเดิม ทำอย่างนี้สัก 3 ตำแหน่งเป็นอย่างน้อย แล้วนำค่าที่ได้มาทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของฉากและขนาดของลำไอออน ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าการลู่ออกหรือความบานของลำไอออนได้จากกราฟความสัมพันธ์นี้ หรืออีกวิธีหนึ่งสำหรับใช้ในการวัดขนาดความบานของลำไอออนทำได้โดยการใช้ฉากเรืองแสงวางห่างจากแหล่งกำเนิดไอออนที่ตำแหน่งต่าง ๆ แล้วทำการวัดขนาดของลำไอออน แล้วนำค่าที่ได้มาทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของลำไอออนกับระยะของฉากเรืองแสง ซึ่งก็จะสามารถคำนวณหาความบานของลำไอออนได้เช่นกัน

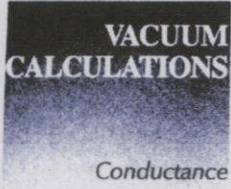
เอกสารอ้างอิง

- [1] Brown Ian G. **The Physics and Technology of Ion Source.** New York : John Wiley & Sons, Inc. 1989.
- [2] Miljevic' V. "Hollow-cathode magnetron ion source." Rev. Sci. Instrum., Vol. 55, no. 1, January 1984. pp.121-123.
- [3] Nasser E. **Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics.** the United States of America : John Wiley & Sons, Inc. 1971.
- [4] Conrads H. and Schmidt M. "Plasma Generation and Plasma Sources" Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 9, 2000. pp. 441-454.
- [5] Von Engel A. **Ionized Gases.** The United States of America : AIP Press. 1994.
- [6] plasma, <http://www.unm.edu/~sgold/plasma.html>
- [7] Bernhard Wolf, Editor. **Handbook of Ion Sources.** London : CRC Press, Inc. 1995.
- [8] Smirnov B.M. **Introduction to Plasma Physics.** Moscow : Mir Publisher. 1977.
- [9] Terrence E. Sheridan, JR. and John A. Goree. "Analytic Expression For the Electric Potential in the Plasma Sheath." IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 17, no. 6, December 1989. pp.884-888.
- [10] Shiang-Bau Wang and Wendt Amy E. "Sheath Thickness Evaluation for Collisionless or Weakly Collisional Bounded Plasmas" IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 27, no. 5, October 1999. pp.1358-1365.
- [11] Goyak V.A. and Sternberg N. "Smooth Plasma-Sheath Transition in a Hydronamic model." IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 18, February 1990. pp.159-168.
- [12] Gandhi Om P. **Microwave Engineering and Applications.** New York : Pregamon Press Inc. 1989.
- [13] Kiyoshi Kuwahara and Hiroshi Fujiyama. "Application of the Child-Langmuir Law to Magnetron Discharge Plasma" IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 22, no. 4, August 1994. pp.442-448.
- [14] Space Charge Neutralization, <http://www.casetechology.com/implanter/neutral.html>
- [15] Lafferty James M., Editor. **Foundations of Vacuum Science and Technology.** New York: John Wiley & Sons, Inc. 1998.

- [16] Santeler Donald J. "New Concepts in Molecular Gas Flow" J. Vac. Sci. Technol. A, Vol 4, no. 3, May 1986.
- [17] Kroon D.J. **Laboratory Magnet**. London : Cleaver-Hume Press Ltd. 1968
- [18] Lide D.R. and Kehiaian H.V. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. Boca Raton : CRC Press. 1994.
- [19] AWG American Wire Gauge wire resistance per unit length/diameter, <http://www.bnoack.com/data/wire-resit>
- [20] Davis J.R. **Stainless Steels : prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee**. Materials Park OH : ASM International Press. 1994
- [21] Kiyotaka Wasa and Shigeru Hayakawa. **Handbook of Sputter Deposition Technology : principle , technology and applications**. The United States of America : Noyes Publications. 1992.
- [22] Uhm Han S. "Influence of Vacuum Space on Formation of Potential Sheath in Plasma" Physics Letter A, Vol. 234, September 1997.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1 ค่าความนำของท่อ

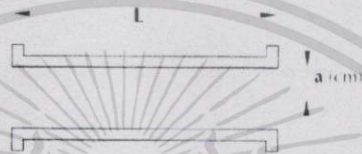


CONDUCTANCE CALCULATIONS

The table shown here allows us to easily calculate the conductances of circular tube ports from their measured dimensions. The equation

derived by Dushman to calculate these values has errors up to 12% for systems in free molecular flow (see *J. Vac. Sci. Tech.*, Vol. 4, No. 3, page 338). Typically, however, this is insignificant when calculating effective pumping speeds, base pressure, gas load, etc.

Conductance



CONDUCTANCE VALUES

a (cm)	F ₀	F ₀ Conductance of tube (liters sec ⁻¹) for air at 25°C						
		L/a = 1	2	4	8	12	16	30
		K = 0.672	0.514	0.359	0.232	0.172	0.137	0.080
0.1	0.367	0.246	0.188	0.132	0.085	0.063	0.050	0.029
0.2	1.466	0.986	0.753	0.527	0.340	0.252	0.200	0.117
0.3	3.300	2.217	1.664	1.184	0.764	0.567	0.451	0.263
0.4	5.866	3.913	3.013	2.106	1.358	1.008	0.802	0.468
0.5	9.166	6.160	4.708	3.291	2.122	1.575	1.253	0.731
0.6	13.200	8.872	6.779	4.739	3.057	2.269	1.805	1.052
0.7	17.970	12.080	9.228	6.449	4.161	3.088	2.457	1.432
0.8	23.470	15.770	12.050	8.424	5.436	4.033	3.208	1.871
0.9	29.700	19.960	15.250	10.660	6.879	5.105	4.061	2.368
1.0	36.660	24.640	18.830	13.160	8.492	6.302	5.013	2.922
2.0	146.600	98.860	75.340	52.650	33.970	25.240	20.050	11.690
3.0	330.000	221.700	166.400	118.400	76.420	56.710	45.110	26.300
4.0	586.600	391.300	301.300	210.600	135.800	100.800	80.210	46.770
5.0	916.600	616.000	470.800	329.100	212.200	157.500	125.300	73.100
6.0	1320.000	887.200	677.900	473.900	305.700	226.900	180.500	105.200
7.0	1797.000	1208.000	922.800	644.900	416.100	308.800	245.700	143.200
8.0	2347.000	1577.000	1205.000	842.400	543.600	403.300	320.800	187.100
9.0	2970.000	1996.000	1525.000	1066.000	687.900	510.500	406.100	236.800
10.0	3666.000	2464.000	1883.000	1316.000	849.200	630.200	501.300	292.200

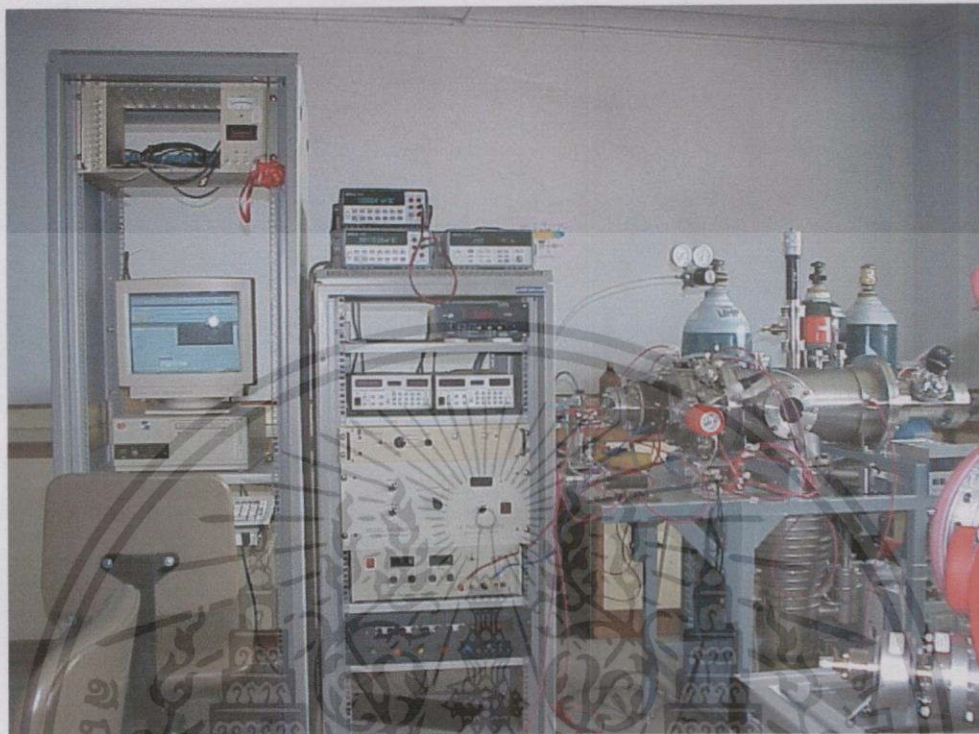
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก2 ตารางแสดงค่าขีดเคี้ยวของการสปีดเตอร์

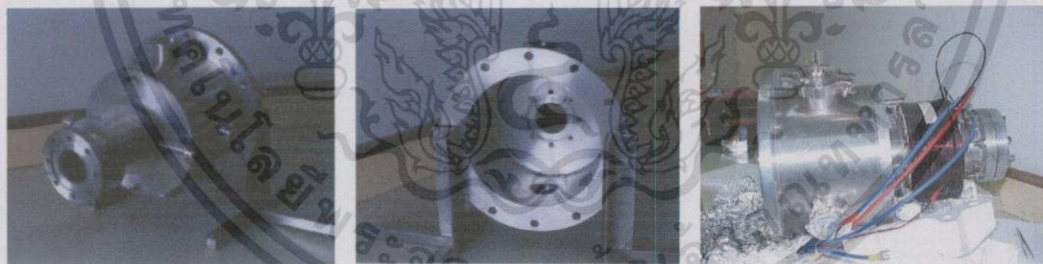
Target	Ne ⁺ (eV)				Ar ⁺ (eV)			
	100	200	300	600	100	200	300	600
Be	0.012	0.01	0.26	0.56	0.074	0.18	0.29	0.80
Al	0.031	0.24	0.43	0.83	0.11	0.35	0.65	1.24
Si	0.034	0.13	0.25	0.54	0.07	0.18	0.31	0.53
Ti	0.08	0.22	0.30	0.45	0.081	0.22	0.33	0.58
V	0.06	0.17	0.36	0.55	0.11	0.31	0.41	0.70
Cr	0.18	0.49	0.73	1.05	0.30	0.67	0.87	1.30
Fe	0.18	0.38	0.62	0.97	0.20	0.53	0.76	1.26
Co	0.08	0.41	0.64	0.99	0.15	0.57	0.81	1.36
Ni	0.22	0.46	0.65	1.34	0.28	0.66	0.95	1.52
Cu	0.26	0.84	1.20	2.00	0.48	1.10	1.59	2.30
Ge	0.12	0.32	0.48	0.82	0.22	0.50	0.74	1.22
Zr	0.05	0.17	0.27	0.42	0.12	0.28	0.41	0.75
Nb	0.05	0.16	0.23	0.42	0.068	0.25	0.40	0.65
Mo	0.10	0.24	0.34	0.54	0.13	0.40	0.58	0.93
Ru	0.08	0.26	0.38	0.67	0.14	0.41	0.68	1.30
Rh	0.08	0.36	0.52	0.77	0.19	0.55	0.86	1.46
Pd	0.14	0.59	0.82	1.32	0.42	1.00	1.44	2.39
Ag	0.27	1.00	1.30	1.98	0.63	1.58	2.20	3.40
Hf	0.06	0.15	0.22	0.39	0.16	0.35	0.48	0.83
Ta	0.06	0.13	0.18	0.30	0.10	0.28	0.41	0.62
W	0.038	0.13	0.18	0.32	0.068	0.29	0.40	0.62
Re	0.04	0.15	0.24	0.42	0.10	0.37	0.56	0.91
Os	0.032	0.16	0.24	0.41	0.057	0.36	0.56	0.95
Ir	0.069	0.21	0.30	0.46	0.12	0.43	0.70	1.17
Pt	0.12	0.31	0.44	0.70	0.20	0.63	0.95	1.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



รูปที่ ข1 ส่วนต่าง ๆ ของระบบทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยระบบหลัก ๆ คือ ระบบการวัด แชนเบอร์ของพลาสมา และ ระบบสุญญากาศ



(ก)

(ข)

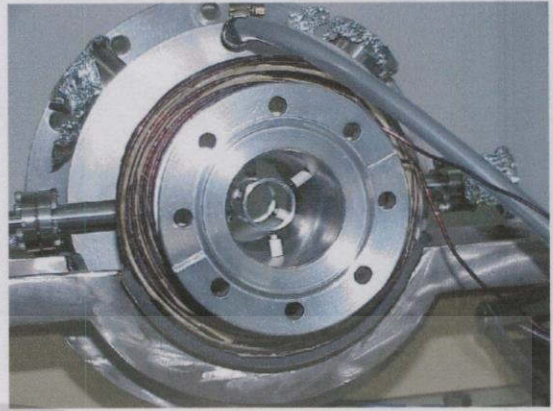
(ค)

รูปที่ ข2 แชนเบอร์ของพลาสมา

- (ก) ด้านหน้าซึ่งจะทำการติดแหล่งกำเนิดพลาสมา
- (ข) ด้านหลังซึ่งติดกับแชนเบอร์ของระบบสุญญากาศ และเป็นด้านที่จะติดตั้งระบบการดึงไอออน
- (ค) แชนเบอร์ของพลาสมาที่ได้ทำการพันขดลวดแม่เหล็กแล้ว



(ก)



(ข)

รูปที่ ข3 (ก) ชุดจับยึดเซรามิก

(ข) แชมเบอร์ของพลาสมาที่ทำการติดตั้งชุดจับยึดเซรามิก



(ก)



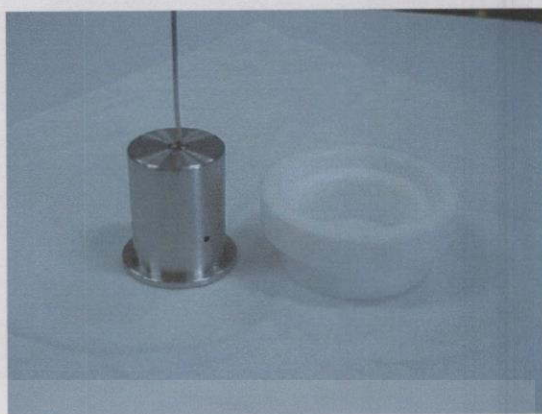
(ข)

รูปที่ ข4 (ก) แหล่งกำเนิดพลาสมาที่พร้อมจะทำการติดตั้งเข้ากับแชมเบอร์ของพลาสมา

(ข) การติดตั้งแหล่งกำเนิดพลาสมาเข้ากับแชมเบอร์ของพลาสมา



(ก)



(ข)

รูปที่ ข5 (ก) ขั้วไฟฟ้าของระบบการคั่งไอออนพร้อมชุดจับยึดซึ่งทำมาจากเทฟลอน ที่ใช้กับแหล่งกำเนิดพลาสติกที่มีความยาวของขั้วแอโนด 128 mm โดยขั้วพลาสติกอยู่ทางด้านขวามือ ขั้วที่ 1 อยู่ตรงกลาง และ ขั้วที่ 3 วางอยู่ทางด้านซ้ายมือของรูป

(ข) ถ้วยฟาราเดย์พร้อมชุดจับยึดเทฟลอนที่ใช้กับระบบการคั่งไอออนในรูป ข5 (ก)



(ก)

(ข)

รูปที่ ข6 (ก) ขั้วไฟฟ้าของระบบการคั่งไอออนและถ้วยฟาราเดย์ที่ประกอบเข้าด้วยกัน

(ข) การติดตั้งชุดระบบการคั่งไอออนและถ้วยฟาราเดย์เข้ากับแอมเบอร์ของพลาสติก



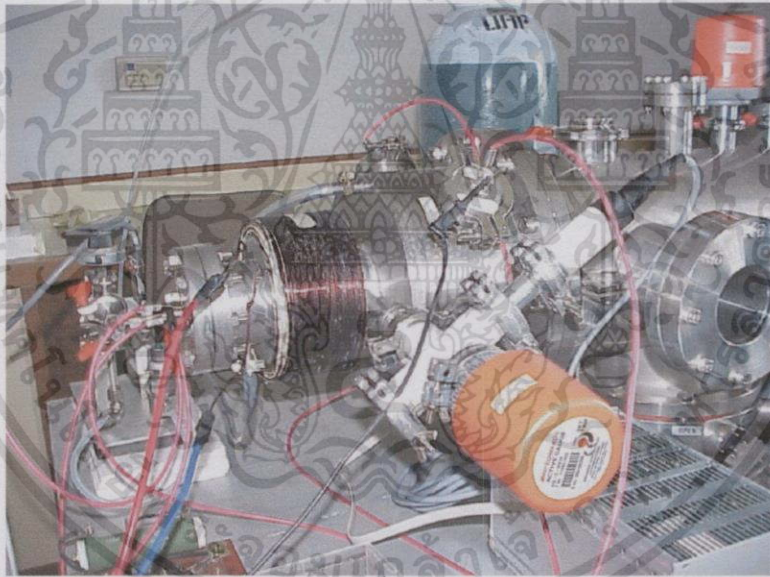
(ก)



(ข)

รูปที่ ข7 (ก) ชุดขั้วไฟฟ้าของระบบการดึงไอออนที่ใช้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาที่มีความยาวของขั้วแอโนด 65 mm

(ข) รูปทางด้านขวา ถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้กับระบบการดึงไอออนดังรูปที่ ข5 (ก)
รูปทางด้านซ้าย ถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้กับระบบการดึงไอออนดังรูปที่ ข7 (ก)



รูปที่ ข8 แคมเบอร์ของพลาสมาที่ได้รับการติดตั้งเข้ากับระบบสุญญากาศ

ประวัติผู้เขียน

นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี เกิดเมื่อวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังปีการศึกษา 2539 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้