

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ
และระบบโฟกัสลำไอออน

STUDY OF MICROWAVE ION SOURCE AND
ION BEAM FOCUSING SYSTEM



อมร เทศสกุลวงศ์
AMORN THEDSA KHULWONG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 65465
วัน,เดือน,ปี 11 ต.ค. 2549

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ISBN 974-15-2731-4
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF MICROWAVE ION SOURCE AND
ION BEAM FOCUSING SYSTEM**

AMORN THEDSAKHULWONG



**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**

2006

ISBN 974-15-2731-4
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแหล่งกำเนิด ไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ และระบบโพกัสต์ลำไอออน
นักศึกษา	นายอมร เทศสกุลวงศ์
รหัสประจำตัว	46063503
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟและระบบโพกัสต์ลำไอออน แหล่งกำเนิดไอออนที่ทำการศึกษานี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟและส่วนที่ทำหน้าที่ดึงลำไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมา แหล่งกำเนิดพลาสมาประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ แล้วส่งไปยังห้องพลาสมาผ่านทางท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมในโหมด TE₁₀₆ โดยห้องพลาสมาซึ่งเป็นที่เกิดพลาสมาอิสระประกอบด้วยหลอดแก้วควอร์ตที่มีแก๊สอาร์กอนความดันต่ำไหลผ่าน ส่วนระบบดึงลำไอออนประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วคือพลาสมาอิเล็กโทรดวางตัวสัมผัสกับพลาสมาและแผ่นอิเล็กโทรดตัวดึง ซึ่งไอออนจะถูกดึงออกมาจากพลาสมาด้วยสนามไฟฟ้าเมื่อมีการป้อนความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง สำหรับระบบโพกัสต์ไอออนจะใช้เลนส์ไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลมเจาะรูตรงกลางด้วยขนาดที่แตกต่างกัน 4 ขั้วจำนวน 2 ชุด ซึ่งระยะและขนาดของจุดโฟกัสสามารถปรับได้โดยการปรับศักย์ไฟฟ้าของชุดเลนส์แต่ละชุด ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ขั้วพลาสมาอิเล็กโทรดที่มีรูขนาด 600 ไมโครเมตร จะได้ลำไอออนบวกของอาร์กอนที่มีระดับพลังงาน 3.20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ มีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 738 ไมโครเมตร ที่ระยะ 25 มิลลิเมตรห่างจากขั้วอิเล็กโทรดตัวดึง มีความหนาแน่นกระแส 5.61 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมุมบานของลำไอออนเท่ากับ 0.38 องศา และระบบโพกัสต์ไอออนสามารถทำการโพกัสต์ลำไอออนบวกของอาร์กอนจากแหล่งกำเนิดไอออน ให้ได้ลำไอออนที่มีลักษณะกลมขนาด 250 ไมโครเมตร ที่ระยะ 10 มิลลิเมตรห่างจากชุดเลนส์

Thesis Title	Study of Microwave Ion Source and Ion Beam Focusing System
Student	Mr.Amorn Thedsakhulwong
Student ID.	46063503
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2006
Thesis Advisor	Assistant. Prof. Dr. Warawoot Thowladda

ABSTRACT

This thesis proposes the study of microwave induced ion source and ion beam focusing system. The ion source has two important parts: plasma source, based on microwave induced argon gas discharge, and ion beam formation system. A microwave discharge was produced in a 10 mm diameter cylindrical quartz tube which placed along the transversely axis of rectangular cavity resonator which was resonant at frequency 2.45 GHz in TE₁₀₆ mode. The ion beam formation system is conventionally called the ion extractor. The extractor system consisted of two perforated disc electrodes : plasma and extraction electrode. The focusing system consisted of two unipolar electrostatic lens. Each electrostatic lens comprised four disc electrodes with apertures of difference diameter at the center. The focal length and the beam spot size can be controlled by adjustable applied high voltage. The argon ion beam energy of 3.20 keV could be extracted from the developed ion source by extraction system with plasma electrode of 600 μm diameter. Beam current density and beam divergence were 5.61 mA/cm² and 0.38 degree respectively. Beam width at distance of 25 mm from extraction electrode was 738 μm and could be focused to 250 μm at distance of 10 mm from the focusing system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก ผศ. ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และหาแหล่งทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อ.ศ. ทิพยวรรณ คล้ายบุญมี ช่วยแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และเสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ ผู้มีส่วนร่วมในงานวิจัยครั้งนี้ทุกๆ ท่าน

สุดท้ายข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดและอบรมสั่งสอน แนะนำแนวทางการดำเนินชีวิต ให้สามารถมีชีวิตที่ดีขึ้น รวมทั้งเป็นแรงใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมี จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อมร เทสสกุลวงศ์

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.....	4
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ฟิสิกส์ของพลาสมา.....	7
2.1 ขบวนการในการสร้างพลาสมา.....	7
2.1.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน.....	6
2.1.2 การแตกตัวเป็นไอออนโดยโฟตอน.....	9
2.2 สมบัติของพลาสมา.....	10
2.2.1 ระดับการแตกตัวเป็นไอออน.....	12
2.2.2 อุณหภูมิของพลาสมา.....	13
2.2.3 พลาสมาซีท.....	14
2.2.4 ความถี่ของพลาสมา.....	18
2.3 ไมโครเวฟพลาสมา.....	20
2.3.1 อัตรากิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับอนุภาคที่มีประจุ.....	20
2.3.2 การได้รับพลังงานและการถ่ายเทกำลังในการเกิดดิสชาร์จ.....	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 หลักการและทฤษฎี.....	27
3.1 การคั่งไอออน.....	27
3.1.1 หลักการพื้นฐานของตัวคั่ง ไอออน.....	27
3.1.2 ปัจจัยของตัวคั่ง ไอออนที่ส่งผลต่อตัวคั่ง ไอออน.....	28
3.2 ระบบโฟกัสลำไอออน.....	32
3.2.1 สมบัติของเลนส์.....	32
3.2.2 เลนส์ไฟฟ้า.....	35
3.4 การวัดกระแสไอออน.....	38
บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	42
4.1 ระบบสุญญากาศ.....	42
4.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ.....	42
4.1.2 แคมเบอร์สุญญากาศ.....	44
4.2 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดไอออน.....	46
4.2.1 แหล่งกำเนิดพลาสมา.....	46
4.2.2 ระบบจ่ายแก๊ส.....	46
4.2.3 ระบบคั่ง ไอออน.....	47
4.3 ระบบโฟกัสลำไอออน.....	48
4.4 ระบบวัดขนาดลำไอออน.....	50
4.4.1 ถ้วยฟาราเดย์.....	50
4.4.2 การวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็ม.....	50
4.4.3 การวัดขนาดของลำไอออนด้วยวิธีขอบมืด.....	51
4.5 ระบบการเก็บข้อมูล.....	53
บทที่ 5 ผลการศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนและระบบโฟกัส.....	54
5.1 การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออน.....	55
5.1.1 เสถียรภาพของแหล่งกำเนิดไอออน.....	55
5.1.2 ขนาดและมุมบานของลำไอออน.....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.3 การกระจายพลังงานของลำไอออน.....	59
5.1.4 การปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออน.....	62
5.2 การศึกษาระบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดียว.....	66
5.2.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดเลนส์.....	68
5.2.2 ผลของระดับพลังงานของลำไอออน.....	75
5.2.3 ผลของระยะห่างระหว่างชุดเลนส์กับแผ่นอิเล็กโทรวด์.....	76
5.2.4 การใช้ลำไอออนเจาะแผ่นออลูมิเนียมฟอยล์.....	79
5.2.5 การปรับปรุงระบบโฟกัสแบบเลนส์เดียว.....	83
5.3 การศึกษาระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุด.....	86
5.3.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรก.....	89
5.3.2 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง.....	92
5.3.3 การใช้ลำไอออนเจาะแผ่นออลูมิเนียมฟอยล์.....	99
5.3.4 การปรับปรุงระบบโฟกัสลำไอออน.....	102
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	110
6.1 สรุปผลการศึกษาแหล่งกำเนิดไอออน.....	110
6.2 สรุปผลการศึกษาะบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดียว.....	111
6.3 สรุปผลการศึกษาะบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุด.....	113
6.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	115
เอกสารอ้างอิง.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 การกระจายพลังงานของลำไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่น ไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน ต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน.....	61
5.2 ผลการวัดขนาดของลำไอออนที่ผ่านระบบโฟกัสด้วยวิธีขอมิต ในแนวแกน x และ แนวแกน y เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และศักย์ไฟฟ้า V_{L2} มีค่าเท่ากับ 1.30 กิโลโวลต์.....	98



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดไอออนมิได้ทำการพัฒนาขึ้นโดยอัสมีสเซนและรูท.....	2
1.2 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดไอออนมิได้ทำการพัฒนาขึ้นโดย Leung และทีมงาน.....	2
2.1 การชนของอิเล็กตรอนและอะตอม.....	9
2.2 บริเวณพลาสมาซีท.....	15
2.3 ใคอะแกรมของพลาสมาซีท.....	18
2.4 การเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามความถี่สูงเนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่นกับอนุภาคหนัก และเกิดการถ่ายเทพลังงานอย่างรวดเร็วขณะเกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเมื่อมีพลังงานถึงค่าพลังงานขีดเริ่ม eV_1	26
3.1 ระบบการดึงไอออน.....	28
3.2 ลักษณะลำไอออนที่ดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา.....	29
3.3 ลักษณะการบานของลำไอออนกระแสสูงพลังงานต่ำ.....	30
3.4 ลักษณะลำไอออนที่มีการลดแรงผลัดกันระหว่างประจุด้วยอิเล็กตรอน.....	30
3.5 ตัวอย่างระบบดึงแบบเร่ง-หน่วง และเส้นสมมติของระบบเมื่ออยู่ในระบบสุญญากาศ.....	31
3.6 ลักษณะของเลนส์ไฟฟ้า.....	32
3.7 เลนส์ไฟฟ้าที่มีความยาวโฟกัสเป็นลบ.....	33
3.8 การเกิดภาพของเลนส์หนา.....	34
3.9 เลนส์ไฟฟ้าอย่างง่าย.....	35
3.10 ชนิดของเลนส์ไอเซล.....	36
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า L/f_c กับ V_2/V_1	37
3.12 ผลของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ากักกันที่มีต่อค่ากระแสที่วัดได้.....	40
3.13 โครงสร้างของถ้วยฟาราเดย์ แบบไม่มีระบบหล่อเย็น.....	41
4.1 โครงสร้างระบบสุญญากาศ.....	45
4.2 ลักษณะของโพรงกำทอนและตำแหน่งการติดตั้งแมกนีตรอนตัวสดับปรับจูนและหลอดแก้วควอร์ต.....	46
4.3 ระบบจ่ายแก๊ส.....	47
4.4 ระบบดึงไอออน.....	47
4.5 การต่อวงจรไฟฟ้าในระบบดึงลำไอออน.....	48
4.6 ขนาดและรูปร่างของเลนส์แต่ละชั้นในระบบโฟกัส.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การต่อวงจรไฟฟ้าในระบบโฟกัส.....	49
4.8 รูปร่างของถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้วัดกระแสไอออน.....	50
4.9 ถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้สำหรับวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีกวาดรูเข็ม.....	51
4.10 ลักษณะการวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีกวาดรูเข็ม.....	51
4.11 ถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้สำหรับการวัดขนาดของลำไอออนด้วยวิธีขอมมีด.....	51
4.12 ลักษณะการวัดขนาดลำไอออนด้วยวิธีขอมมีด	52
4.13 ส่วนควบคุมการเลื่อนตำแหน่งถ้วยฟาราเดย์.....	53
4.14 ส่วนการเก็บข้อมูลกระแสลำไอออน.....	53
5.1 ระบบโฟกัสลำไอออนที่ใช้สำหรับการศึกษา.....	54
5.2 เสถียรภาพของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	56
5.3 ขนาดและรูปร่างของลำไอออนที่ใช้สำหรับการศึกษาระบบโฟกัส.....	57
5.4 ขนาดและรูปร่างของลำไอออนที่มีพลังงาน 1700 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อถ้วยฟาราเดย์อยู่ ห่างจากหัวอิเล็กโทรมิตติ้งเป็นระยะ 9, 14, 19 และ 24 ตามลำดับ.....	58
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของลำไอออนและค่ากระแสสูงสุดของลำไอออน กับ ตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์	58
5.6 การต่อวงจรไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด ไอออน และถ้วยฟาราเดย์สำหรับการวัดการกระจาย พลังงานของลำไอออน.....	59
5.7 ตัวอย่างการวัดการกระจายพลังงานของลำไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	60
5.8 โครงสร้างของแหล่งกำเนิด ไอออนที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาใหม่.....	63
5.9 การต่อวงจรไฟฟ้าให้กับแหล่งกำเนิดไอออนและระบบวัด.....	64
5.10 ผลของความดันภายในแชนเบอรัลหลักที่มีต่อขนาดและมุมบานของลำ ไอออน เมื่อกำลัง ของแมกนีตรอนมีค่าเท่ากับ 25 วัตต์ และใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการดึง 3.20 กิโลโวลต์.....	65
5.11 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการดึงที่มีต่อขนาดและมุมบานของลำไอออนเมื่อกำลังของแมกนี ตรอนมีค่าเท่ากับ 25 วัตต์ และความดันภายในแชนเบอรัลหลักมีค่า 7.0×10^{-6} มิลลิบาร์.....	65
5.12 ขนาดและรูปร่างของลำไอออนจากแหล่งกำเนิดที่ได้รับการปรับปรุงขึ้นมาใหม่.....	66
5.13 ขนาด รูปร่าง และระยะห่างของเลนส์ไฟฟ้าเมื่อประกอบเป็นระบบโฟกัสแบบเลนส์ ชุดเดียว.....	67

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 ชุดเลนส์และการต่อขั้วไฟฟ้าของระบบที่ใช้ในการศึกษา.....	68
5.15 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลนส์ที่มีต่อขนาดของลำไอออน เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.90 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และวัดที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 10 มิลลิเมตร.....	69
5.16 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ เมื่อตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยที่ $V_{\text{lens-1}} < V_{\text{lens-2}} < V_{\text{lens-3}}$	70
5.17 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ที่มีต่อขนาดและตำแหน่งของจุดโฟกัส เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.70 อิเล็กตรอนโวลต์ และ V_{lens} มีค่า 1.55, 1.60, 1.65 และ 1.70 กิโลโวลต์ โดยทำการเลื่อนตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ ตั้งแต่ระยะ 10-35 มิลลิเมตร.....	72
5.18 การวัดขนาดของลำไอออนที่ระยะของถ้วยฟาราเดย์แตกต่างกันเมื่อลำไอออนมีพลังงานคงที่.....	73
5.19 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ที่ทำให้ลำไอออนที่มีลักษณะเป็นลำขนาน เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และมี $V_{\text{lens}} = 1.40$ กิโลโวลต์ ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับรูปที่ 5.17.....	74
5.20 ผลของระดับพลังงานลำไอออนที่มีต่อระบบโฟกัส.....	76
5.21 การเปรียบเทียบขนาดของลำไอออนเมื่อปรับเปลี่ยนระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้ง ที่ตำแหน่งการวัดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และลำไอออนมีระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์.....	78
5.22 ตำแหน่งการติดตั้งแผ่นอคูมิเนียมฟอยด์ และการต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการเจาะรูด้วยลำไอออน.....	79
5.23 การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ถ้วยฟาราเดย์เทียบกับเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออนในการทดลองเจาะรูบนแผ่นอคูมิเนียมฟอยด์หนา 20 ไมโครเมตร เมื่อใช้ลำไอออนที่มีระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ขนาด 180 ไมโครเมตร ที่ระยะ 10 มิลลิเมตรห่างจากชุดเลนส์.....	80
5.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของรูบนแผ่นอคูมิเนียมฟอยด์ที่เกิดจากการใช้ลำไอออนระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ขนาด 180 ไมโครเมตร ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 10 มิลลิเมตร เมื่อเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออน 240 นาที่.....	81
5.25 ลักษณะรูปร่างของลำไอออนที่ใช้ในการเจาะรูบนแผ่นอคูมิเนียมฟอยด์ในรูปที่ 5.24.....	82

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ถ้วยฟาราเดย์เมื่อทำการเจาะแผ่นอคูมิเนียมพอยด์เป็นเวลา 35 นาที.....	82
5.27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของรูบนแผ่นอคูมิเนียมพอยด์ที่เกิดจากการใช้ลำไอออนระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ขนาด 180 ไมโครเมตร ที่ระยะห่างจากจุดเลนส์ 10 มิลลิเมตร เมื่อเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออน 35 นาที.....	83
5.28 ลักษณะรูปร่างของลำไอออนที่ได้จากจุดเลนส์ซึ่งแผ่นโลหะที่นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าของจุดเลนส์มีขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน.....	85
5.29 ระบบโฟกัสลำไอออนแบบเลนส์ชุดเดียว ถ้าระยะ $p \rightarrow \infty$ จะส่งผลให้อัตราการขยายของจุดเลนส์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์.....	86
5.30 แผนภาพการทำงานของระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุด.....	87
5.31 แผนภาพการจัดวางชิ้นเลนส์ของระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุด.....	88
5.32 แผนภาพการต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการศึกษาระบบเลนส์โฟกัสแบบเลนส์สองชุด.....	88
5.33 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรก (V_{L1}) ที่มีต่อขนาดและรูปร่างของลำไอออน เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง (V_{L2}) เท่ากับ 1.80 กิโลโวลต์ และวัดที่ระยะ 14 มิลลิเมตรห่างจากชิ้นเลนส์ชิ้นสุดท้าย.....	90
5.34 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง เมื่อใช้ลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ $V_{L2}=1.80$ กิโลโวลต์ และ $V_{L1}=1.30$ กิโลโวลต์ ที่ตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ 14, 19 และ 24 มิลลิเมตร.....	93
5.35 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง เมื่อใช้ลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ $V_{L2}=1.65$ กิโลโวลต์ และ $V_{L1}=1.30$ กิโลโวลต์ ที่ตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ 14, 19 และ 24 มิลลิเมตร.....	94
5.36 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง เมื่อใช้ลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ $V_{L2}=1.50$ กิโลโวลต์ และ $V_{L1}=1.30$ กิโลโวลต์ ที่ตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ 24, 29 และ 34 มิลลิเมตร.....	95
5.37 ขนาดของลำไอออน ณ ตำแหน่งโฟกัสเมื่อ V_{L2} ค่าต่างๆ.....	96

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.38 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของรูบนแผ่นอลูมิเนียมพอยด์เมื่อใช้ลำไอออนพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ สักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรกและชุดที่สองเท่ากับ 1.30 และ 1.70 กิโลโวลต์ตามลำดับ ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 14 มิลลิเมตร.....	100
5.39 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของรูบนแผ่นอลูมิเนียมพอยด์เมื่อใช้ลำไอออนพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ สักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรกและชุดที่สองเท่ากับ 1.30 และ 1.75 กิโลโวลต์ตามลำดับ ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 14 มิลลิเมตร....	101
5.40 โครงสร้างของระบบโฟกัสที่ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่เมื่อใช้แหล่งกำเนิดไอออนที่มุมบานของลำไอออนต่ำ และชุดเลนส์แบบใหม่.....	102
5.41 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ประกอบเป็นระบบเลนส์ชุดใหม่.....	103
5.42 ระบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดี่ยว และแผนผังการต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการทดลองเมื่อแผ่นอิเล็กโทโรดตัวค้ำกับขั้วไฟฟ้าของเลนส์ชิ้นแรก เป็นชิ้นเดียวกัน.....	104
5.43 ระบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดี่ยว และแผนผังการต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการทดลอง เมื่อใช้แผ่นอิเล็กโทโรดตัวค้ำกับขั้วไฟฟ้าของเลนส์ชิ้นแรกต่างชิ้นกัน.....	105
5.44 ระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุดและแผนผังวงจรไฟฟ้าสำหรับการทดลอง.....	106
5.45 ลักษณะรูปร่างของลำไอออนที่จากระบบ โฟกัสแบบเลนส์สองชุดที่ปรับปรุงแล้ว ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 10 มิลลิเมตร เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 2.40 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ สักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรกเท่ากับ 1.90 กิโลโวลต์ และสักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองมีค่าเป็น 1.90, 1.95, 2.00 และ 2.05 กิโลโวลต์ ตามลำดับ.....	106
5.46 เปรียบเทียบลักษณะของและรูแผ่นกันด้วยฟาราเดย์ ก่อนและหลังการนำไปใช้วัดขนาดและรูปร่างของลำไอออน.....	107
5.47 ลักษณะของรูที่เกิดขึ้นบนแผ่นอลูมิเนียมพอยด์ เมื่อยิงด้วยลำไอออนระดับพลังงาน 2.40 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน.....	108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

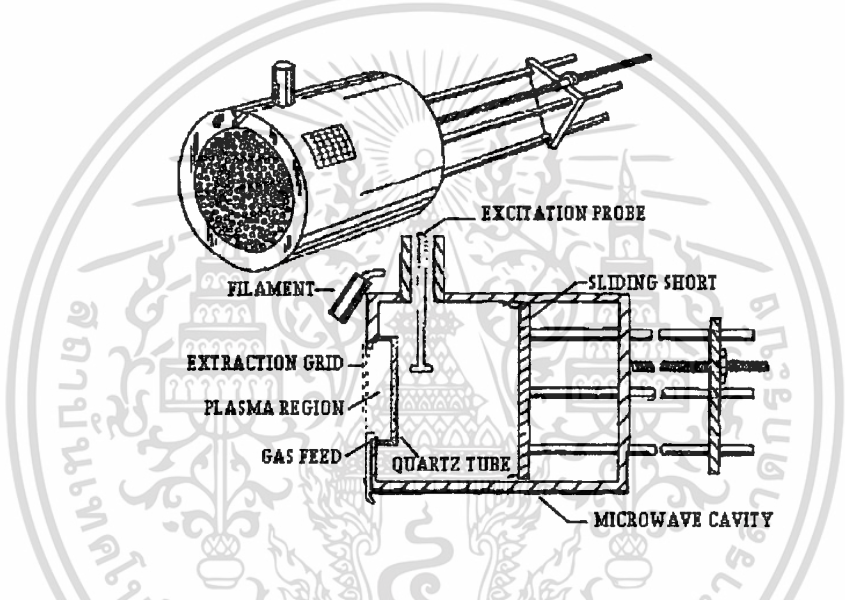
แหล่งกำเนิด ไอออนเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในรอบหลายสิบปีที่ผ่านมา มีทั้งส่วนที่ใช้สำหรับงานด้านการศึกษาวิจัย เช่นการใช้ลำไอออนช่วยกระตุ้นให้เกิด ไอออนทุติยภูมิในระบบแมสสเปกโทรสโคปี(Mass spectroscopy) สำหรับการศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบาง[1] การใช้ลำ ไอออนในการทำความสะอาดพื้นผิว และงานทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม(Integrated circuit) เช่น ใช้สำหรับการเจือสารกึ่งตัวนำในระบบ ไอออนอิมแพลนต์เทชัน(Ion Implantation)[2] การใช้ลำไอออนที่มีขนาดเล็ก (Fine ion beam) สำหรับการซ่อมแซมแม่แบบของวงจรรวม(Mask repair)[3] เป็นต้น

สำหรับแหล่งกำเนิด ไอออนโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา(plasma source) และส่วนที่ใช้สำหรับการกำเนิดลำไอออน ซึ่งเรียกว่าระบบการดึง ไอออน (extraction system) โดยแหล่งกำเนิดพลาสมาจะ ได้จากการทำให้เกิดเกิดการแตกตัว ซึ่งมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิด ไอออน จากนั้นระบบการดึง ไอออนจะทำหน้าที่ดึง ไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมา สำหรับลักษณะของลำไอออนที่ได้จากการดึงนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่องกันทั้งจากแหล่งกำเนิดพลาสมาและระบบการดึง ไอออน เช่น ความหนาแน่นและอุณหภูมิของพลาสมา รูปร่างเชิงเรขาคณิตและความค้ำค้ำของระบบดึงลำไอออน เป็นต้น

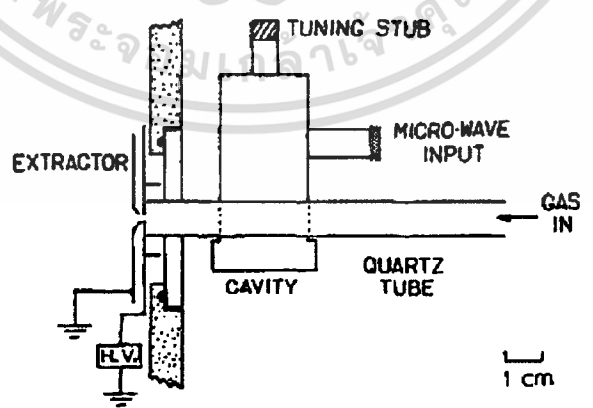
ชนิดของแหล่งกำเนิด ไอออนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนั้นจะแบ่งได้หลายชนิดตามวิธีการหรือเทคนิคที่ใช้ในการทำให้อะตอมแตกตัวเป็นพลาสมา[4] เช่น แหล่งกำเนิด ไอออนชนิด PIG(Penning/Phillip Ionization Gauge Ion Sources) แหล่งกำเนิด ไอออนชนิดฟรีแมน (Freeman Ion Sources) แหล่งกำเนิด ไอออนชนิดอิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์ (Electron Cyclotron Resonance Ion Sources) แหล่งกำเนิด ไอออนชนิดลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Ion Sources) แหล่งกำเนิด ไอออนชนิดโลหะเหลว (Liquid Metal Ion Sources) และแหล่งกำเนิด ไอออนชนิดคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Ion Sources) เป็นต้น

สำหรับแหล่งกำเนิด ไอออนชนิดคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นชนิดที่ได้เลือกสร้างและพัฒนาในงานวิจัยนี้ ได้มีนักวิจัยทำการศึกษาค้นคว้าและออกแบบพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยอัสมีสเซน (Asmussen) และรูท(Root)[5] ได้สร้างแหล่งกำเนิด ไอออนชนิด ไมโครเวฟพลาสมาดีสก์

(microwave plasma disk ion sources) ซึ่งใช้คลื่นไมโครเวฟย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต กำลังประมาณ 100 วัตต์ คัปปลิง(coupling) เข้ากับบริเวณของการเกิดพลาสมาที่มีลักษณะคล้ายแผ่นดิสก์ที่อยู่บริเวณปลายสุดของโพรงกำเนิดคลื่นไมโครเวฟชนิดทรงกระบอก(cylindrical cavity) ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งให้กระแสไอออน 300 มิลลิแอมป์เมื่อใช้แก๊สอาร์กอนและดิ่งไอออนผ่านมัลติอะเพอร์เจอร์ (multi aperture) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร ต่อมาได้มีการพัฒนาต่อโดยใช้แม่เหล็กถาวรเข้ามาช่วย และมีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ยังมีการสร้างแหล่งกำเนิดไอออนชนิดไมโครเวฟอีกแบบโดย Leung และทีมงาน[6] โดยการใช้หลอดแก้วควอดซ์ที่มีแก๊สไหลเข้าจากปลายด้านหนึ่งที่วางผ่านโพรงกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ส่วนปลายอีกด้านของหลอดแก้วใช้อิเล็กโทรดดิ่งไอออนออกมา ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต ที่กำลัง 400 วัตต์จะดึงไอออนออกมาได้ 5 มิลลิแอมป์



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของแหล่งกำเนิด ไอออนมีได้ทำการพัฒนาขึ้น โดยอัสมีสเซนและรูท[5]



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของแหล่งกำเนิด ไอออนมีได้ทำการพัฒนาขึ้น โดย Leung และทีมงาน[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการนำลำไอออนไปประยุกต์ใช้งานส่วนมากต้องการลำไอออนที่มีความหนาแน่นกระแส(current density) ที่มีค่าสูง การกระจายพลังงาน(energy distribution) ของลำไอออนมีค่าน้อย และลำไอออนที่มีขนาดเล็ก แต่ลำไอออนที่ได้จากระบบดึงลำไอออนนั้น จะยังมีขนาดที่ใหญ่ มีการบานออกของลำไอออน(beam diverge) ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของกระแสมีค่าต่ำ เมื่อลำไอออนเคลื่อนที่ออกห่างจากระบบดึง ไอออนมากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบการโฟกัสเพื่อลดขนาดของลำไอออน(beam width) และมุมบานของลำไอออน(beam divergence angle) ซึ่งส่งผลให้การกระจายพลังงานของลำไอออนมีค่าต่ำลงไปด้วย

ในการโฟกัสลำไอออนนั้น จะอาศัยระบบเลนส์ในการบังคับการเคลื่อนที่ของลำไอออน โดยที่ระบบเลนส์ของการโฟกัสลำไอออนนั้นจะทำหน้าเหมือนกับระบบเลนส์ทางแสงที่ทำการโฟกัสรังสีแสงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเลนส์ทางแสง การพิจารณาการโฟกัสลำไอออนจะมองเสมือนว่าไอออนแต่ละตัวเป็นรังสีแสง ซึ่งวิ่งขนานไปกับแกนทางแสง(optical axis) หรือทำมุมน้อยๆ กับแกนดังกล่าว ซึ่งมีแนววิถีการเคลื่อนที่ของ ไอออนขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อไอออนดังกล่าว ณ ตำแหน่งนั้น และเพื่อความง่ายจะพิจารณาในเชิงอุดมคติ โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบอื่น สำหรับสมการที่อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของ ไอออนภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น เรียกว่า สมการพาราเซียลเรย์(paraxial ray equation)[4],[7] ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของไอออนในระบบที่มีสมมาตรเชิงแกน(axisymmetric system)

สำหรับเลนส์ที่นำมาใช้ในการโฟกัสลำไอออนนั้น จะมีอยู่สองชนิดที่แตกต่างกัน[4],[7] คือ เลนส์แม่เหล็ก(magnetics lenses) และเลนส์ไฟฟ้า(electrostatics lenses) โดยที่เลนส์แม่เหล็กจะอาศัยหลักการเบี่ยงเบนแนววิถีของไอออนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก เช่น เลนส์แม่เหล็กควอดรูโพล(magnetics quadrupole lens) ส่วนเลนส์ไฟฟ้าจะอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของไอออนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้า เช่น เลนส์ไอเซล(einzel lens) โดยในการประยุกต์นำไปใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบต้องการใช้เลนส์ชนิดใด

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งส่งผ่านจากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ท่อนำคลื่น(waveguide) ปลายปิดทำหน้าที่เป็นโพรงกำเนิด(resonance cavity) ที่สามารถปรับความยาวได้ด้วยพลิงเกอร์(plunger) ซึ่งกระตุ้นให้เกิดที่ไหลผ่านท่อควอดซ์เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา จากนั้นทำการดึง ไอออนออกจากพลาสมาโดยผ่านขั้วไฟฟ้า ลำไอออนที่ดึงออกมาได้ จะถูกทำให้มีขนาดเล็กลงโดยผ่านระบบเลนส์โฟกัส โดยเลือกใช้เลนส์ไอเซลซึ่งเป็นเลนส์ไฟฟ้า เพื่อสะดวกในการปรับเปลี่ยนกำลังขยายของระบบเลนส์

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาระบบโฟกัสลำไอออน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติของลำไอออนที่โฟกัสได้

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

แหล่งกำเนิดไอออนประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ แหล่งกำเนิดพลาสมา และระบบการดึงไอออน การสร้างพลาสมาอาศัยหลักการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยการส่งคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต จากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular waveguide) ปลายปิดทำหน้าที่เป็นท่อกำทอน (resonance cavity) สำหรับการแพร่ของคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในท่อนำคลื่นมี 2 โหมดคือ โหมดสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electrics, TE) และโหมดสนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic, TM) [8] ซึ่งโหมดของการกำทอนก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน สำหรับการกำหนดโหมดในท่อนำคลื่นนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของท่อนำคลื่น เมื่อมีแก๊สไหลผ่านท่อแก้วควอดซ์ซึ่งวางคดขวางต่อกำทอน ณ ตำแหน่งที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด จะส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระภายในแก๊สถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ ทำให้เกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับอิเล็กตรอนอิสระหรืออะตอมของแก๊ส ทำให้อิเล็กตรอนหรืออะตอมถูกกระตุ้นจนกระทั่งมีพลังงานมากพอที่จะสามารถทำให้เกิดการแตกตัว (ionization) [9] เป็นพลาสมาขึ้นภายในท่อแก้วควอดซ์ ส่วนระบบการดึงไอออนใช้หลักการเร่งอนุภาคที่มีประจุโดยใช้สนามไฟฟ้า ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีรูให้ไอออนบวกที่ถูกเร่ง สามารถเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมาได้

สำหรับระบบการโฟกัสลำไอออนจะนำเอาหลักการของระบบเลนส์ไฟฟ้ามาใช้โดยจะออกแบบขั้วไฟฟ้าให้มีรูปกลมเจาะทะลุสี่ขั้ว ประกอบกันเป็นระบบเลนส์ไฟฟ้า (Electrostatic lens) ซึ่งอาศัยหลักการเบี่ยงเบนลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านด้วยสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ โดยระยะและขนาดของจุดโฟกัสสามารถปรับได้โดยการปรับศักย์ไฟฟ้าของขุคเลนส์

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาแหล่งกำเนิด ไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- 1.4.2 ศึกษาาระบบ โฟกัสลำไอออน
- 1.4.3 ศึกษาสมบัติของลำไอออนที่โฟกัสได้
- 1.4.4 ปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบโฟกัสลำไอออน

1.5 วิธีการดำเนินการ การทำวิทยานิพนธ์

1.5.1 แผนการดำเนินงานสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ รวมทั้งทฤษฎีและหลักการเกี่ยวข้องกับระบบสุญญากาศ
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติของแหล่งกำเนิด ไอออนที่พัฒนาขึ้น โดยห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์พื้นผิวภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาและทดสอบระบบ โฟกัสลำไอออนแบบเลนส์ชุดเดียว
- ขั้นตอนที่ 4 ปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบ โฟกัสลำไอออนแบบเลนส์ชุดเดียว
- ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาและทดสอบระบบ โฟกัสลำไอออนแบบเลนส์สองชุด
- ขั้นตอนที่ 6 ปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบ โฟกัสลำไอออนแบบเลนส์สองชุด
- ขั้นตอนที่ 7 สรุปการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการศึกษาต่อไปในอนาคต

1.5.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการในแต่ละขั้นตอน

เดือนที่	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										←————→		

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

- 1.6.1 มีองค์ความรู้เกี่ยวกับแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ และแนวทางในการศึกษาพัฒนาเพื่อให้ได้แหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพดี
- 1.6.2 มีองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบโพกัสต้าไอออน และแนวทางในการศึกษาพัฒนาเพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพดี
- 1.6.3 มีองค์ความรู้ในการประยุกต์ใช้วัสดุภายในประเทศในการสร้างแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟและระบบโพกัสต้าไอออน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ฟิสิกส์ของพลาสมา

พลาสมาเป็นสถานะที่สี่ของสสาร เมื่ออุณหภูมิของสสารเพิ่มขึ้นสสารจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จากสถานะของเหลวเป็นแก๊สและในที่สุดจากสถานะแก๊สเป็นสถานะพลาสมา ที่สถานะพลาสมาเมื่ออิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอม อะตอมจะมีสภาพเป็นไอออน ทั้งไอออนและอิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคอิสระในพลาสมา ในขณะที่อนุภาคอิสระสำหรับสถานะแก๊สคือโมเลกุลของแก๊ส หรือเป็นอะตอมในกรณีของแก๊สเฉื่อย โดยทั่วไปอนุภาคอิสระนอกจากจะเป็นอนุภาคที่มีประจุได้แก่ไอออนและอิเล็กตรอนแล้วยังมีอะตอมหรือ โมเลกุลที่เป็นกลางรวมอยู่ด้วย อนุภาคในพลาสมาเหล่านี้มีสภาพต่างจากอนุภาคในสถานะแก๊สโดยปกติ ดังนั้นปฏิริยาระหว่างอนุภาคภายในพลาสมาโดยรวมและ ปฏิริยาที่มีต่อสนามภายนอกจึงต่างไปจากสถานะแก๊สโดยปกติทั่วไป

2.1 ขบวนการในการสร้างพลาสมา[10]

พลาสมาเกิดขึ้นได้ โดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็น ไอออนโดยแสง(photo ionization) และ การชนด้วยอิเล็กตรอน(electron impact) เป็นต้น เมื่ออะตอมหรือ โมเลกุลของแก๊สได้รับพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอม ขบวนการนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็น ไอออน(ionization) ซึ่งถ้าอัตราการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับหรือมากกว่าอัตราการสูญเสีย แสดงว่ามีพลาสมาเกิดขึ้น พลังงานน้อยที่สุดที่ทำให้ให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกจากอะตอม เรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็น ไอออน (ionization energy)

2.1.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน (Ionization by collision)

เมื่ออิเล็กตรอน ไอออน หรือ อะตอมที่เป็นกลางวิ่งด้วยความเร็วค่าหนึ่งเข้าชนอะตอมใดๆ จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน ถ้าหลังการชนอะตอมที่ถูกชนไม่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excitation) หรือ ไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็น ไอออน การชนในลักษณะนี้จะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ในทางกลับกันถ้าอะตอมของแก๊สที่ถูกชนอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น หรือทำให้แตกตัวเป็น ไอออน การชนในลักษณะนี้ก็จะเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision)

ในกรณีที่อนุภาคที่เข้าชนเป็นอิเล็กตรอน ถ้าการชนเป็นผลให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบการชนด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งในกรณีนี้อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม นั่นคือ

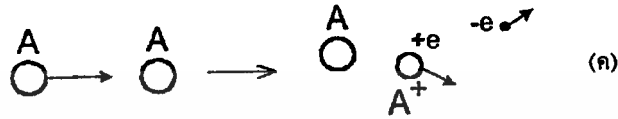
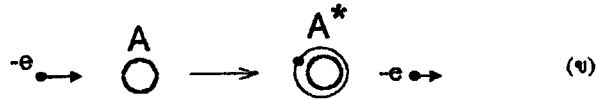
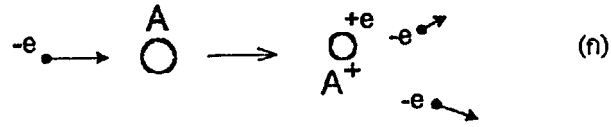
$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.1)$$

เมื่อ m คือ มวลของอิเล็กตรอน
 v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน
 W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

หลังการชนอิเล็กตรอนที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์ลดลง อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมจะมีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.1(ก) ในกรณีการชนแบบนี้พลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอะตอมมีมวลมากเมื่อเทียบกับมวลของอิเล็กตรอน ในบางกรณีอะตอมที่ถูกชนจะไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนเพียงแต่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเท่านั้น ดังในรูปที่ 2.1(ข) ถ้าก่อนที่อะตอมนี้จะกลับเข้าสู่สถานะพื้น (ground state) มีอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งเข้าชนอาจเป็นผลให้อะตอมนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนได้ การแตกตัวเป็นไอออนแบบนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบขั้น (step ionization) กรณีนี้เป็นไปได้ถ้าอิเล็กตรอนที่เข้าชนมีความหนาแน่นสูงและสถานะถูกกระตุ้นของอะตอมเป็นสถานะกึ่งเสถียร (metastable state) ซึ่งมีช่วงชีวิต (life time) ยาวกว่าสถานะถูกกระตุ้นปกติ

การแตกตัวเป็นไอออนอาจเกิดจากการชนด้วยอะตอมที่เป็นกลางก็ได้ ถ้าอะตอมที่เข้าชนมีพลังงานจลน์มากพอ หลังการชนจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานและโมเมนตัม ทำให้อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ในขณะที่อะตอมที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ ดังในรูปที่ 2.1(ค)

ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้ว (กรณีอะตอมหลังถูกชนในรูปที่ 2.1(ข)) หลังจากการชนอะตอมที่ถูกชนจะเป็นกลางและอิเล็กตรอนเข้าชนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้น ดังในรูปที่ 2.1(ง) แต่ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้วนั้น ถูกชนด้วยอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเช่นกัน หลังจากการชนอะตอมที่เข้าชนจะถ่ายเทพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ให้อะตอมที่ถูกชนทำให้อะตอมที่เข้าชนเป็นกลาง ในขณะที่อะตอมที่ถูกชนจะถูกทำให้แตกตัว ดังในรูปที่ 2.1(จ)



รูปที่ 2.1 การชนของอิเล็กตรอนและอะตอม

A คือ อะตอมที่เป็นกลาง

A⁺ คือ อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน(ไอออนบวก)

A* คือ อะตอมที่สถานะถูกกระตุ้น

2.1.2 การแตกตัวเป็นไอออนโดยโฟตอน (Photo-ionization)

เมื่ออะตอมดูดกลืนโฟตอนจะส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากระดับต่ำกว่าไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่าและอะตอมนี้จะอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนในอะตอมที่ถูกกระตุ้นเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับที่สูงกว่ามายังระดับพลังงานที่ต่ำกว่าจะปลดปล่อยโฟตอนออกมา กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$h\nu + A \rightleftharpoons A^* \quad (2.2)$$

เมื่อ A คือ อะตอมที่เป็นกลาง

A* คือ อะตอมที่ถูกกระตุ้น

ถ้าโฟตอนมีพลังงานมากพอ และถูกดูดกลืนโดยอะตอมที่เป็นกลาง อะตอมนั้นก็จะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น หรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ ถ้า

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

เมื่อ W คือ ระดับพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้นหรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออนซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

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

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

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

ในกรณีที่พลังงานของโฟตอนมีค่ามากกว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการกระตุ้นอะตอมพลังงานส่วนที่เหลือนั้นอาจเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกกระตุ้นได้ ในกรณีที่อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนพลังงานส่วนเกินของโฟตอนนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมด้วยวิธีการนี้เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน(photoelectron)

2.2 สมบัติของพลาสมา[4],[11]

ในพลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นกลางและอนุภาคที่มีประจุที่แตกต่างกัน ดังนั้นเวลากล่าวถึงอนุภาคในพลาสมา จึงต้องบอกเป็นชนิดของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานนั้น โดยสมบัติของพลาสมาจะอธิบายสมบัติพื้นฐานของอนุภาคดังต่อไปนี้

- ความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง(n_n)
- ความหนาแน่นของไอออน(n_i) และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน(n_e) ซึ่งเมื่อพลาสมามีสถานะเป็นกลาง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและไอออนจะมีค่าเท่ากันและเท่ากับ ความหนาแน่นของพลาสมา(n)

- การกระจายพลังงาน(energy distribution) ของอนุภาคที่เป็นกลาง, $f_n(w)$ ไอออน, $f_i(w)$ และอิเล็กตรอน, $f_e(w)$

สมบัติของพลาสมามีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำพลาสมาไปใช้งาน เพราะประสิทธิภาพของการนำพลาสมาไปใช้งานขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอนุภาคที่อยู่ภายในพลาสมา อิเล็กตรอนเป็นปัจจัยสำคัญของการส่งผ่านพลังงานจากภายนอกให้กับแก๊สก่อให้เกิดการแตกตัว เมื่อแก๊สได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอกทั้งอิเล็กตรอนและไอออนจะได้รับพลังงานและถูกเร่งให้เคลื่อนที่ แต่เนื่องจากว่า อิเล็กตรอนมีขนาดเล็กที่สุด จึงถูกเร่งได้ง่ายที่สุด และได้รับพลังงานมากที่สุดจากภายนอก ซึ่งจะส่งผ่านพลังงานให้โมเลกุลหรืออะตอมของแก๊สผ่านการชนก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ถ้าประสิทธิภาพของกระบวนการนี้มีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น

ในระบบที่เป็นแก๊ส อนุภาคในพลาสมามีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องก่อให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาค ซึ่งการชนกันของอนุภาคในพลาสมาจะมีอยู่สองชนิด คือ การชนแบบยืดหยุ่น และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคหนัก(อนุภาคที่เป็นกลางหรืออนุภาคที่มีประจุ) ที่ทำให้ไม่เกิดการกระตุ้นอะตอมที่เป็นเป้า เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น ในขณะที่ถ้าทำให้อะตอมที่เป็นเป้าอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น จะเรียกว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น

การถ่ายเทพลังงาน(energy transfer, W_r) ในการชนระหว่างอิเล็กตรอนและเป้าที่เป็นอนุภาคหนักอธิบายได้โดย อัตราส่วนมวลของอนุภาค

$$W_r = \frac{2m_e}{M} W \quad (2.6)$$

เมื่อ M คือ มวลของอนุภาคหนัก
 W คือ พลังงานของอิเล็กตรอน
 m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน

สำหรับการชนแบบยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนกับอะตอมของแก๊สอาร์กอน อัตราส่วนการถ่ายเทพลังงานมีค่าน้อยมาก ประมาณ

$$\frac{W_r}{W} \approx \frac{1}{40,000} \quad (2.7)$$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การถ่ายเทพลังงานส่วนใหญ่จะ ได้มาจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน

อิเล็กตรอนที่ผ่านการเร่งด้วยพลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอก จะทำให้เกิดพลาสมาได้โดยการถ่ายเทพลังงานด้วยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับโมเลกุลของแก๊สที่เป็นกลาง การชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งกับอนุภาคหนักที่เป็นเป้า จะก่อให้เกิดการกระตุ้น การแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอนุภาคสองอนุภาค อัตราส่วนการถ่ายเทพลังงานจะกำหนดโดย

$$\frac{W_{ir}}{W} = \frac{M}{m_{in} + M} \quad (2.8)$$

เมื่อ m_{in} คือ มวลของอนุภาคที่สูญเสียพลังงาน

จากสมการ(2.8) การชนแบบไม่ยืดหยุ่น ระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคหนัก ($m_{in} = m_e \ll M$) อิเล็กตรอนสามารถที่จะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอนุภาคหนักทำให้เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาขึ้น การชนแบบไม่ยืดหยุ่นทำให้เกิดพลาสมาได้ ในการชนแบบไม่ยืดหยุ่นพลังงานที่มีการถ่ายเทระหว่างชนจะมีค่าเริ่มตั้งแต่ น้อยกว่า 0.1 อิเล็กตรอน โวลต์ จนถึงมากกว่า 10 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งก่อให้เกิดการแตกตัวของแก๊ส

การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการถ่ายเทพลังงานในพลาสมา ความสำคัญมากขึ้นอยู่กับระดับของการแตกตัวเป็นไอออน (degree of ionization) ในพลาสมา สำหรับค่าระดับการแตกตัวเป็นไอออนที่ต่ำกว่า 10^{-10} จะไม่คำนึงถึงการถ่ายเทพลังงานอันเนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอน อย่างไรก็ตามสำหรับพลาสมาที่เกิดการจาก ECR ซึ่งมีระดับของการแตกตัวเป็นไอออนอยู่ที่ 10^{-3} การถ่ายเทพลังงานเนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

2.2.1 ระดับของการแตกตัวเป็นไอออน (Degree of Ionization)

ระดับการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความหนาแน่นของอนุภาคที่มีประจุในพลาสมา ถ้าอนุภาคที่อยู่ในสถานะแก๊สเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ระดับการแตกตัวเป็นไอออน (α) กำหนดด้วยสมการ (2.9)

$$\alpha = \frac{n_i}{n} \quad (2.9)$$

กรณีของพลาสมา ที่เกิดขึ้นที่ความดันต่ำ ระดับของการแตกตัวเป็นไอออน จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 10^6 ถึง 10^3 อย่างไรก็ตามถ้าการแตกตัวเป็นไอออนเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นภายใต้สนามแม่เหล็ก ระดับการแตกเป็นไอออนจะมีค่าสูงถึง 10^2 หรือมากกว่า เช่น ในกรณี ECR พลาสมา โดยระดับของการแตกตัวเป็นพลาสมาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในพลาสมา

สำหรับระดับของการแตกตัวเป็น ไอออนของแก๊สที่อยู่ในสมดุลความร้อน(thermal equilibrium) จะกำหนดด้วยสมการสาฮา(Saha equation) [12]

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-W_i/kT} \quad (2.10)$$

- เมื่อ n_i คือ ความหนาแน่นของไอออน(m^{-3})
 n_n คือ ความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง(m^{-3})
 T คือ อุณหภูมิของแก๊ส ในหน่วยเคลวิน
 W_i คือ พลังงาน ในการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม(eV)
 K คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์

2.2.2 อุณหภูมิของพลาสมา (Plasma temperature)

ในงานด้านพลาสมาฟิสิกส์นิยามกำหนดหน่วยของพลังงานเป็นอิเล็กตรอน โวลต์ (eV) และสำหรับพลาสมาแล้วนิยามที่จะอธิบายพลังงานของพลาสมาในรูปของอุณหภูมิพลาสมาแทน ดังนั้นอุณหภูมิของพลาสมาจึงถูกใช้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการอธิบายพลังงานของอนุภาคในพลาสมา โดยพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคจะแปรผันกับอุณหภูมิตามสมการ

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT \quad (2.11)$$

โดยทั่วไปจะกำหนดอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยอิเล็กตรอน โวลต์ และอุณหภูมิของพลาสมาสามารถคำนวณได้จากพลังงานเฉลี่ยของพลาสมา ตัวอย่างเช่นอุณหภูมิของพลาสมา 1 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนจะมีอุณหภูมิ 11600 K

ภายในพลาสมาอุณหภูมิของ ไอออนและอิเล็กตรอน ไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน และถ้ามีการป้อนสนามแม่เหล็ก อุณหภูมิของอนุภาคในพลาสมาในแนวขนานและตั้งฉากกับสนามจะมีค่าแตกต่างกันนอกจากนี้อุณหภูมิของอนุภาคที่เป็นกลางก็จะแตกต่างกันด้วย

2.2.3 พลาสมาชีท (Plasma sheath)

เนื่องจากพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุและอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า แต่โดยผลรวมแล้วพลาสมาจะเป็นกลางที่มีผลรวมประจุของอนุภาคทั้งหมดเป็นศูนย์ (electrical neutrality) อนุภาคในพลาสมาจะมีปฏิสัมพันธ์กันผ่านทางสนามไฟฟ้าและอิทธิพลของสนามไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุภายในพลาสมาจะมีเพียงระยะทางจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น ระยะนี้เรียกว่า ระยะกำบัง (screening distance) ที่ระยะมากกว่านี้สนามของอนุภาคจะถูกหักล้างโดยอนุภาคตัวอื่นในพลาสมา ปรากฏการณ์ในลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำต่อพลาสมาเช่นกัน สนามไฟฟ้าจากภายนอกจะถูกหักล้างโดยสนามจากภายในพลาสมาจะทำให้สนามจากภายนอกไม่สามารถผ่านพลาสมาซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับที่โลหะไม่ยอมให้สนามไฟฟ้าภายนอกผ่าน ทั้งนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกทำให้อนุภาคบริเวณผิวของพลาสมามีการจัดเรียงตัวใหม่และเป็นผลให้สนามไฟฟ้าภายนอกมีค่าลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทางลึกเข้าไปในพลาสมา ระยะที่สนามภายนอกสามารถผ่านเข้าไปได้จะขึ้นกับความหนาแน่นและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา

เมื่อพลาสมาสัมผัสผนัง (material wall) บริเวณที่สัมผัสระหว่างพลาสมา กับผนังจะไม่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ความหนาของบริเวณนี้เรียกว่า พลาสมาชีท แสดงดังรูป 2.18 ซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออน จะเคลื่อนที่ไปถึงผนังก่อนไอออนและทำให้ผนังมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา (มีประจุสุทธิเป็นลบ) เป็นผลให้เกิดแรงผลักอิเล็กตรอนตัวต่อไป ในขณะที่เดียวกันจะเร่งให้ไอออนบวกเคลื่อนที่มาผนังด้วยอัตราที่สูงขึ้น ที่สภาวะสมดุลจึงเกิดเป็นชั้นของประจุบวกสุทธิลึกเข้าไปในพลาสมาเรียกว่า พลาสมาชีท นั่นเอง ความหนาของพลาสมาชีทขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา โดยสเกลของความหนาของพลาสมาชีทนี้เรียกว่าความยาวเดบาย (Debye length, λ_D) เมื่อ

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 n_e}} \quad (2.12)$$

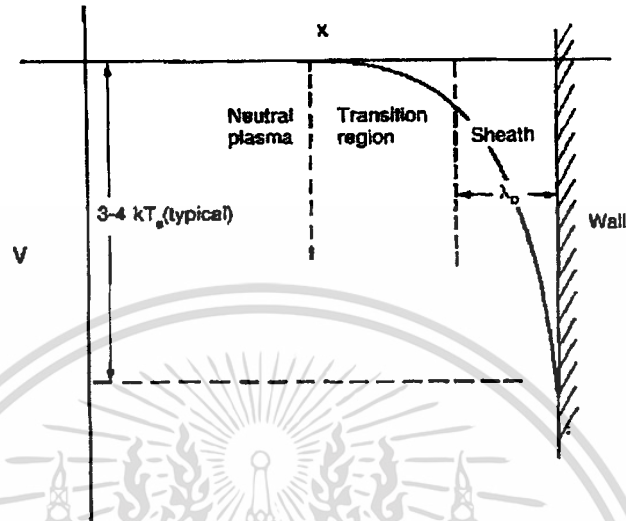
หรือ

$$\lambda_D = 743 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (2.13)$$

เมื่อ T_e คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (อิเล็กตรอน โวลต์)
 n_e คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 บริเวณพลาสมาชิด

เพื่ออธิบายความหมายของความยาวเดอบาย พิจารณาการนำประจุบวก q ใส่เข้าไปในพลาสมาที่มีสภาพเป็นกลาง ซึ่งประจุดังกล่าวจะสร้างศักย์ไฟฟ้าขึ้น โดยในพื้นที่ว่าง (free space) มีค่าดังสมการ

$$V_o = \frac{q}{4\pi\epsilon_o d} \quad (2.14)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างจากจุดประจุ

V_o คือ ศักย์ไฟฟ้าในพื้นที่ว่าง

สำหรับในพลาสมาศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีผลมาจากอิเล็กตรอนและไอออนที่มีอยู่ภายในพลาสมา ซึ่งสามารถหาได้จากการแก้สมการปัวว์ซอง (Poisson's equation)

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_o} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของประจุทั้งหมดในพลาสมามีค่าคงสมการ

$$\rho = e(n_i - n_e) + q\delta(d) \quad (2.16)$$

โดยที่ $\delta(d)$ คือ ดิเรกเดลตาฟังก์ชัน (Dirac δ function) ซึ่งบ่งชี้ว่า q เป็นจุดประจุ

ศักย์ไฟฟ้าจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลง ถ้ากำหนดให้อิเล็กตรอนอยู่ภายใต้สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่อุณหภูมิ T ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าคงสมการ

$$n_e = n \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (2.17)$$

พิจารณาในกรณีที่ $eV \ll kT$ และค่า ρ มีค่าในสมการ (2.16) จะเขียนสมการ (2.15) ใหม่ได้เป็น

$$\nabla^2 V = \frac{V}{\lambda_D} + q\delta(d) \quad (2.18)$$

ซึ่งจะได้ผลเฉลยของสมการ (2.18) คือ

$$V(d) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 d} \exp\left(-\frac{d}{\lambda_D}\right) = V_0 \exp\left(-\frac{d}{\lambda_D}\right) \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.19) จะพบว่าพลาสมาจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าในพื้นที่ว่าง V_0 มีค่าลดต่ำลงตามระยะที่ลึกเข้าไปในพลาสมาเท่ากับค่าความยาวเดอบาย โดยการลดลงของศักย์ไฟฟ้างกล่าวข้างต้น เรียกว่า เควบาชิลด์ิง (Debye shielding)

จากผลของเควบาชิลด์ิงส่งผลให้เกิดพลาสมาชีท ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม คือศักย์ไฟฟ้าของชีท (sheath potential, V_s) และจะมีเพียงอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากพอเท่านั้นที่จะวิ่งทะลุผ่านพลาสมาชีทไปยังผนังได้ สำหรับศักย์ไฟฟ้าของชีทจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อทำให้ฟลักซ์ของอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชีทกับฟลักซ์ของไอออนที่วิ่งไปยังผนังมีค่าเท่ากัน ซึ่งในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นระนาบจะกำหนดด้วยสมการ

$$V_s = \frac{kT}{2e} \ln\left(\frac{m_e}{2.3m_i}\right) \quad (2.20)$$

เมื่อ V_s คือ ศักย์ไฟฟ้าของซีท
 m_i คือ มวลของไอออน
 m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน

และสำหรับพื้นผิวทรงกลมมีค่าดังสมการ

$$V_s = \frac{kT}{2e} \ln \left(\frac{\pi m_e}{2m_i} \right) \quad (2.21)$$

ในรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า บริเวณพลาสมาซีท คือ บริเวณที่มีประจุบวกอิสระไม่มีประจุลบอยู่ ส่วนความหนาของพลาสมาซีท d_s คือความหนาของบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนและมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม V_s โดยที่ความหนาของพลาสมาซีทจะสัมพันธ์กับความยาวเดอบายและขึ้นอยู่กับระยะเฉลี่ยก่อนชนในพลาสมา รวมถึงศักย์ไฟฟ้าซึ่ง ไบอัสให้กับผนังของผิวสัมผัสพลาสมา

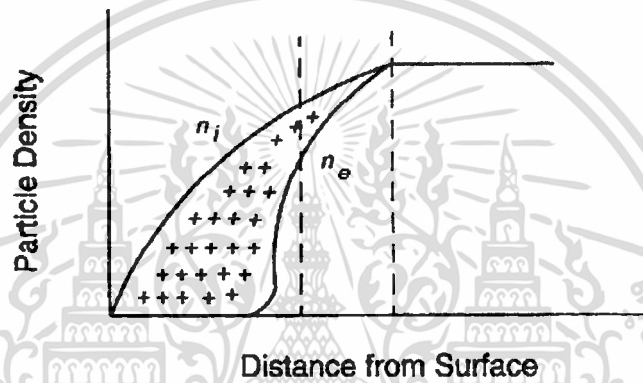
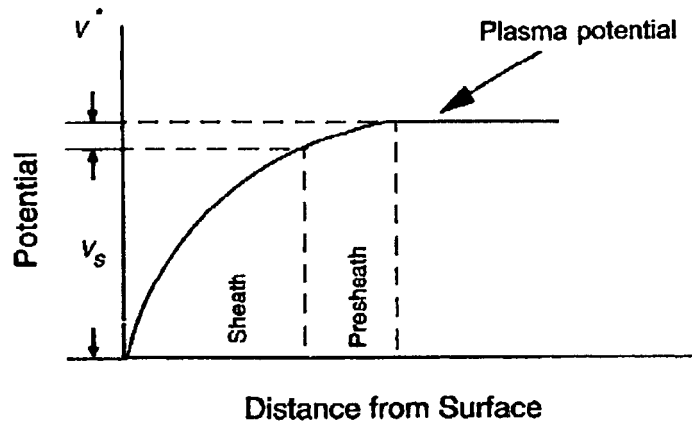
กรณีที่มีความดันสูง ระยะเฉลี่ยก่อนชนมีขนาดอยู่ในระดับของความหนาของพลาสมาซีทซึ่งหาได้จากสมการ

$$d_s \approx \eta^{2/3} \times \lambda_D \quad (2.22)$$

โดยที่

$$\eta = \frac{e(V_p - V_B)}{kT_e} \quad (2.23)$$

เมื่อ d_s คือ ความหนาของพลาสมาซีท
 V_B คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับผนังของผิวสัมผัส
 V_p คือ ศักย์ของพลาสมา



รูปที่ 2.3 โคออร์ดิเนตของพลาสมาซีท

ส่วนกรณีที่มีความดันต่ำ ระยะเฉื่อยก่อนชนมีค่ามากกว่าความหนาของพลาสมาซีท ความหนาของพลาสมาซีทคำนวณได้จากสมการ

$$d_s \approx 1.1\eta^{3/4} \times \lambda_D \quad (2.24)$$

2.2.4 ความถี่ของพลาสมา (Plasma frequency)

ถ้าอิเล็กตรอนในพลาสมาถูกทำให้เคลื่อนที่ออกจาก บริเวณที่พลาสมา มีสภาพเป็นกลาง จะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในทิศทางที่จะดึงอิเล็กตรอนดังกล่าวกลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิม เพื่อรักษาสภาพความเป็นกลางของพลาสมาเอาไว้ และเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่กลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิมและผลของแรงเฉื่อยจึงส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่เลยตำแหน่งเดิมออกไป ทำให้เกิดการสั่นของอิเล็กตรอนขึ้นรอบตำแหน่งเดิมของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่การสั่นของอิเล็กตรอนนี้ เรียกว่า ความถี่พลาสมา (plasma frequency, ω_p) หรืออาจเรียกว่า ความถี่แลงมัวร์ (Langmuir frequency) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} = 18,000 \pi n_e^{1/2} \text{ Hz} \quad (2.25)$$

โดยที่ n_e มีหน่วยเป็น cm^{-3}

จากสมการ (2.12) และสมการ (2.25) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของความถี่พลาสมากับค่าความยาวเดอบายได้ดังสมการ

$$\lambda_D \omega_p = \left(\frac{kT_e}{m_e} \right)^{1/2} \approx \bar{v}_e \quad (2.26)$$

เมื่อ \bar{v}_e คือ ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในพลาสมาเนื่องจากผลของความร้อน

จากสมการ (2.26) แสดงให้เห็นว่าอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดระยะทางหนึ่งความยาวเดอบายในหนึ่งช่วงคาบเวลาของการสั่นในพลาสมา ซึ่งพบว่ามีกรณีการสั่นในพลาสมาด้วยความถี่ ω ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความถี่พลาสมา ω_p อิเล็กตรอนจะสามารถตอบสนองต่อการสั่นได้อย่างรวดเร็วเพื่อที่จะรักษาสภาพความเป็นกลางของพลาสมาเอาไว้ ส่วนไอออนจะมีความถี่ของการสั่นที่ต่ำกว่าเนื่องจากมีมวลที่มากกว่า แต่ก็มีกรณีการสั่นในพลาสมาเกิดขึ้นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ของพลาสมา ก็จะไม่เกิดการชดเชยการตอบสนองของอิเล็กตรอน

2.3 ไมโครเวฟพลาสมา[13]

พลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการให้พลังงานที่เหมาะสมกับอะตอมของแก๊สแล้วทำให้อะตอมของแก๊สนั้นเกิดการแตกตัวเป็น ไอออนและอิเล็กตรอน วิธีการให้พลังงานกับอะตอมแก๊สมีอยู่หลายวิธี เช่น การให้พลังงานความร้อน การใช้ลำอนุภาคที่มีพลังงานพอเหมาะยิงเข้าไปในระบบของแก๊ส การใช้สนามไฟฟ้าแรงอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุพาหะอิสระให้มีพลังงานสูงพอเข้าชนอะตอมของแก๊ส แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการกระตุ้นให้เกิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave excited plasma) ซึ่งมีข้อดีในส่วนที่ทำให้พลาสมาที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สูง พลาสมามีอุณหภูมิต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้ขั้วไฟฟ้าเหมือนกันกับกรณีการป้อนด้วยสนามไฟฟ้าหรือไส้ (filament) สำหรับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเพื่อก่อให้เกิดพลาสมา ซึ่งสะดวกสำหรับการซ่อมบำรุง

แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถออกแบบสร้างได้หลากหลายรูปแบบ แต่จะอาศัยหลักการสำคัญเดียว คือ พลาสมาที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการดิสรจของแก๊ส โดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการที่จะรักษาระดับการเกิดพลาสมาให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องต่อไปนั้นจะต้องพิจารณาถึงอนุภาคที่มีประจุ และกลไกการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นภายในพลาสมานั้นด้วย ดังนั้น การอธิบายและศึกษาสมบัติของแหล่งกำเนิดไมโครเวฟพลาสมาจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงกระบวนการที่เกี่ยวข้องดังกล่าว

2.3.1 อัตราการระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับอนุภาคที่มีประจุ

พิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรูปฟังก์ชันไซน์ โดยกรณีนี้สมมติจะเขียนในรูปของเวกเตอร์เชิงซ้อนหรือที่เรียกว่าเฟสเซอร์ (phasors)

$$\mathbf{E} \exp j\omega t \quad \text{และ} \quad \mathbf{H} \exp j\omega t$$

เมื่อ \mathbf{E} คือแอมพลิจูดเชิงซ้อนของสนามไฟฟ้า

\mathbf{H} คือแอมพลิจูดเชิงซ้อนของสนามแม่เหล็ก

$$j = \sqrt{-1}$$

ω คือความถี่เชิงมุมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แท้จริงจะหาได้จากส่วนค่าจริงของเฟสเซอร์ นั่นคือ

$$E(t) = \text{Re}(\mathbf{E} \exp j\omega t)$$

$$H(t) = \text{Re}(\mathbf{H} \exp j\omega t)$$

พิจารณาบริเวณของพลาสมาที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าปรากฏอยู่ โดยไม่มีสนามแม่เหล็กสถิตย์จากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งในกรณีนี้พลาสมาจะกลายเป็นตัวกลางไอโซทรอปิก (isotropic medium) และสมบัติของพลาสมาจะอยู่ในรูปของสเกลาร์เพอิมิตติวิตี (scalar permittivity) ซึ่งเรียกว่าตัวกลางไดอิเล็กตริก (dielectric) แอมป์ลิจูดเชิงซ้อน \mathbf{E} และ \mathbf{H} จะเป็นไปตามสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0\mathbf{H} \quad (2.27)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon_p\varepsilon_0\mathbf{E} \quad (2.28)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon_p\varepsilon_0\mathbf{E}) = 0 \quad (2.29)$$

$$\nabla \cdot (\mu_0\mathbf{H}) = 0 \quad (2.30)$$

ค่าเพอเมียบิลิตี (permeability) ของพลาสมาจะถือว่าเท่ากับ μ_0 ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับในสุญญากาศ สำหรับค่าของพลาสมาเพอิมิตติวิตี (plasma permittivity) ซึ่งโดยทั่วไปจะแสดงเป็นค่าสัมพันธ์กับ ε_0 ซึ่งเป็นค่าเพอิมิตติวิตี ในสุญญากาศ เพอิมิตติวิตีสัมพัทธ์นี้จะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน $\varepsilon_p = \varepsilon_r + j\varepsilon_i$ เมื่อส่วนจริงและส่วนจินตภาพอธิบายถึงสมบัติการสะสมพลังงาน (reactive) และการสูญเสียพลังงาน (resistive) ของพลาสมาตามลำดับ

สำหรับการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสมา สามารถอธิบายบนพื้นฐานของอนุภาคที่มีประจุในที่ว่าง (free space) ซึ่งมีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าเชิงซ้อน (complex electric conductivity, σ) หรือเพอิมิตติวิตีสัมพัทธ์ ดังสมการ

$$\sigma \equiv \sigma_r + j\sigma_i = [-\varepsilon_i + j(\varepsilon_r - 1)]\omega\varepsilon_0 \quad (2.31)$$

อนุภาคที่มีประจุที่อยู่ในบริเวณการเกิดแก๊สไอออไนซ์จะถูกเร่งด้วยของค์ประกอบของสนามไฟฟ้า โดยจะไม่คำนึงถึงแรงอันเนื่องมาจากของค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากแรงดังกล่าวมีขนาดอยู่ในระดับ eEw/c ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อ w ซึ่งเป็นความเร็วของอนุภาคแต่ละตัวมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสง c มากๆ และ e คือประจุของอิเล็กตรอน เมื่ออนุภาคที่มีประจุในพลาสมาได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ ในทางปฏิบัติจะถือว่าไอออนมีการเคลื่อนที่น้อยมากเนื่องจากมีมวลที่มากนั่นเอง ดังนั้นคำอธิบายเชิงไฮโดรไดนามิก (hydrodynamic description) ของการตอบสนองของพลาสมาต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะถูกจำกัดการไหลของอิเล็กตรอนด้วยความเร็วเฉลี่ย V

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุเดียว เมื่อไม่คิดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากความร้อน(thermal motion) จะได้สมการการเคลื่อนที่ที่เป็น

$$m_e \frac{dV}{dt} = -eE(t) - m_e v V \quad (2.32)$$

เมื่อ m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน

สำหรับสมการดังกล่าวมีทั้งแรงกระทำจากภายนอกคือเทอม $-eE$ และเทอมของแรงเสียดทานคือ $-m_e v V$ เมื่อ v คือความถี่ของการชนเฉลี่ยระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคที่เป็นกลาง สำหรับการส่งผ่านโมเมนตัม แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้นโดยปกติจะเป็นแรงแลงเจวิน (Langevin force) ซึ่งเกิดเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนกับอนุภาคหนักที่อยู่โดยรอบบริเวณนั้น ผลเฉลยของสมการ (2.32) ที่สภาวะคงตัวเป็นฟังก์ชันไซน์ที่ขึ้นกับเวลา เขียนได้เป็น

$$V = \text{Re} (V \exp j\omega t)$$

เมื่อ V คือ แอมพลิจูดเชิงซ้อนของความเร็ว

แทนค่าผลเฉลยดังกล่าวลงในสมการ (2.32) จะได้ว่า

$$j\omega m_e V = eE - m_e v V \quad (2.33)$$

ซึ่งจะได้

$$V = -\frac{eE}{m_e v + j\omega} \quad (2.34)$$

สำหรับการกระจัดของอิเล็กตรอน(electron displacement) ซึ่งกำหนดโดย

$$R(t) = r \exp j\omega t$$

จะได้ว่า

$$\frac{d}{dt}(r \exp j\omega t) = j\omega r \exp j\omega t = V \exp j\omega t$$

ดังนั้น $j\omega r = V$ แทนค่าลงในสมการ (2.34) จะได้การกระจัดของอิเล็กตรอนเป็น

$$r = \frac{eE}{m_e \omega(\omega - jv)} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาที่เข้าศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะได้การกระจัดของอิเล็กตรอนในรูปของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (root mean square, rms) เป็น

$$r_{rms} = \frac{eE_{rms}}{m_e \omega (v^2 + \omega^2)^{1/2}} \quad (2.36)$$

เมื่อ $E_{rms} = (E \cdot E^* / 2)^{1/2}$ คือ ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้า

ในกรณีของคลื่นไมโครเวฟค่า r_{rms} ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่าขนาดของภาชนะบรรจุพลาสติก ดังนั้นสามารถตัดผลกระทบอันเนื่องมาจากการชนผนังภาชนะบรรจุของอิเล็กตรอนระหว่างการสั้น

จากสมการ (2.36) สามารถคำนวณหา ความหนาแน่นของกระแส (current density) ได้เป็น

$$J = -enV \quad (2.37)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

นอกจากนี้ยังสามารถเขียนความหนาแน่นของกระแสในรูปแบบอื่นได้เป็น

$$J = \sigma E \quad (2.38)$$

เมื่อ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า โดยที่มีค่าดังสมการ

$$\sigma = \frac{ne^2}{m_e} \frac{1}{v + j\omega} \quad (2.39)$$

จากสมการที่ (2.31) จะได้ว่า $\epsilon_p = 1 - j\sigma/\omega\epsilon_0$

ดังนั้นสามารถหาค่าพหุคูณตรีโกณมิติของพลาสมาได้เป็น

$$\varepsilon_p = 1 - \left(\frac{\omega_{pe}}{\omega} \right)^2 \frac{1}{1 - j \frac{\nu}{\omega}} \quad (2.40)$$

เมื่อ $\omega_{pe} \equiv (ne^2 / m_e \varepsilon_0)^{1/2}$ คือ ความถี่เชิงมุมของอิเล็กตรอนในพลาสมา
(electron plasma angular frequency)

พิจารณากรณีที่ไม่มีเกิดการชน ($\nu=0$) จะได้ $\sigma = j\sigma_i$ ซึ่งเป็นจำนวนจินตภาพและ $\varepsilon = \varepsilon_r$ เป็นจำนวนจริง พลาสมาจะแสดงสมบัติเป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียน้อย(lossless medium) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะอยู่ในรูปของการสั่น ซึ่งถูกเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า โดยเฉลี่ยแล้วจะไม่มีถ่ายเทพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้กับอิเล็กตรอนและแก๊สที่อยู่โดยรอบ ดังนั้นกรณีนี้พลาสมาจะเป็นตัวกลางพาสซีฟ (passive) เมื่อเกิดการชนขึ้นจะก่อให้เกิดความไม่เป็นระเบียบในการเคลื่อนที่ ก่อให้เกิดกลไกที่สามารถถ่ายเทพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสู่อิเล็กตรอนและถ่ายทอดไปยังแก๊สที่อยู่โดยรอบ ซึ่งในการอธิบายให้เกิดความเข้าใจในเรื่องนี้นั้นจะต้องพิจารณาการได้รับพลังงานและการถ่ายเทกำลังในการเกิดดิสชาร์จอย่างละเอียด

2.3.2 การได้รับพลังงานและการถ่ายเทกำลังในการเกิดดิสชาร์จ

จากสมการที่ (2.34) สามารถเขียนสมการแสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่ขึ้นกับเวลาได้ดัง
สมการ

$$V(t) = -\frac{e}{m_e} \operatorname{Re} \left(\frac{E}{\nu + j\omega} \exp j\omega t \right) \quad (2.41)$$

องค์ประกอบของความเร็วของแนว x จะเขียนได้เป็น

$$V_x(t) = \frac{e}{m_e} \frac{E_x}{(\nu^2 + \omega^2)^{1/2}} \cos(\omega t + \psi_x) \quad (2.42)$$

เมื่อ E_x คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x
 ψ_x คือ มุมเฟส

ดังนั้นพลังงานจลน์ที่ได้จากองค์ประกอบของความเร็วตามแนวแกน x คือ $u_x(t) = \frac{1}{2} m_e V_x^2(t)$

นั่นคือ

$$\begin{aligned} u_x(t) &= \frac{1}{2} \frac{e^2}{m_e} \frac{E_x^2}{v^2 + \omega^2} \cos^2(\omega t + \psi_x) \\ &= \frac{1}{4} \frac{e^2}{m_e} \frac{E_x^2}{v^2 + \omega^2} [1 + \cos(2\omega t + 2\psi_x)] \end{aligned} \quad (2.43)$$

ซึ่งค่าเฉลี่ยตลอดทั้งคาบเวลาคือ $\bar{u}_x = e^2 E_x^2 / 4m_e (v^2 + \omega^2)$ ดังนั้นพลังงานจลน์เฉลี่ยทั้งหมดในสามมิติ คือ $\bar{u} = e^2 E_p^2 / 4m_e (v^2 + \omega^2)$ เมื่อ $E_p^2 = 2E_{rms}^2$ คือผลรวมของความเข้มสนามกำลังสองตลอดทั้งสามแกน (ตัวอย่างเช่น $E_p^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$ สำหรับพิกัดคาร์ทีเซียน)

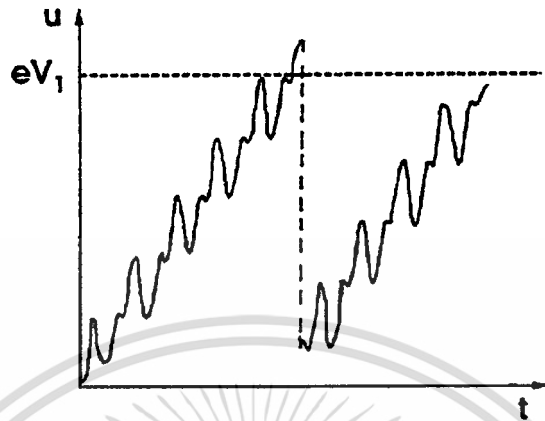
โดยทั่วไปแล้วอิเล็กตรอนมีค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของการสั่นตลอดช่วงหนึ่งคาบเวลา มีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ใช้สำหรับการทำให้เกิดการกระตุ้นและการเกิดแตกตัวของโมเลกุลโดยการชนเพื่อทำให้เกิดการคิซซาร์จ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลรอบข้าง ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเพิ่มพลังงานขึ้นอย่างต่อเนื่อง

แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าคือ $-eE(t)$ ซึ่งจะได้อิงานจากแรงดังกล่าวต่อหนึ่งหน่วยเวลาเป็น $-eE(t) \cdot V(t)$ โดยที่ค่าเฉลี่ยของงานที่เกิดขึ้นนี้ตลอดการสั่นในหนึ่งคาบเวลาคือ ค่าการถ่ายเทกำลังงานเฉลี่ยต่ออิเล็กตรอน (mean power transfer per electron, θ_A) ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$\begin{aligned} \theta_A &\equiv -\overline{eE(t) \cdot V(t)} = -e \operatorname{Re} \left(\frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{E}^*}{2} \right) \\ &= \frac{e^2}{m_e} \frac{v}{v^2 + \omega^2} E_{rms}^2 \\ &= 2v\bar{u} \end{aligned} \quad (2.44)$$

พิจารณากรณีไม่มีการชน ($v = 0$) ความเร็วของอิเล็กตรอนจะมีมุมเฟสต่างกับสนามไฟฟ้าอยู่ 90 องศา เป็นผลให้โดยเฉลี่ยแล้วไม่มีการถ่ายเทกำลังงานจากสนามไฟฟ้าให้กับอิเล็กตรอน ดังนั้นจะได้ว่า $\theta_A = 0$ ส่วนในกรณีที่มีการชนเกิดขึ้น ค่า $\theta_A \neq 0$ และพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่ามากพอที่จะกระตุ้นหรือทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลได้ ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วพลังงานของอิเล็กตรอนจะคงเหลือเพียงเล็กน้อยและจะเกิดกระบวนการเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นอีกครั้ง เมื่อพิจารณาโดยเฉลี่ยแล้วพลังงานของอิเล็กตรอนจะเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามเวลา อันเนื่องจากการชนกับโมเลกุลรอบข้าง ในขณะที่มีการกระเพื่อมเล็กน้อยของพลังงานซ้อนทับอยู่ ซึ่งส่วนนี้คือพลังงานเนื่องจาก

ต้นของอิเล็กตรอน เมื่อพลังงานมีค่าสูงมากพอและเกิดการกระตุ้นหรือทำให้โมเลกุลแตกตัวเป็นไอออน อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานเกือบทั้งหมด ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามความถี่สูงเนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่นกับอนุภาคหนัก และเกิดการถ่ายเทพลังงานอย่างรวดเร็วขณะเกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น เมื่อมีพลังงานถึงค่าพลังงานขีดเริ่ม eV_1

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พิจารณาเพียงการเคลื่อนที่และสมบัติของอิเล็กตรอนเดี่ยวในสนามความถี่สูง แต่สำหรับการอธิบายอิเล็กตรอนในพลาสมาที่สมบูรณ์มากขึ้น จะต้องพิจารณาแบบจำลองเชิงไฮโดรไดนามิก (hydrodynamic model) ซึ่งพิจารณาอิเล็กตรอนในรูปของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ย v ส่วนการอธิบายที่ละเอียดมากขึ้นจะต้องพิจารณาในแบบจำลองเชิงสถิติ (kinetic model) ซึ่งพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ในระดับไมโครของอนุภาค โดยเน้นที่พลังงานที่ได้รับจากสนามและการชนทุกชนิดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะได้อิงค์ชันการกระจายความเร็วของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของอิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ได้จากการชนกันก่อให้เกิดการกระจายโดยจะแสดงในรูปของพลังงานเฉลี่ยซึ่งมีค่ามากกว่าพลังงานที่ได้จากการชนแต่ละครั้ง สำหรับฟังก์ชันการกระจายแบบนี้ จะพบว่าอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานเพียงพอสำหรับการกระตุ้นและทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของแก๊สเสมอ เรียกว่าส่วนปลายของการกระจาย (tail of distribution) ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยก่อให้เกิดกลไกการกระจายขึ้น

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎี

3.1 การดึงไอออน

ส่วนประกอบหลักที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของแหล่งกำเนิดไอออนนอกเหนือจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแล้ว ได้แก่ ระบบการดึงไอออน ซึ่งมีหน้าที่ดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมา ทำให้เกิดลำไอออนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยที่ระบบหรือสิ่งที่ใช้สำหรับการดึงไอออนออกมาใช้งานนี้เรียกว่า ตัวดึงไอออน(ion extractor)

3.1.1 หลักการพื้นฐานของตัวดึงไอออน

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แรงที่กระทำต่ออนุภาคจะเป็นไปตามสมการแรงของลอเรนซ์(Lorentz Force Equation) ในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก คือ

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (3.1)$$

โดยที่หลักการของระบบตัวดึงไอออน[14] คือ การใช้สนามไฟฟ้าในการดึงอนุภาคที่มีประจุออกมา ดังนั้นระบบการดึงไอออนจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งถูกป้อนด้วยค่าความต่างศักย์สูง ขั้วไฟฟ้านี้จะมีรูขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ไอออนที่ถูกดึงด้วยสนามไฟฟ้าสามารถวิ่งผ่านออกมาได้ สำหรับลักษณะของระบบการดึงไอออนแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยที่กระแสสูงสุดที่สามารถดึงได้จากระบบการดึงไอออนจะมีความสัมพันธ์กับค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบการดึงไอออน ซึ่งเป็นไปตามกฎของไซล์-แลงมัวร์ ดังสมการ

$$j = \frac{4}{9}\epsilon_0 \sqrt{\frac{2q}{m_i}} \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ j คือ ความหนาแน่นของกระแสไอออน

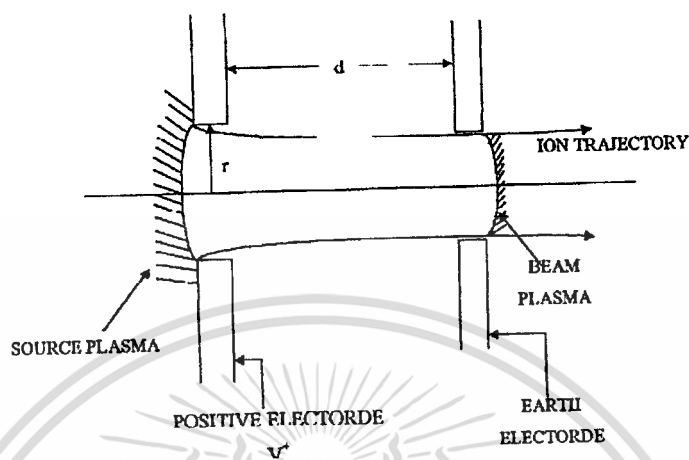
q คือ ประจุของไอออน

m_i คือ มวลของไอออน

V คือ ความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบ

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ϵ_0 คือ เพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m



รูปที่ 3.1 ระบบการดึงไอออน

ระบบการดึงไอออนที่นำมาใช้กับกฎของ ไชลด์-แลงมัวร์ ได้นั้นต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. สัมประสิทธิ์การแตกตัวเป็นไอออนภายในระบบต้องมีค่าน้อยมาก
2. ความหนาของ ไอออนซีทในระบบการดึงต้องมีความบางมากพอ ในระดับที่มีการชนของไอออนภายในซีทเกิดขึ้นเพียง 2-3 ครั้งเท่านั้น
3. กระแสของลำไอออนที่ดึงได้สูงสุดจะต้องไม่ขึ้นกับไอออนในแหล่งกำเนิดพลาสมา

3.1.2 ปัจจัยของตัวดึงไอออนที่ส่งผลต่อลำไอออน [4]

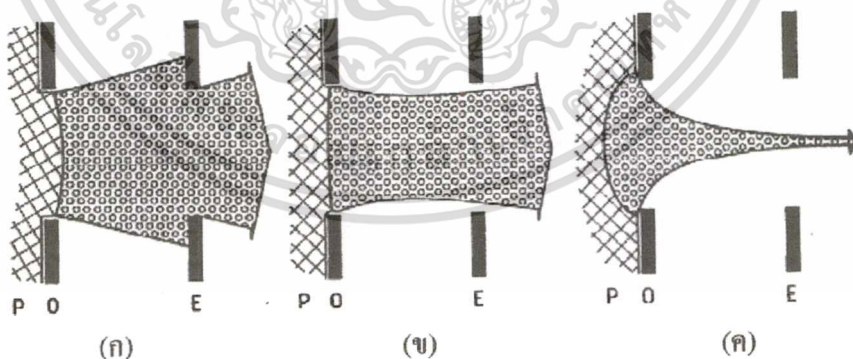
สำหรับระบบดึงไอออนที่มีเฉพาะสนามไฟฟ้า ไอออนจะถูกแรงกระทำเพื่อทำให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นแรงไฟฟ้า (flux line) ของระบบดึงไอออนหรือในทิศตั้งฉากกับเส้นสมศักย์ (equipotential line) นอกจากนี้ลักษณะรูปร่างของลำไอออนยังขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญหลายอย่าง ได้แก่ ระดับความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบ (applied high voltage) รูปร่างพื้นผิวของแหล่งกำเนิด (shape of emitting surface) และความหนาแน่นของประจุ (space charge density)

1) ระดับความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบดึงไอออน

ขั้วไฟฟ้าขั้วแรกที่สัมผัสกับพลาสมาในแหล่งกำเนิดพลาสมาในรูปที่ 3.1 ซึ่งเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าพลาสมา(plasma electrode) ซึ่งจะมีศักย์ที่สูงที่สุดในระบบการดึงไอออน เพื่อที่จะเร่งหรือผลักดันอนุภาคที่มีประจุบวกออกจากระบบ ขั้วไฟฟ้าขั้วที่สองเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าตัวดึง(extractor electrode) จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ ทำหน้าที่ดึงไอออนที่มีประจุบวกที่ถูกผลักออกมาโดยขั้วไฟฟ้าตัวแรกให้ออกสู่ระบบเพื่อเกิดเป็นลำไอออนต่อไป นอกจากนี้ ขั้วไฟฟ้าตัวดึง ยังทำหน้าที่ผลักดันอนุภาคที่เป็นลบหรืออิเล็กตรอนไม่ให้ออกมาจากลำไอออนอีกด้วย

2) รูปร่างพื้นผิวของการเปล่ง (emitting surface)

พื้นผิวของการเปล่งแสงคือรอยต่อระหว่างพลาสมาอิสระกับอนุภาคที่ถูกดึงออกมา รูปร่างพื้นผิวของการเปล่งแสงมีอยู่หลายลักษณะด้วยกัน ซึ่งอาจจะมีรูปร่างพื้นผิวที่แน่นอน(solid) หรืออาจมีลักษณะที่ยืดหยุ่นคือมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงได้(flexible) รูปร่างพื้นผิวที่มีลักษณะคงตัวจะพบได้ในแหล่งกำเนิด ไอออนแบบพื้นผิวและแบบใช้สนามไฟฟ้า ส่วนรูปร่างพื้นผิวที่มีลักษณะยืดหยุ่นได้จะพบได้ในแหล่งกำเนิดพลาสมา(plasma source) ในกรณีที่เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา พื้นผิวของการเปล่งแสง เรียกว่า เมนิคัส(meniscus) ซึ่งก็คือพลาสมาชนิดหนึ่ง รูปร่างลักษณะของเมนิคัสจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเงื่อนไขหลายประการ ได้แก่ ขอบเขตของสนามที่ป้อนให้กับระบบ ความหนาแน่นของไอออน และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา ตลอดจนจำนวนไอออนที่อยู่ในบริเวณพื้นผิว โดยที่ความตื้นลึกและตำแหน่งของเมนิคัส จะมีผลต่อลักษณะของลำไอออนที่ดึงออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



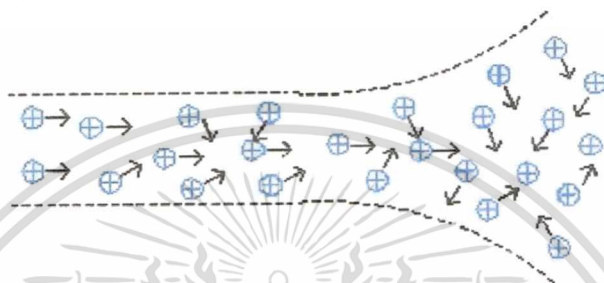
รูปที่ 3.2 ลักษณะลำไอออนที่ดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา

- ก. พลาสมามีความหนาแน่นมาก
- ข. พลาสมามีความหนาแน่นปานกลาง
- ค. พลาสมามีความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

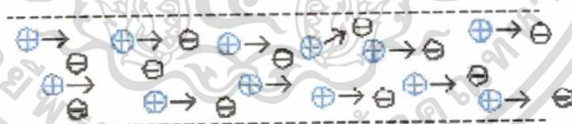
3) ความหนาแน่นประจุ

เมื่ออนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันมาอยู่รวมกันทำให้เกิดแรงผลักซึ่งกันและกัน เป็นผลให้ลำไอออนมีลักษณะบานออก การบานของลำไอออนเป็นปัญหาสำคัญ โดยเฉพาะกรณีที่กระแสลำไอออนมีค่าสูงแต่พลังงานมีค่าต่ำ เนื่องจากภายในลำไอออนมีความหนาแน่นของไอออนสูงมาก และไอออนที่มีพลังงานต่ำนั้น จะเคลื่อนที่ได้ช้าทำให้เมื่อเคลื่อนที่ได้เพียงระยะหนึ่งก็จะทำให้ลำไอออนนั้นบานออกเนื่องจากแรงผลักระหว่างประจุดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะการบานของลำไอออนกระแสสูงพลังงานต่ำ

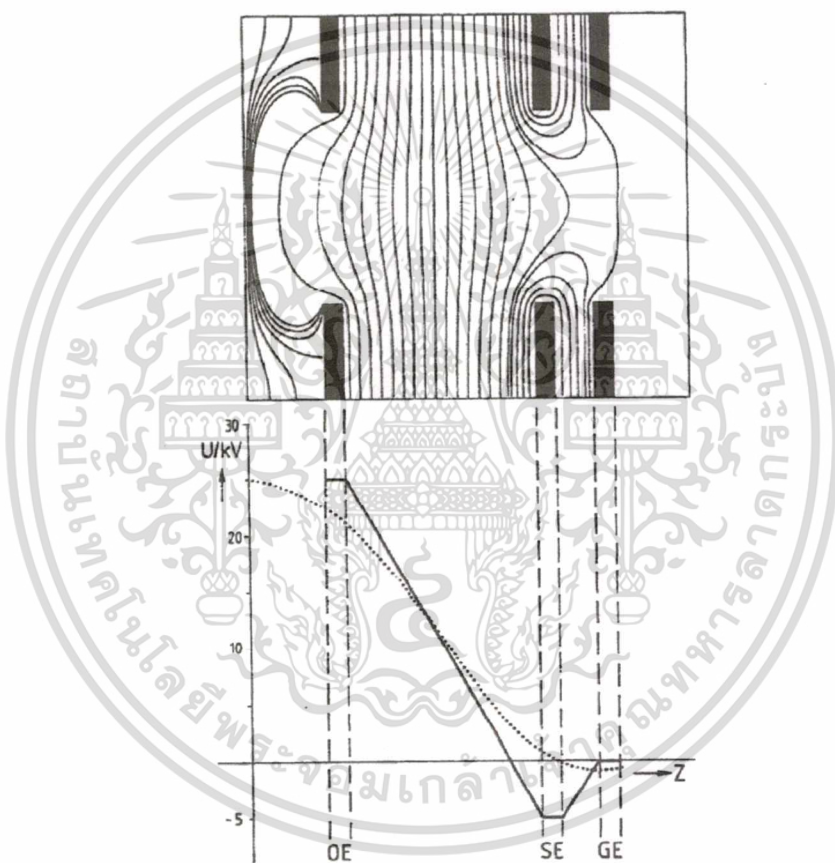
ผลของแรงผลักกันระหว่างประจุนี้สามารถลดลงได้โดยการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนภายในบริเวณช่องว่างของชุดตัวดึงไอออน (extraction gap) เพื่อเป็นการลดแรงผลักระหว่างประจุบวกภายในลำไอออน



รูปที่ 3.4 ลักษณะลำไอออนที่มีการลดแรงผลักกันระหว่างประจุด้วยอิเล็กตรอน

จำนวนอิเล็กตรอนในบริเวณช่องว่างของชุดตัวดึงไอออนสามารถสร้างเพิ่มขึ้นได้โดยการยอมให้มีอนุภาคของแก๊สหลงเหลือ (residual gas particle) อยู่ภายในช่องว่างของชุดตัวดึงไอออนบ้างเล็กน้อย อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นโดยกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการถูกชนโดยไอออน การเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนนี้ นอกจากจะมีผลคือทำให้ลำไอออนมีการบานน้อยแล้ว ยังมีผลเสียตามมาด้วยเช่นกัน ซึ่งก็คือ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าของระบบ

การดึงไอออนดึงให้วิ่งย้อนกลับเข้าสู่แหล่งกำเนิดพลาสมา ทำให้เกิดการหักล้างกับประจุบวกในพลาสมา เป็นผลให้ความหนาแน่นของไอออนในแหล่งกำเนิดพลาสมาลดลงอย่างมากและยังทำให้อิเล็กตรอนภายในระบบดึงไอออนน้อยลงตามไปด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนวิ่งกลับเข้าสู่แหล่งกำเนิดพลาสมา จึงต้องพยายามกักอิเล็กตรอนเหล่านี้ไว้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มขั้วไฟฟ้าให้กับระบบอีกหนึ่งขั้ว ขั้วไฟฟ้านี้เรียกว่า ขั้วไฟฟ้ากำบัง (screening electrode) และเรียกระบบการดึงไอออนแบบนี้ว่าระบบเร่ง-หน่วง (accel-decel system) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ากำบัง จะมีค่าเป็นลบเพียงพอที่จะทำให้เกิดบ่อศักย์ (negative potential well) และอิเล็กตรอนจะถูกกักกันโดยบ่อศักย์ดังกล่าวนี้



รูปที่ 3.5 รูปบน: ตัวอย่างระบบดึงแบบเร่ง-หน่วง และเส้นสมศักย์ของระบบเมื่ออยู่ในระบบสุญญากาศ

รูปล่าง: แผนภาพแสดงศักย์ไฟฟ้า (U) ตามแนวแกน Z

เส้นทึบ ขณะไม่มีลำไอออนเคลื่อนที่ผ่านระบบ

เส้นประ ขณะมีลำไอออนเคลื่อนที่ผ่านระบบ

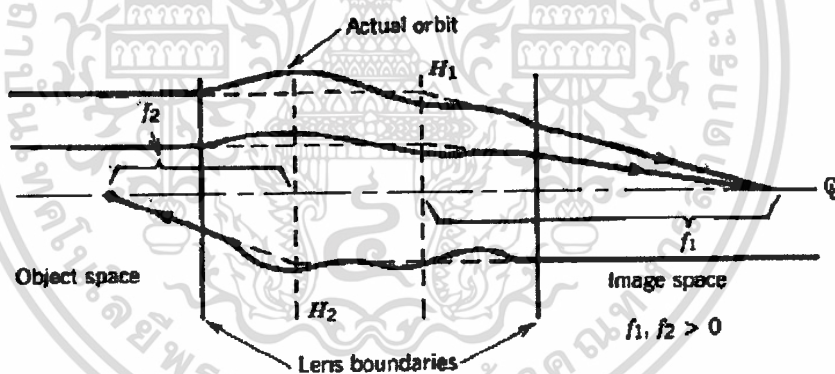
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ระบบการโฟกัสลำไอออน (Focusing ion beam system)

สำหรับวิธีการโฟกัสลำไอออนนั้น สามารถแบ่งตามเทคนิคและวิธีการ ได้สองประเภทกว้างๆ คือ การโฟกัสลำไอออนด้วยระบบเลนส์แม่เหล็ก (magnetics lenses) และการโฟกัสด้วยระบบเลนส์ไฟฟ้า (electrostatic lenses) หรือบางครั้งจะพบว่ามีการใช้เลนส์ทั้งสองประเภทควบคู่กันไป สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เลนส์ไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

3.2.1 สมบัติของเลนส์ [15]

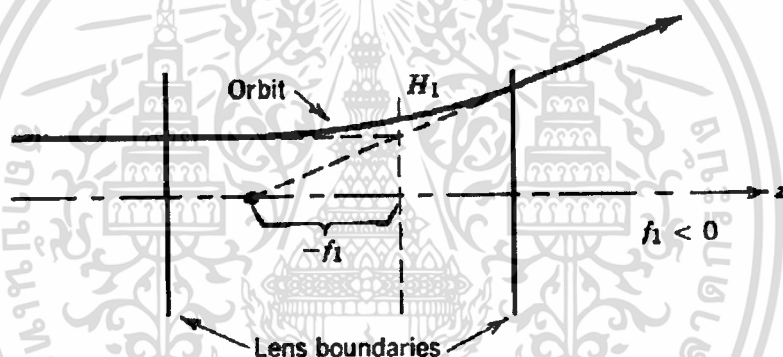
สำหรับกรณีเลนส์ทางแสงส่วนมากจะมีการประมาณค่าโดยให้เป็นเลนส์บาง (thin-lens approximation) ซึ่งจะพิจารณาว่ารังสีแสงจะถูกหักเห แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในแนวรัศมีเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเลนส์ แต่ในการประมาณค่าแบบเลนส์บางนั้นจะใช้ไม่ได้ในกรณีของเลนส์ไฟฟ้า เนื่องจากว่า เลนส์ไฟฟ้านั้นจะมีบริเวณของสนามไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ในการหักเหการเคลื่อนของไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านระบบเลนส์ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีเมื่อ ไอออนเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งจะเรียกเลนส์ลักษณะนี้ว่า เลนส์หนา



รูปที่ 3.6 ลักษณะของเลนส์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.6 แสดงเลนส์ไฟฟ้าซึ่งก็คือบริเวณของสนามไฟฟ้าที่มีการหักเห (หรืออาจจะเร่ง) ไอออน โดยไอออนจะมีการเคลื่อนที่แบบไม่มีความเร่งในบริเวณด้านนอกเลนส์บริเวณปลอดสนาม (field-free) ที่อยู่ด้านหน้าของเลนส์ จะเรียกว่า บริเวณวัตถุ (object space) ส่วนบริเวณปลอดสนามที่อยู่ด้านหลังเลนส์นั้น จะเรียกว่า บริเวณภาพ (image space) สำหรับเลนส์ไฟฟ้าจะทำหน้าที่ได้ทั้งสองด้านเหมือนกัน ดังนั้นบริเวณวัตถุและบริเวณภาพนั้นสามารถสลับที่กันได้

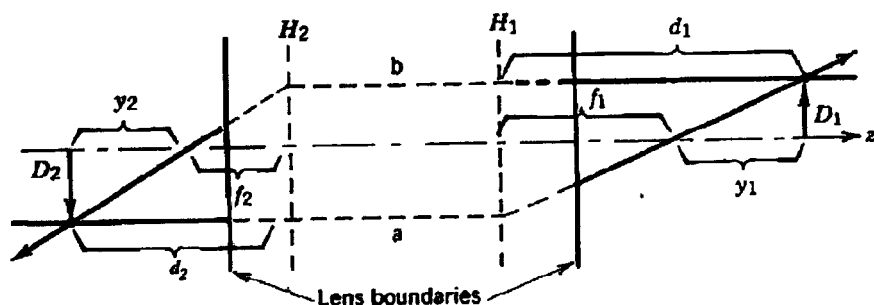
พิจารณาลำโอดอนที่ขนานเคลื่อนที่ผ่านเลนส์ในรูปที่ 3.6 จะได้รูปแบบคล้ายกับรูปสามเหลี่ยม ถ้าลากเส้นตรงตามแนวของโอดอนที่ออกจากเลนส์กลับเข้าไปในเลนส์ เพื่อให้ตัดกับเส้นตรงที่ลากตามแนวการเคลื่อนที่ของโอดอนเข้ามายังเลนส์ ณ ตำแหน่งนี้ จะได้ระนาบที่เรียกว่าระนาบหลักที่ 1 (principal plane, H_1) โดยระยะจาก H_1 ถึงจุดที่โอดอนเคลื่อนที่ตัดผ่านกัน เรียกว่าระยะโฟกัส f_1 (focal length, f_1) ซึ่งเมื่อทราบค่า H_1 และค่า f_1 ก็จะสามารถระบุแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ขนานเข้ามายังเลนส์ได้ ในทำนองเดียวกันสำหรับโอดอนที่เคลื่อนที่เข้ามายังเลนส์โดยมีแนวการเคลื่อนที่ขนานกับแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์แต่มีทิศตรงกันข้าม ก็จะได้ระนาบหลักที่ 2 (principal plane, H_2) และระยะโฟกัส f_2 จะไม่เท่ากันกับค่าที่ได้ในตอนแรก แต่จะมีค่าเป็นลบสำหรับเลนส์ไฟฟ้าที่มีความยาวโฟกัสเป็นลบแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเห็นได้จาก กรณียของเลนส์ไฟฟ้าเมื่อโอดอนถูกเร่งขึ้นหรือหน่วงลง ส่วนเลนส์บางสำหรับเลนส์ไฟฟ้านั้นจะมีตำแหน่งของระนาบหลักทั้งสองอยู่ในบริเวณสนามไฟฟ้าและอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน กล่าวคือเลนส์บางทางอนุภาคจะมีระนาบหลักเพียงระนาบเดียวเท่านั้น



รูปที่ 3.7 เลนส์ไฟฟ้าที่มีความยาวโฟกัสเป็นลบ

โดยปกติแล้วเลนส์จะมีอยู่สองพจน์ที่บ่งบอกถึงลักษณะของเลนส์คือ ค่ากำลังของเลนส์ (lens power) และ ค่าตัวเลขโฟกัส (f-number) กำลังของเลนส์จะอธิบายด้วยความสามารถในการบังคับวิถีการเคลื่อนที่ของโอดอน คือระยะโฟกัสที่สั้นจะบ่งบอกถึงกำลังของเลนส์ที่มีค่ามาก โดยกำลังของเลนส์จะผกผันกับระยะโฟกัส คือ $P = 1/f$ ซึ่งมีหน่วยที่ขึ้นอยู่กับหน่วยของระยะโฟกัส ส่วนค่าตัวเลขโฟกัส จะเป็นอัตราส่วนของระยะโฟกัสกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ คือ

$$f : \text{number} = f / D$$



รูปที่ 3.8 การเกิดภาพของเลนส์หนา

ในรูปที่ 3.8 แสดงการเกิดภาพโดยเลนส์ไฟฟ้า ซึ่งแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของไอออนในบริเวณภาพและบริเวณวัตถุจะขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของเลนส์และตำแหน่งของระนาบหลัก (principal plane) หรืออาจกล่าวได้ว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของไอออนออกจากเลนส์ไฟฟ้าจะอธิบายได้โดยระนาบหลักและระยะโฟกัส ซึ่งปริมาณทั้งสองนี้จะไม่บอกถึงรายละเอียดของแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของไอออนภายในเลนส์ไฟฟ้า พิจารณารูปลูกศรในรูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงถึงการกระจายความเข้ม (intensity distribution) ของลำไอออน สำหรับวัตถุรูปลูกศรความยาว D_2 อยู่ที่ตำแหน่งของระนาบวัตถุทำให้เกิดภาพรูปลูกศรที่ระนาบภาพมีความยาว D_1 โดยที่ระยะของระนาบที่เกิดภาพจะขึ้นอยู่กับระยะของระนาบวัตถุ ซึ่งระยะของระนาบภาพและระยะของระนาบวัตถุ (d_1 และ d_2) จะวัดเทียบกับตำแหน่งของระนาบหลัก (ในรูปที่ 3.8) และกำลังขยายของเลนส์ไฟฟ้ามีค่าเป็น $M_{21} = D_1 / D_2$

พิจารณากำลังขยายของเลนส์ไฟฟ้าสำหรับไอออนที่เคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา คือ $M_{21} = D_1 / D_2$ ถ้าอนุภาคเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้ามจะได้ว่า กำลังขยายมีค่าเป็น $M_{12} = D_2 / D_1$ นั่นคือจะได้

$$M_{21}M_{12} = 1 \quad (3.3)$$

จากรูปที่ 3.8 จากสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ว่า

$$D_1 / y_1 = D_2 / f_1, \quad D_1 / f_2 = D_2 / y_2 \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.4) จะได้ $f_1 f_2 = y_1 y_2$ ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในพจน์ของระยะห่างจากระนาบหลัก d_1 และ d_2 นั่นคือ $f_1 f_2 = (d_2 - f_2)(d_1 - f_1)$ ซึ่งจะได้สมการเลนส์หนา (thick-lens equation) ดังนี้

$$f_1/d_1 + f_2/d_2 = 1 \quad (3.5)$$

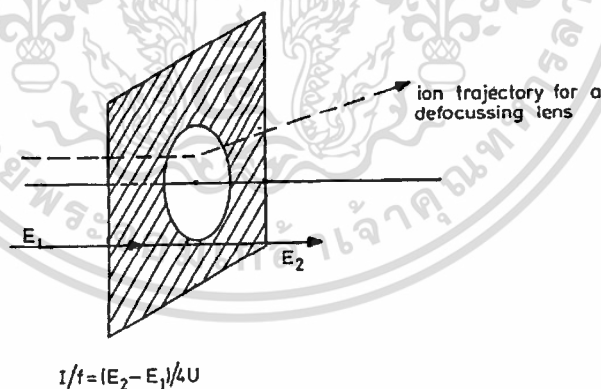
ในเลนส์ทางแสง ระยะโฟกัสของเลนส์อย่างง่ายจะไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ซึ่งในเลนส์ไฟฟ้าก็ยังมีสมบัติดังกล่าวด้วย ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่กำลังไอออนไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเลนส์ไฟฟ้า ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการ (3.5) ใหม่ได้เป็น

$$1/d_1 + 1/d_2 = 1/f \quad (3.6)$$

$$\text{เมื่อ } f_1 = f_2 = f$$

3.2.2 เลนส์ไฟฟ้า (Electrostatic Lenses) [4]

เลนส์ไฟฟ้าอย่างง่ายที่พบได้ทั่วไปจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมบางและมีช่องเจาะทะลุเป็นรูปกลมอยู่ตรงกลางเพื่อให้ลำไอออนเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งแผ่นกลมบางดังกล่าวนี้จะทำหน้าที่แยกสนามไฟฟ้าระหว่างสองบริเวณให้มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยที่สนามไฟฟ้าในแนวรัศมีจะเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านเลนส์ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการโฟกัสของเลนส์ สำหรับการโฟกัสของเลนส์ไฟฟ้าหรือไม้นั้นจะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าในแต่ละด้านของเลนส์



รูปที่ 3.9 เลนส์ไฟฟ้าอย่างง่าย

จากรูปที่ 3.9 ระยะโฟกัสของเลนส์จะหาได้จากสมการ (3.7)

$$f = \frac{2V(2V_o + V)}{(V + V_o)(V'_2 - V'_1)} \quad (3.7)$$

เมื่อ $V'_1 = E_1$ คือ สนามไฟฟ้าหน้าของเลนส์

$V'_2 = E_2$ คือ สนามไฟฟ้าด้านหลังของเลนส์

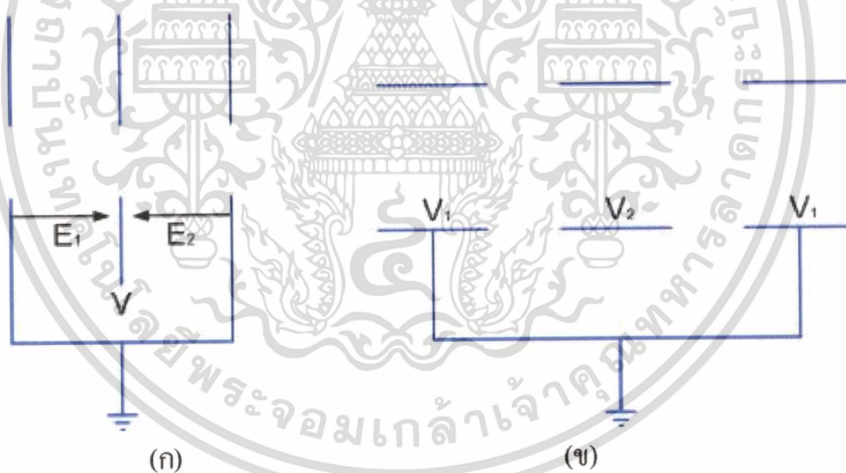
$V = \int_{z_0}^z E_z$ คือ ศักย์ไฟฟ้าตามขวาง (potential transverse) ที่เกิดจากไอออนซึ่งอยู่ที่

ตำแหน่งที่มีค่าพลังงานจลน์เป็นศูนย์

$V_o = \frac{mc^2}{Ze}$ เมื่อ Z คือ จำนวนของประจุ

เมื่อพิจารณาในกรณีที่ไอออนเคลื่อนด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วแสงมากๆ จะได้ความสัมพันธ์ของระยะโฟกัสกับสนามไฟฟ้าทั้งสองด้านดังสมการ

$$f = 4V_1(V'_2 - V'_1) \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.10 ชนิดของเลนส์ไอออนเซล

(ก) ไอออนเซลเลนส์

(ข) เลนส์ทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

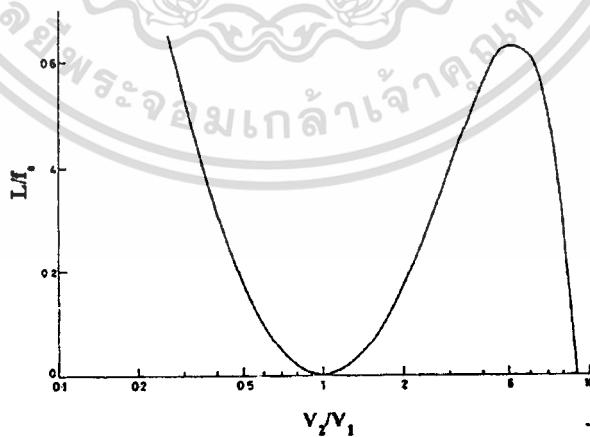
เลนส์ในรูปที่ 3.10 คือเลนส์ไอน์เซล (einzel lenses) ซึ่งประกอบด้วยท่อทรงกระบอกกลมหรือแผ่นจานกลม โดยที่พีซ (Pierce) ได้หาความสัมพันธ์ของความยาวโฟกัสของเลนส์ไอน์เซลที่ประกอบด้วยแผ่นจานกลมบางสามแผ่น กับระยะห่างระหว่างแผ่นเลนส์และศักย์ไฟฟ้าของแต่ละแผ่น ได้ดังสมการ

$$\frac{L}{f_e} = \frac{3}{8} \left(\frac{V_2}{V_1} - 1 \right) \left[4 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1/2} - 3 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{1/2} \right] \quad (3.9)$$

เมื่อ L คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นเลนส์
 V_1 คือ ศักย์ไฟฟ้าของเลนส์แผ่นแรกและแผ่นสุดท้าย
 V_2 คือ ศักย์ไฟฟ้าของเลนส์ตรงกลาง
 f_e คือ ระยะโฟกัสของเลนส์ไอน์เซล

และระนาบแกนหลัก (principal plane) จะอยู่ที่ระยะ d_e ห่างจากจุดศูนย์กลางของเลนส์ กำหนดโดย

$$\frac{d_e}{L} = \frac{4}{\left[3 - (V_2/V_1)^{1/2} \right] \left[(V_2/V_1)^{1/2} + 1 \right]} - 1 \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า L/f_e กับ V_2/V_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่า L/f_e หนึ่งค่าจะได้จากค่า V_2/V_1 หลายค่าซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า มีค่า V_2/V_1 มีได้หลายค่าที่สามารถทำให้เกิดการโฟกัส และสำหรับเลนส์ที่มีความสามารถในการโฟกัสที่คือนั้น ผลต่างระหว่างความสามารถในการโฟกัสของแผ่นเลนส์ที่อยู่ด้านนอกกับแผ่นเลนส์ตรงกลางจะต้องมีค่าน้อยๆ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความสามารถในการโฟกัสของเลนส์จะขึ้นอยู่กับขนาดของเลนส์ ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากการพิจารณาสมการ (3.9) ในกรณีที่ $(V_2 - V_1) = \delta$ มีค่าน้อยๆ เทียบกับ V_1 จะได้ว่า

$$\frac{L}{f_e} \approx \frac{3}{8} \frac{\delta^2}{V_1^2} \quad (3.11)$$

ซึ่งจะมีค่าที่เป็นบวกเสมอหรือกล่าวได้ว่าเลนส์มีการโฟกัส ส่วนในกรณีที่ค่า V_2/V_1 มีค่ามากๆ เลนส์ที่ได้จะไม่เกิดการโฟกัส แต่ก็มีกรณีนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการเพิ่มพลังงานของลำไอออน เพราะว่ามีพลังงานของลำไอออนเมื่อผ่านออกมาจากเลนส์มีค่าที่สูงขึ้นกว่าเดิมมาก เนื่องจากว่าศักย์ไฟฟ้าที่แผ่นเลนส์ตรงกลางมีค่าที่สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่แผ่นเลนส์ด้านนอกมากนั่นเอง

3.3 การวัดกระแสไอออน [16]

ปัจจุบันมีการนำเอาไอออนไปประยุกต์ใช้งานจำนวนมากในงานด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น การพัฒนาในระบบการผลิตทางอุตสาหกรรมหรือการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำการสร้างแหล่งกำเนิดไอออนให้มีลำไอออนออกมามีความต้องการสำหรับประยุกต์ใช้งาน จึงจำเป็นต้องตรวจสอบพารามิเตอร์หลักที่บ่งชี้ถึงสมบัติของลำไอออน โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญของลำไอออน ได้แก่

1. กระแสไอออน (ion current)
2. รูปร่างลำไอออน (Beam Profile)
3. ขนาดลำไอออน (Beam size)
4. การกระจายพลังงาน (Energy distribution)

ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงวิธีการวัดกระแสไอออน ส่วนการวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนนั้นจะต้องอาศัยการวัดค่ากระแสไอออนรวมอยู่ด้วย เพียงแต่แตกต่างกันที่มีวิธีการวัดและวิเคราะห์ข้อมูลเท่านั้น

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการวัดกระแสไอออน ก็คือระดับพลังงานของลำไอออน ความหนาแน่นของลำไอออน กำลังของลำไอออน และอัตราการบันทึกผลของเครื่องมือวัด โดยหลักแล้วการวัดกระแสไอออนจะแยกออกเป็นสองเทคนิคด้วยกัน ได้แก่ การวัด

แบบทำลาย (Destructive Measurement) และการวัดแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Measurement) โดยการวัดแบบทำลายหมายถึง การวัดที่มีการขัดขวางการเคลื่อนที่ของลำไอออนที่ทำการวัด เช่น การวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์ ส่วนการวัดแบบไม่ทำลายหมายถึงการวัดที่ไม่มีการขัดขวางการเคลื่อนที่ของลำไอออนที่ทำการวัด เช่น การวัดกระแสไอออนด้วยทรานสฟอร์มเมอร์กระแส (current transformer) สำหรับรายงานฉบับนี้นั้นจะกล่าวถึงวิธีการวัดกระแสไอออนด้วยถ้วยฟาราเดย์ (faraday cup) ซึ่งเป็นการวัดแบบทำลายเท่านั้น

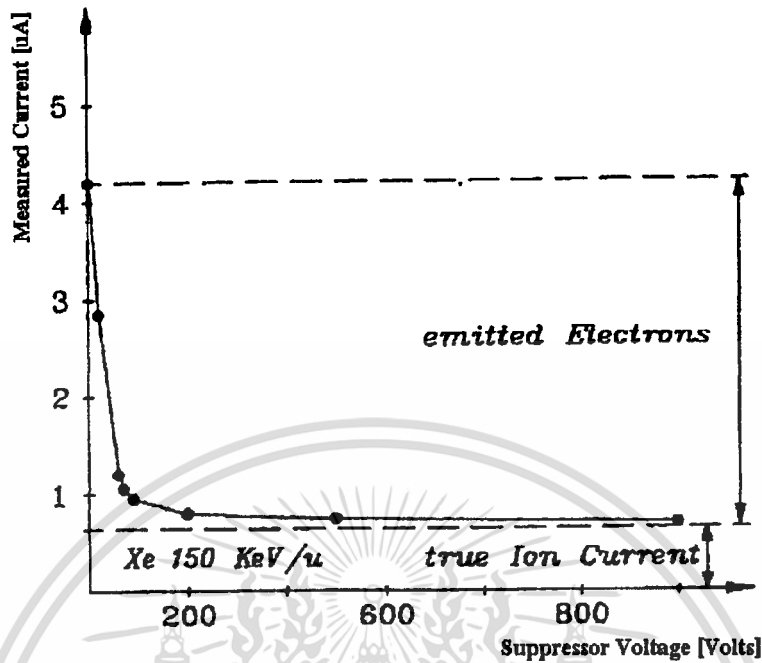
ถ้วยฟาราเดย์เป็นเครื่องมือวัดกระแสไอออนที่ใช้กัน โดยทั่วไป ถ้วยฟาราเดย์ทำด้วยโลหะ ต่อลงกราวด์ผ่านตัวต้านทานที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว เมื่อ ไอออนบวกวิ่งเข้าชนผนังของถ้วยฟาราเดย์ จะทำให้ถ้วยฟาราเดย์มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อเทียบกับกราวด์ เป็นผลให้อิเล็กตรอนจากกราวด์เคลื่อนที่มายังถ้วยฟาราเดย์เกิดการหักล้างกับประจุบวกของไอออน เกิดเป็นอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าในรูปของแก๊ส ซึ่งจะถูกดูดออกจากระบบโดยปั๊มสุญญากาศ การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่มายังถ้วยฟาราเดย์นั้น จะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยการวัดความต่างศักย์นี้ และจากการที่ทราบค่าที่แน่นอนของตัวต้านทาน ทำให้สามารถคำนวณกระแสได้ หรือจะวัดกระแสโดยตรงด้วยแอมป์มิเตอร์ก็ได้ ซึ่งกระแสนี้ก็คือกระแสไอออนนั่นเอง สำหรับการวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์จะมีปรากฏการณ์ที่ต้องคำนึงถึง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการวัดกระแสลำไอออนมีค่าผิดพลาด ดังนี้

- มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิหรืออนุภาคอื่น จากถ้วยฟาราเดย์
- เกิดการแตกตัวของแก๊สที่อยู่ภายในถ้วยฟาราเดย์
- เกิดกระแสรั่วไหลเนื่องจากความเสื่อมของวัสดุที่เป็นฉนวน อันเนื่องมาจากถูกเคลือบด้วยฟิล์มโลหะจากการสปัตเตอร์ หรือ อุณหภูมิที่มีค่าสูงมาก
- เกิดกระแสรั่วไหลเนื่องจากการนำไฟฟ้าของระบบหล่อเย็น
- ความร้อนที่มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากกำลังของลำไอออนมีค่าสูง

เนื่องจากฟลักซ์ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าแปรผันกับ $\cos\theta$ โดย θ เป็นมุมระหว่างทิศทางของอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับแนวแกนลำไอออน ดังนั้นฟลักซ์ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (flux of secondary electron, f) ที่วิ่งออกจากถ้วยจึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความกว้างของปากถ้วย (R) กับความลึกของถ้วย (L_{FC}) ซึ่งสามารถประมาณค่าได้เป็น

$$f \approx \frac{\sin^2 \theta_1}{2} = \frac{R^2}{2(R^2 + L_{FC}^2)} \quad (3.12)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{R}{L_{FC}}\right) \quad (3.13)$$



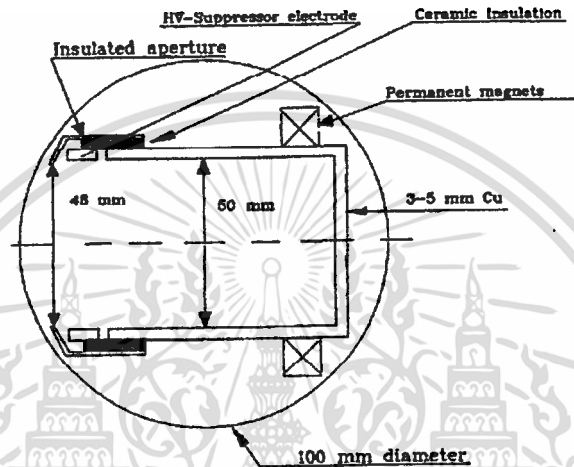
รูปที่ 3.12 ผลของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ากักกัน (suppressor voltage) ที่มีต่อค่ากระแสที่วัดได้

เพื่อลดจำนวนของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วิ่งออกจากถ้วยฟาราเดย์ ในการออกแบบถ้วยฟาราเดย์จึงต้องออกแบบให้ $L_{FC} \gg R$ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ทางปฏิบัติ แต่จำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วิ่งออกจากถ้วยฟาราเดย์สามารถลดลงได้โดยการใช้สนามไฟฟ้ากักกัน ซึ่งทำได้โดยใส่ขั้วไฟฟ้ากักกัน (suppressor electrode) ไว้ข้างหน้าถ้วย จากรูปที่ 3.11 แสดงค่ากระแสไอออนของซีนอนที่มีค่าพลังงาน 150 keV/u โดยกระแสที่วัดได้จากถ้วยจะมีค่าขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้ากักกัน ประสิทธิภาพในการกักกันอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะดีขึ้นถ้ามีสนามแม่เหล็กมาช่วยทำให้อิเล็กตรอนโคจรอยู่ด้วยรัศมีที่น้อยกว่าความกว้างของปากถ้วย ดังสมการ

$$\rho_e = \frac{\sqrt{2m_e E_e}}{eB} \approx 3.37 \frac{\sqrt{E_e}}{B} \quad (3.14)$$

- เมื่อ ρ_e คือ รัศมีการ โคจรของอิเล็กตรอน (มิลลิเมตร)
 E_e คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน (อิเล็กตรอนโวลต์)
 B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (มิลลิเทสลา)

รูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างของถ้วยฟาราเดย์แบบไม่มีระบบหล่อเย็น โครงสร้างนี้มีการลดความผิดพลาดเนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการใช้ขั้วไฟฟ้ากักกันและยังลดผลเนื่องจากการสปีดเตอร์ซึ่งเป็นต้นเหตุให้เกิดกระแสรั่วไหลด้วยการใส่ฉนวนเซรามิก โดยทั่วไปเมื่อมีอนุภาคไอออนที่มีพลังงานเพียงพอตกกระทบถ้วยฟาราเดย์ จะทำให้เกิดการสปีดเตอร์ ค่าyieldของการสปีดเตอร์สำหรับโลหะจะมีค่ามากขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาทำถ้วยฟาราเดย์และพลังงานของไอออนที่ตกกระทบ



รูปที่ 3.13 โครงสร้างของถ้วยฟาราเดย์แบบไม่มีระบบหล่อเย็น

บทที่ 4

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ จะมีส่วนประกอบหลักได้แก่ ระบบสุญญากาศ แหล่งกำเนิดไอออน ระบบคิงไอออน และระบบไฟกัสน้ำไอออน ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบสร้างในแต่ละส่วนต่อไป

4.1 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศมีความจำเป็นสำหรับการออกแบบสร้างและศึกษาพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนในระดับต้นๆ เนื่องจากแหล่งกำเนิดพลาสมาและการคิงไอออนนั้นไม่สามารถกระทำได้ที่สภาวะความดันบรรยากาศปกติทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากความต้องการแหล่งกำเนิดพลาสมาที่มาจากแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่งซึ่งในที่นี้เป็นแก๊สอาร์กอน และการที่ไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้สภาวะความดันสูง โดยปราศจากการชนกับโมเลกุลหรืออะตอมของแก๊สอื่น โดยทั่วไประบบสุญญากาศจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ระบบปั๊มสุญญากาศซึ่งทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากระบบ และแอมเบอร์สุญญากาศซึ่งเป็นภาชนะปิดป้องกันอากาศรั่วไหลเข้าสู่ระบบ

4.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ

การเลือกใช้งานระบบปั๊มสุญญากาศในการสร้างและพัฒนาแหล่งกำเนิด จะต้องมีความเหมาะสมกับขนาดของแอมเบอร์สุญญากาศ โดยต้องคำนึงถึงอัตราการปั๊มของระบบว่าจะต้องมีค่าสูงพอที่จะรักษาระดับความดันให้อยู่ในระดับที่ต้องการหรือเหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อไป สำหรับงานวิจัยนี้ระบบปั๊มจะประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศสองชนิด คือ ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (diffusion pump) และ ปั๊มโรตารี (rotary pump)

4.1.1.1 ปั๊มไอฟุ้งกระจาย

งานวิจัยนี้เลือกใช้ปั๊มไอฟุ้งกระจายรุ่นดิฟสแต็ค 160/700 (Diffstak 160/700) ของบริษัทเอดวาร์ด (Edwards) มีความเร็วในการปั๊มที่ปากของปั๊ม 700 ลิตรต่อวินาที ในการใช้งานจะต้องมีการต่อท่อเชื่อมระหว่างตัวปั๊มกับแอมเบอร์สุญญากาศ (vacuum chamber) เป็นผลให้ความเร็วปั๊มที่แท้จริงที่เรียกว่า ความเร็วปั๊มยังผล (effective pumping speed) ของระบบมีค่าลดลง [17] ซึ่งสามารถคำนวณได้ ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- เมื่อ S_e คือ ความเร็วปั๊มยังผล
 S_p คือ ความเร็วปั๊มของปั๊มไอฟุ้งกระจาย
 C คือ ค่าความนำ (conductance) ของท่อ

สำหรับงานวิจัยนี้ ท่อต่อระหว่างแชนเบอร์สุญญากาศกับตัวปั๊มไอฟุ้งกระจาย มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 มิลลิเมตร ยาว 10 เซนติเมตร จากตารางค่าความนำ จะได้ว่าท่อมีความนำ 1484 ลิตรต่อวินาที ดังนั้นจากสมการ (4.1) จะได้ว่า

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

$$S_e = 475.64 \quad \text{ลิตรต่อวินาที} \quad (4.2)$$

4.1.1.2 ปั๊มโรตารี (Rotary pump)

สำหรับปั๊มโรตารีการคำนวณความเร็วปั๊มหาได้จากสมการ (4.3)

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

- เมื่อ S_{rot} คือ ความเร็วปั๊มของปั๊มโรตารี
 Q_{max} คือ อัตราการส่งผ่านสูงสุด (maximum throughput)
 CBP คือ ความดันท้ายวิกฤติ (critical backing pressure)

Q_{max} หาได้จากกราฟแสดงอัตราการปั๊ม (pump curve) โดยทั่วไปที่ความดัน 10^{-2} มิลลิบาร์ จะมีความเร็วปั๊ม 60 ลิตรต่อวินาที ดังนั้น $Q_{max} = (60 \text{ l/s})(10^{-2} \text{ mbar}) = 0.6 \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ สำหรับ CBP เป็นสมบัติของน้ำมันที่ใช้กับปั๊ม ซึ่งในที่นี้เลือกใช้น้ำมันเบอร์ 704EU ของบริษัทเทควาร์ด มีค่า $CBP = 0.8 \text{ mbar}$ จากสมการที่ 4.3 จะได้ว่า

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

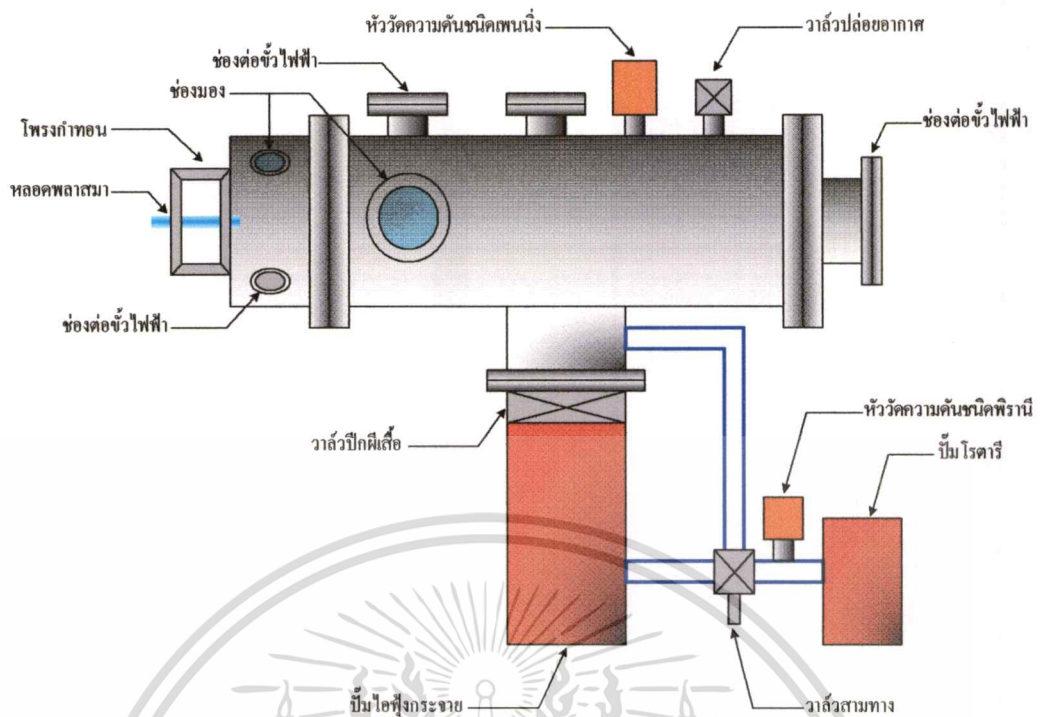
ดังนั้นจึงเลือกใช้ปั๊มโรตารีแวน (Rotary Vane Pump) รุ่น RV12 ของบริษัทเอควาร์ด ซึ่งมีความเร็วปั๊ม 12 m³/hr

4.1.2 แคมเบอร์สุญญากาศ

แคมเบอร์สุญญากาศเป็นบริเวณที่ใช้สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์วัดขนาดลำไอออน ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกระบอกกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.19 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร ทำมาจากสแตนเลสวางอยู่ในแนวนอน โดยที่ปลายทั้งสองด้านเป็นหน้าแปลนขนาด ASA200 ซึ่งสามารถปรับต่อเพิ่มเติมได้อีกเมื่อต้องการ ปลายด้านหนึ่งถูกปิดด้วยหน้าแปลนลดขนาดจากหน้าแปลน ASA200 ไปเป็น DN100CF ซึ่งใช้ต่อเข้ากับฟีดทรู (feed-through) ที่เป็นขั้วไฟฟ้าจำนวนห้าช่องสำหรับการเชื่อมต่อกับมอเตอร์ขับเคลื่อนของชุดสแกนลำไอออนที่ติดตั้งอยู่ภายในแคมเบอร์ ส่วนปลายอีกด้านจะถูกปิดด้วยหน้าแปลนขนาดเดียวกันของแคมเบอร์อีกส่วน ซึ่งใช้สำหรับการติดตั้งระบบฟลักซ์ลำไอออน โดยในแคมเบอร์ส่วนนี้จะมีพอร์ตสำหรับต่อขั้วไฟฟ้า 4 ช่องแบ่งเป็น พอร์ตขนาด NW40 3 ช่อง พอร์ตขนาด NW50 1 ช่อง ด้านปลายปิดของแคมเบอร์ส่วนนี้จะเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรสำหรับการติดตั้งหลอดแก้วควอดซ์ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้กำเนิดพลาสมา สำหรับด้านบนของแคมเบอร์จะมีพอร์ตขนาด NW50 NW25 และ NW10 สำหรับติดตั้งขั้วไฟฟ้า หัววัดความดันและวาล์วปล่อยอากาศ(leak valve) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีช่องมอง (sight glass) ขนาด ASA100 ที่ด้านข้างของแคมเบอร์ด้วย

ส่วนหัววัดความดันในระบบ จะใช้หัววัดความดันของบริษัทเอควาร์ด 2 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีย่านในการวัดที่แตกต่างกัน คือ หัววัดพิรานี (Pirani Gauge) ใช้ความดันในช่วงความดันบรรยากาศจนถึงไม่ต่ำกว่า 10⁻³ mbar และหัววัดชนิดเพนนิ่ง (Penning Gauge) สำหรับวัดความดันในช่วง 10⁻³ – 10⁻⁷ mbar

สำหรับโครงสร้างและตำแหน่งของการติดตั้งแหล่งกำเนิดไอออนเข้ากับระบบสุญญากาศ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบสุญญากาศ

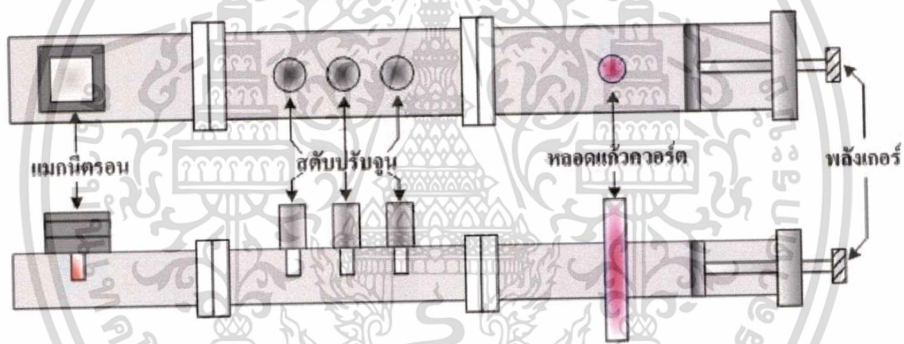
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 โครงสร้างแหล่งกำเนิดไอออน

แหล่งกำเนิดไอออนสำหรับงานวิจัยนี้ จะได้จากแหล่งกำเนิดพลาสมาซึ่งถูกกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ และระบบบดิ่งลำไอออน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 แหล่งกำเนิดพลาสมา

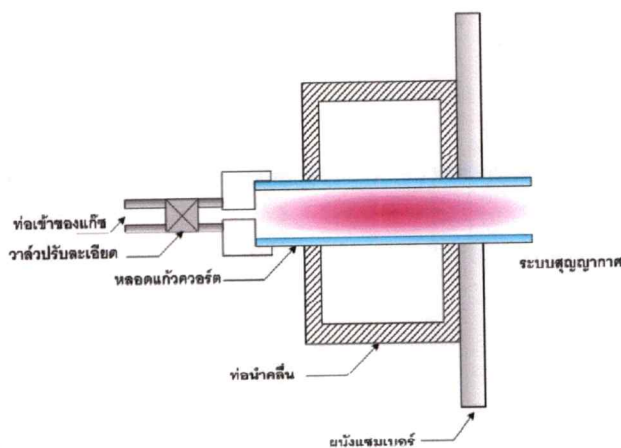
แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งออกแบบสร้างในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยแมกนีตรอน ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ส่งเข้าสู่ท่อนำคลื่นปลายปิดทำหน้าที่เป็นโพรงกำเนิดพลาสมา ซึ่งด้านหนึ่งมีปลั๊กเกอร์ที่สามารถปรับเลื่อนเพื่อเปลี่ยนขนาดความยาวของโพรงกำเนิดพลาสมาได้ โดยที่คลื่นไมโครเวฟจะเกิดการกำเนิดพลาสมาในโหมด TE_{106} สำหรับท่อนำคลื่นที่ใช้จะเป็นท่อนำคลื่นไมโครเวฟชนิด WR 340 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดขนาด 86.4×43.2 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งในรูปที่ 4.2 จะแสดงลักษณะของโพรงกำเนิดพลาสมาที่ได้จากท่อนำคลื่นดังกล่าว รวมถึงตำแหน่งของการติดตั้งแมกนีตรอน ตัวสลับปรับจูน (stub tuner) ท่อแก้วควอร์ต



รูปที่ 4.2 ลักษณะของโพรงกำเนิดพลาสมาและตำแหน่งการติดตั้งแมกนีตรอน ตัวสลับปรับจูนและท่อแก้วควอร์ต

4.2.2 ระบบจ่ายแก๊ส

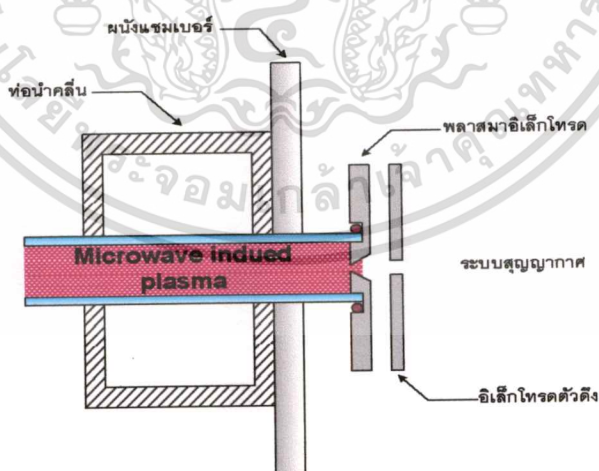
แก๊สจะถูกจ่ายผ่านระบบวาล์วเข้าสู่ปลายด้านหนึ่งของท่อแก้วซึ่งเป็นแชมเบอร์ดิสชาร์จติดตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งที่ได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟมากที่สุด ปริมาณแก๊สในท่อจะถูกควบคุมด้วยวาล์วปรับละเอียด (needle valve) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของท่อแก้วจะต่อเข้ากับแชมเบอร์สุญญากาศ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แก๊สอาร์กอน แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ระบบจ่ายแก๊ส

4.2.2 ระบบคิงไอออน

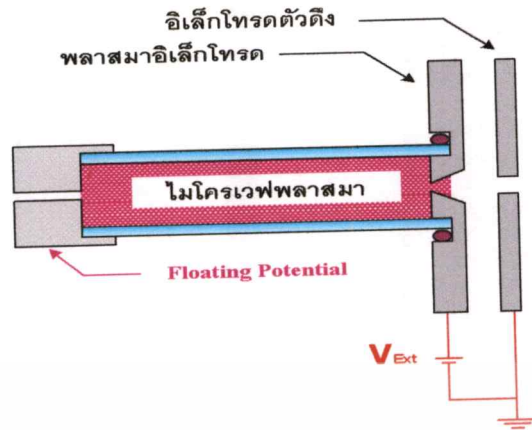
ระบบคิงไอออนประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ขั้วแรกอยู่ติดกับพลาสมา เรียกว่าพลาสมาอิเล็กโทรด (plasma electrode) ทำมาจากเสตนเลสมีลักษณะเป็นจานกลม เจาะรูตรงกลางโดยบานออกเป็นรูปกรวย โดยด้านที่อยู่ติดกับพลาสมามีขนาดเล็กกว่า ส่วนขั้วที่สองมีลักษณะเป็นแผ่นจานกลมทำมาจากเสตนเลสเช่นกัน แต่ต่างกันที่รูกลมที่เจาะรูตรงกลาง มีลักษณะเป็นรูตรงต่างจากแผ่นแรก ซึ่งขั้วไฟฟ้าขั้วนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวดึง ไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมา จึงเรียกว่าอิเล็กโทรดตัวดึง (extractor electrode) ลักษณะการประกอบแผ่นขั้วไฟฟ้าทั้งสองเป็นระบบคิงไอออนแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ระบบคิงไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

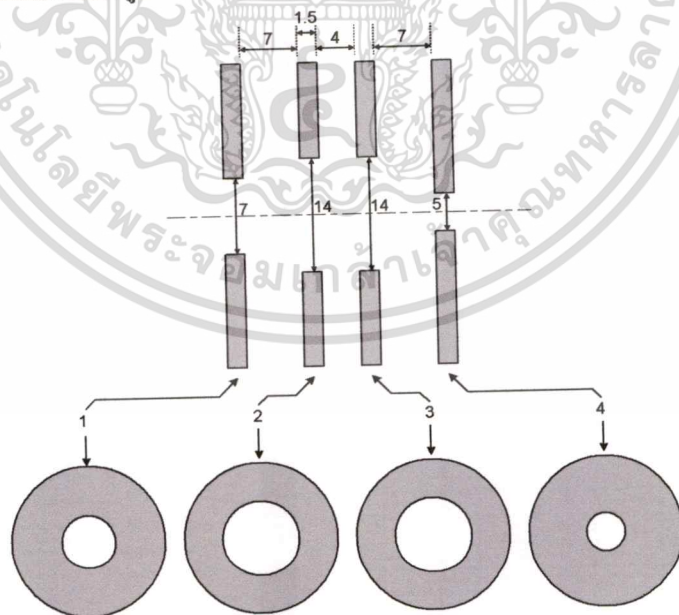
สำหรับการต่อวงจรไฟฟ้าให้กับแต่ละขั้วไฟฟ้าในระบบคิงไอออนแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การต่อวงจรไฟฟ้าในระบบคิงไอออน

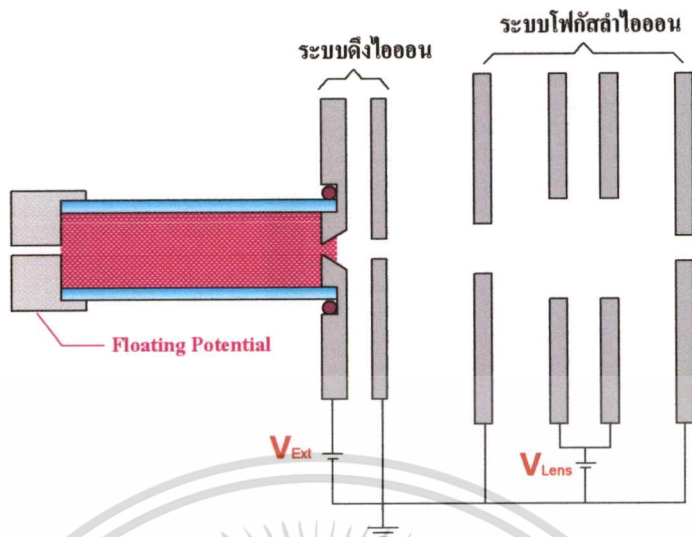
4.3 ระบบโฟกัสลำไอออน

ระบบโฟกัสลำไอออนจะเป็นเลนส์ไฟฟ้า (electrostatics lenses) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสี่ขั้วแต่ละขั้วมีลักษณะเป็นแผ่นจานกลมเจาะรูตรงกลาง ทำมาจากโลหะแอสแตนเลสหนา 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดและรูปร่างของเลนส์แต่ละชิ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ส่วนการต่อวงจรไฟฟ้าให้กับระบบเลนส์แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ขนาดและรูปร่างของเลนส์แต่ละชิ้นในระบบโฟกัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



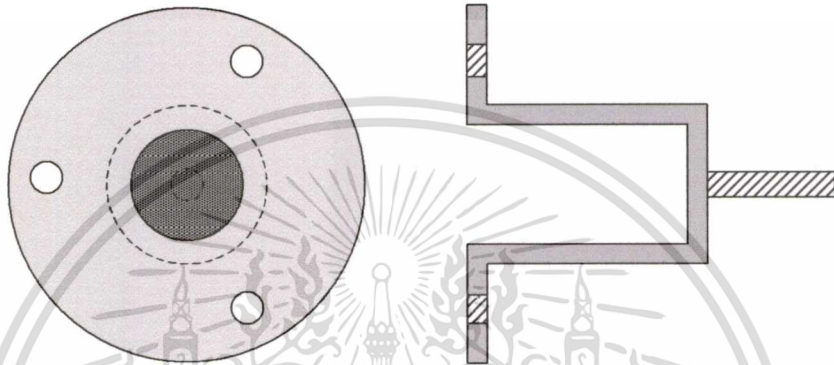
รูปที่ 4.7 การต่อวงจรไฟฟ้าในระบบโฟกัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ระบบวัดขนาดลำไอออน

4.4.1 ถ้วยฟาราเดย์

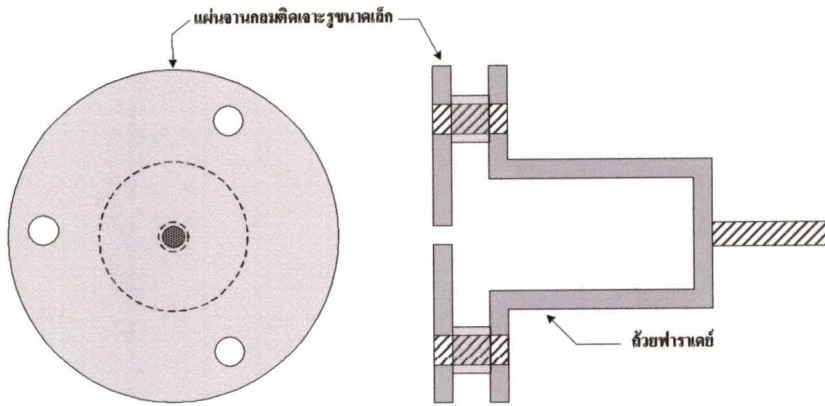
ถ้วยฟาราเดย์เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้วัดกระแสไอออน โดยออกแบบให้สามารถติดตั้งได้ง่าย มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกกลมคล้ายถ้วยดังรูปที่ 4.8 ทำจากโลหะเสตนเลส เมื่อมีไอออนวิ่งเข้าชนถ้วยจะทำให้เกิดกระแสที่สามารถวัดได้ด้วยแอมป์มิเตอร์



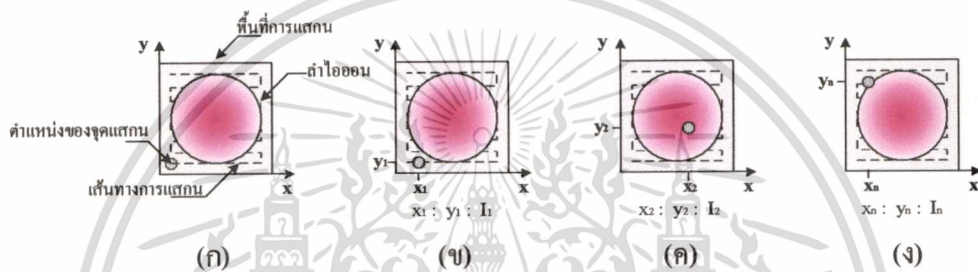
รูปที่ 4.8 รูปร่างของถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้วัดกระแสไอออน

4.4.2 การวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็ม [18]

การวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็มจะประกอบด้วยถ้วยฟาราเดย์ซึ่งทำหน้าที่วัดกระแสลำไอออน และแผ่นจานกลมที่มีรูเจาะทะลุขนาดเล็กลูกเต๋าคิดตั้งอยู่ด้านหน้าของถ้วยฟาราเดย์ดังรูปที่ 4.9 โดยจะทำการเคลื่อนกวาด (scan) ตำแหน่งของการวัดจนครอบคลุมบริเวณของลำไอออน ที่แต่ละตำแหน่งของการวัดจะทำการบันทึกค่ากระแสของลำไอออนที่สามารถวัดได้ด้วยถ้วยฟาราเดย์ โดยมีลักษณะการวัดแสดงดังรูปที่ 4.10 ดังนั้นเมื่อทำการเคลื่อนกวาดจนเต็มพื้นที่บริเวณของลำไอออน ก็จะสามารถนำข้อมูลที่เป็นค่ากระแสที่ได้กับตำแหน่งของการวัดมาเขียนแสดงความสัมพันธ์ในรูปกราฟสามมิติ ที่บ่งบอกถึงรูปร่าง (profile) และขนาดของลำไอออนได้



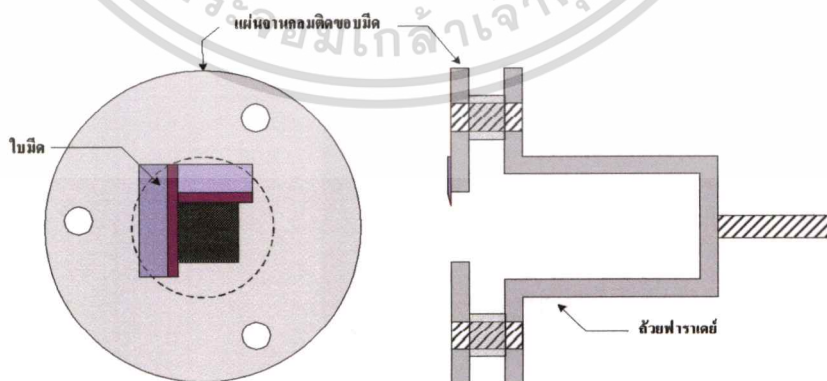
รูปที่ 4.9 ถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้สำหรับวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีกาวครุเข็ม



รูปที่ 4.10 ลักษณะการวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีกาวครุเข็ม

4.4.3 การวัดขนาดลำไอออนด้วยวิธีขอบมีด

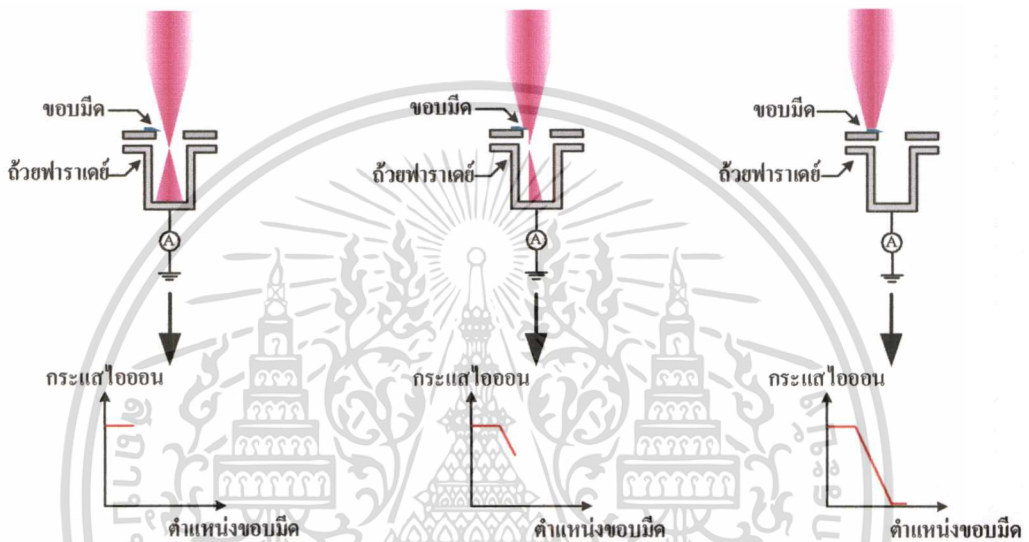
การวัดขนาดของลำไอออนวิธีนี้จะประกอบไปด้วย ถ้วยฟาราเดย์ ซึ่งทำหน้าที่วัดกระแสของลำไอออน และขอบมีด(knife-edge) ที่สามารถเลื่อนได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งสามารถควบคุมการปรับเลื่อนตำแหน่งของขอบมีดได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 4.11 ถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้สำหรับการวัดขนาดของลำไอออนด้วยวิธีขอบมีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการวัดลำไอออนด้วยวิธีนี้ จะทำการเลื่อนโบบีมัดตัดผ่านลำไอออน ที่มีกระแสที่วัดค่ากระแสด้วยฟาราเดย์คัพ โดย ณ ตำแหน่งของโบบีมัดที่ยังไม่ตัดลำไอออน ค่ากระแสที่วัดได้โดยฟาราเดย์คัพจะมีค่าสูงสุด และเมื่อมีการเลื่อนตำแหน่งของขอบคมจนตัดผ่านลำไอออน ค่ากระแสที่วัดได้โดย ถ้วยฟาราเดย์ ก็จะมีค่าลดลง จนในที่สุด เมื่อตำแหน่งของขอบคมเลื่อนมาบังลำไอออนจนหมด ค่ากระแสที่วัดได้นั้น จะมีค่าต่ำสุด ซึ่งจะมีการเก็บบันทึกค่าตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของขอบคมและค่ากระแสที่วัดได้จากถ้วยฟาราเดย์ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าขนาดของลำไอออนต่อไป สำหรับลักษณะการวัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



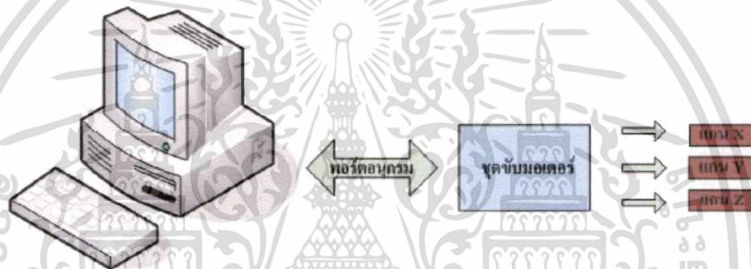
รูปที่ 4.12 ลักษณะการวัดขนาดลำไอออนด้วยวิธีขอบมิด

สำหรับความละเอียดในการวัดขนาดของลำไอออนนั้นจะขึ้นอยู่กับความเรียบของขอบมิดที่ใช้และระบบที่ใช้ในการเลื่อนตำแหน่งของขอบมิดคือถ้าสามารถปรับเลื่อนตำแหน่งของขอบคมได้ละเอียดและแม่นยำสูง ความสามารถในการวัดขนาดของการวัดก็จะมีขนาดสูงและแม่นยำขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ขอบมิดที่ใช้ก็ต้องมีความเรียบสูงด้วยเช่นกัน

4.5 ระบบการเก็บข้อมูล (Data Acquisitions)

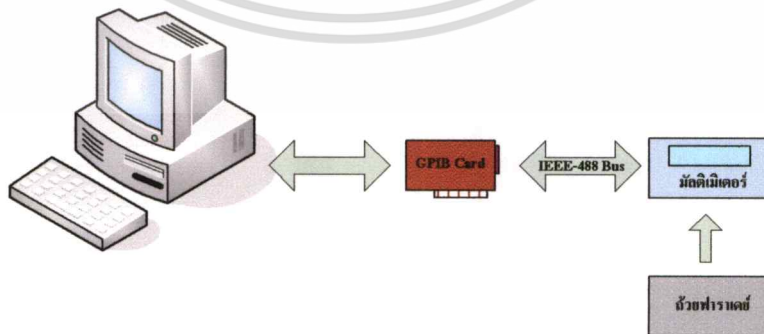
ระบบการเก็บข้อมูลประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ส่วนการควบคุมการเคลื่อนตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ และส่วนการเก็บข้อมูลกระแสลำไอออนที่วัดได้

ส่วนควบคุมการเคลื่อนตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ จะทำหน้าที่ในการเคลื่อนตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์สำหรับการวัดด้วยสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งประกอบด้วยแท่นสแกนสามมิติ (3-axis scan base) ที่สามารถปรับเคลื่อนตำแหน่งได้ทั้งสามแนวแกนคือ แกน x แกน y และแกน z ด้วยสเต็ปมิ่งมอเตอร์ และมีชุดขับมอเตอร์ (motor driver) สำหรับควบคุมมอเตอร์แต่ละตัว ทั้งนี้การปรับเคลื่อนตำแหน่งของชุดสแกนจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับชุดขับมอเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม ดังแสดงในแผนภาพดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ส่วนควบคุมการเคลื่อนตำแหน่งถ้วยฟาราเดย์

ส่วนการเก็บข้อมูลกระแสลำไอออนที่วัดได้ ส่วนนี้ประกอบด้วยมัลติมิเตอร์ซึ่งทำหน้าที่วัดกระแสของถ้วยฟาราเดย์ และเชื่อมโยงเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านระบบสายข้อมูล IEEE-488 ดังแสดงในแผนภาพดังรูปที่ 4.14

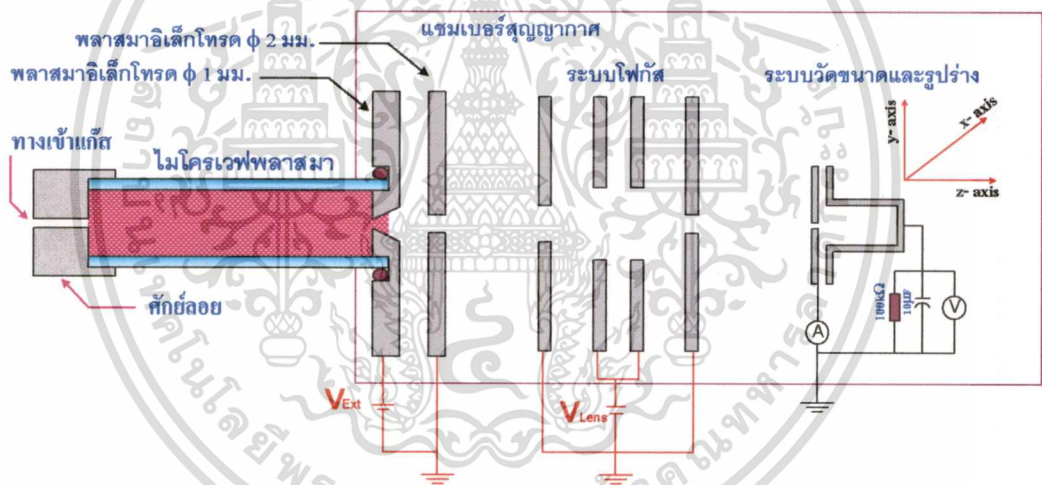


รูปที่ 4.14 ส่วนการเก็บข้อมูลกระแสลำไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนและระบบโฟกัส

สำหรับระบบโฟกัสลำไอออนที่ทำการศึกษาคือเป็นระบบที่ได้พัฒนาขึ้น โดยห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์พื้นผิวและเลเซอร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งจะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ และระบบโฟกัสลำไอออน ซึ่งในส่วนของแหล่งกำเนิดไอออนจะอาศัยหลักการกระตุ้นให้เกิดอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาในบริเวณหลอดแก้วควอร์ตซึ่งติดตั้งผ่าน โพรงำทอนคลื่นไมโครเวฟ ณ ตำแหน่งที่มีแอมพลิจูดของคลื่นกำลังมากที่สุดในท่อ โดยที่ไอออนของอาร์กอนจะถูกดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาผ่านขั้วอิเล็กโทรดตัวดึง จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่ระบบโฟกัสลำไอออนซึ่งใช้เลนส์ไฟฟ้าในการโฟกัสลำไอออน ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบโฟกัสลำไอออนที่ใช้สำหรับการศึกษา

การศึกษาระบบโฟกัสลำไอออนในงานวิจัยนี้ จะศึกษาในสามส่วนสำคัญคือ การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออน การศึกษาระบบโฟกัสเลนส์ชุดเดียว และการศึกษาระบบโฟกัสเลนส์สองชุด ซึ่งรายละเอียดของการศึกษาจะกล่าวถึงต่อไป

5.1 การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออน

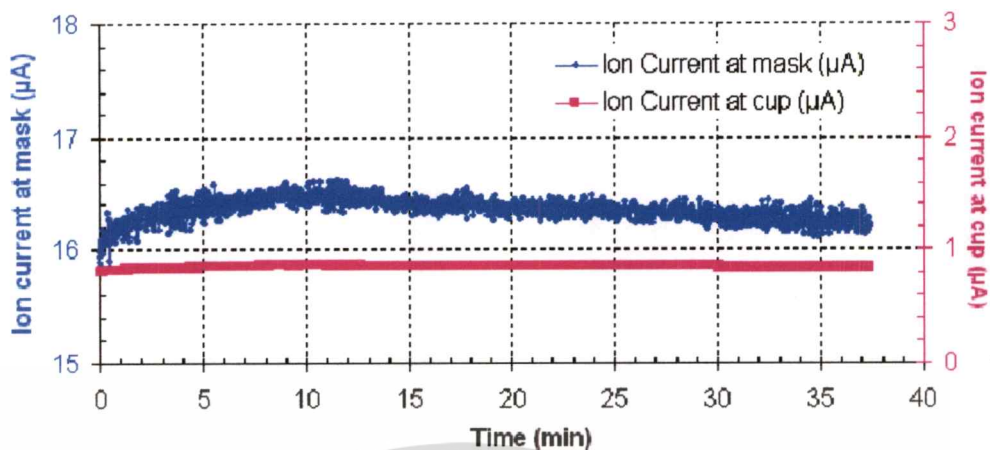
ในการพัฒนาระบบโฟกัสลำไอออน(ion-beam focusing systems) ประการแรกที่ต้องคำนึงถึงคือ สมบัติของแหล่งกำเนิดไอออน เนื่องจากว่าเป็นแหล่งจ่ายไอออนเข้าสู่ระบบโฟกัส การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของแหล่งกำเนิดไอออนจะส่งผลให้สมบัติของลำไอออนที่ได้จากระบบโฟกัสเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นการศึกษาเพื่อทราบถึงสมบัติต่างๆของแหล่งกำเนิดไอออนจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งสมบัติที่สำคัญของแหล่งกำเนิดไอออนได้แก่ เสถียรภาพของแหล่งกำเนิดไอออน (ion source stability) รูปร่างของลำไอออน(beam profile) ขนาดของแหล่งกำเนิดไอออน (beam width) มุมบานของลำไอออน(beam divergence) และการกระจายพลังงาน(energy spread) โดยแหล่งกำเนิดไอออนในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟมีสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.1.1 เสถียรภาพของแหล่งกำเนิดไอออน

สำหรับแหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้งานวิจัย มีการทดสอบเสถียรภาพของแหล่งกำเนิดโดยการวัดค่ากระแสของลำไอออนที่สามารถดึงได้ด้วยระบบคิงไอออน ซึ่งวัดกระแสที่วิ่งเข้าชนแผ่นกั้นของถ้วยฟาราเดย์(mask current) และ กระแสที่ถ้วยฟาราเดย์(faraday cup current) ได้ ความสัมพันธ์ของค่ากระแสทั้งสองเมื่อทำการทดลองเป็นเวลา 37 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ภายใต้งานไขการทดลองดังต่อไปนี้

- P _{vacuum chamber}	1.5×10^{-5}	mbar
- P _{plasma tube}	8.0×10^{-2}	mbar
- Magnetron power	25	W
- Extraction Voltage	2	kV
- Extractor to Detector distance	37	mm

แสดงได้ในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 สถิติสภาพของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ่นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากรูปที่ 5.2 พบว่าค่ากระแสที่ mask มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 16.0 ไมโครแอมป์ เป็น 16.6 ไมโครแอมป์ ในช่วง 10 นาทีแรก และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่จะพบว่ากระแสของลำไอออนที่วัดได้ที่ถ้วยฟาราเดย์มีค่าค่อนข้างคงที่ ที่ประมาณ 0.8 ไมโครแอมป์ ซึ่งจากผลดังกล่าว จึงควรใช้งานแหล่งกำเนิดไอออนหลังจากที่เปิดเครื่องแล้ว ประมาณ 10 ถึง 15 นาที เพื่อให้ได้ลำไอออนที่มีค่ากระแสคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

5.1.2 ขนาดและมุมบานของแหล่งกำเนิดไอออน

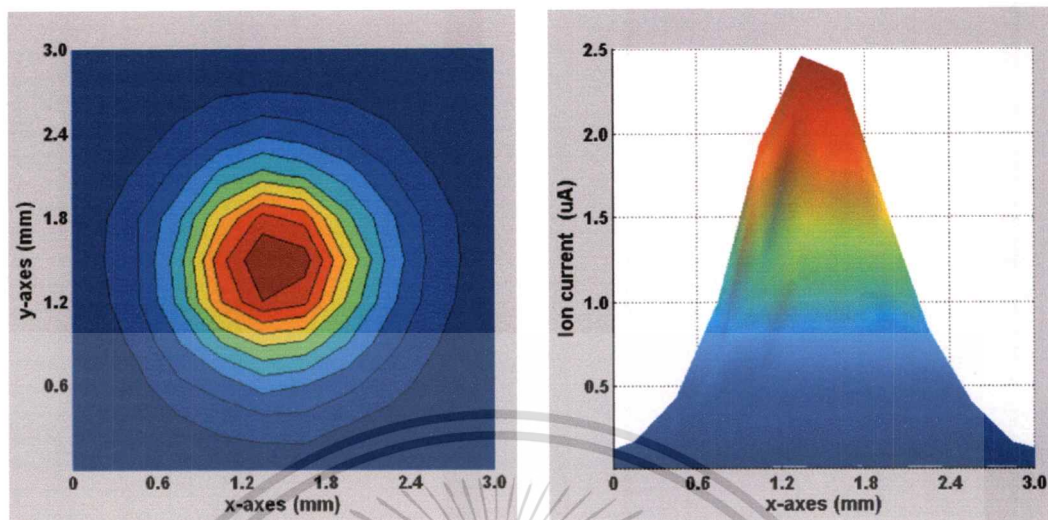
สำหรับขนาดของลำไอออนที่ได้จากแหล่งกำเนิดไอออนที่ระยะทางต่างๆ หลังจากเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด จะวัดได้โดยใช้วิธีการวัดแบบกวาดรูเข็ม เมื่อแผ่นกั้นด้านหน้าถ้วยฟาราเดย์มีขนาดของรูกลมที่เจาะทะลุเท่ากับ 1 มิลลิเมตร โดยจะทำให้ทราบถึงขนาดและรูปร่างของลำไอออนว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร ก่อนที่จะนำไปทำการโฟกัส

โดยที่ลำไอออนที่ใช้สำหรับการนำไปศึกษาในระบบโฟกัส เป็นลำไอออนที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

- $P_{\text{vacuum chamber}}$	8.5×10^{-6}	mbar
- $P_{\text{plasma tube}}$	3.0×10^{-2}	mbar
- Magnetron power	25	W
- Extraction Voltage	1.50	kV
- Extractor to Detector distance	9	mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

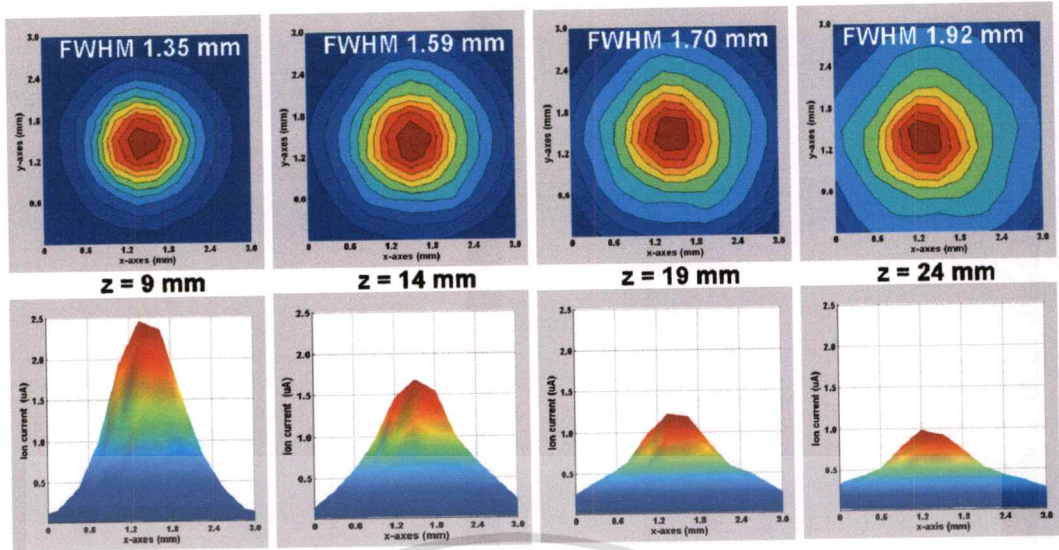
ซึ่งจะมีขนาดและรูปร่างของลำไอออนดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ขนาดและรูปร่างของลำไอออนที่ใช้สำหรับการศึกษาระบบโพกัส

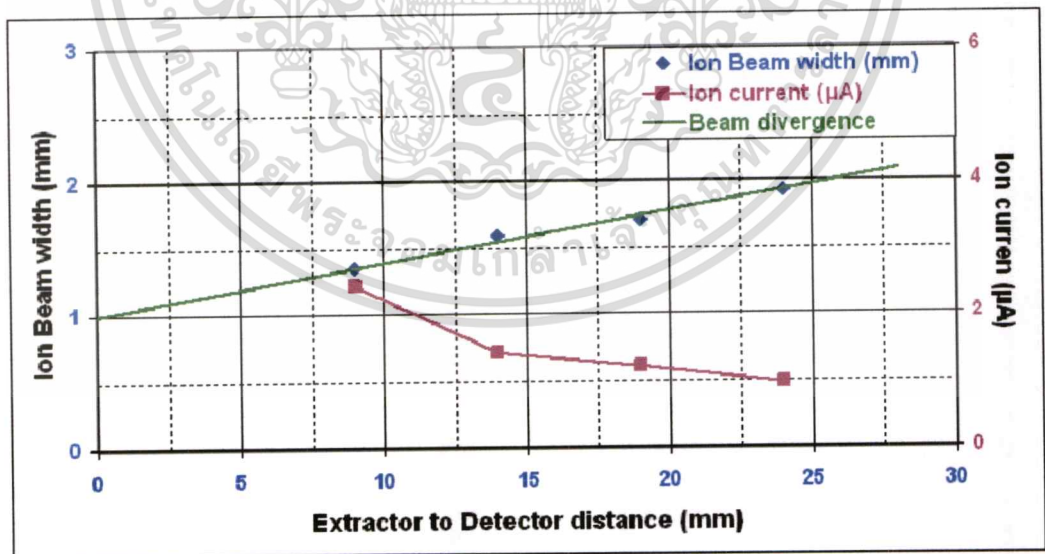
ผลที่ได้จากการวัดขนาดของลำไอออนเมื่อมีพื้นที่ในการสแกนเท่ากับ 3×3 ตารางมิลลิเมตร จะได้ว่าลำไอออนมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม ดังในรูปที่ 5.3 ซึ่งขนาดของลำไอออนเมื่อวัดจากค่า FWHM (Full width at Half Maximum) ของรูปร่างลำไอออนมีค่าเท่ากับ 1.35 มิลลิเมตร มีค่ากระแสสูงสุด 2.45 ไมโครแอมป์ ซึ่งนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของลำไอออนได้เท่ากับ 0.17 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

นอกจากนี้ยังทำการวัดมุมบานของลำไอออนที่สนใจไว้เคียงกันกับการวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนก่อนหน้านี้ โดยทำการวัดขนาดของลำไอออนที่ตำแหน่งห่างออกจากแหล่งกำเนิดในแนวแกน z หลายๆ ค่า ด้วยการเลื่อนตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ ซึ่งได้ผลแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ขนาดและรูปร่างของลำไอออนที่มีพลังงาน 1700 อิเล็กตรอน โวลต์ เมื่อถ้ายฟาราเดย์อยู่ห่างจากขั้วอิเล็กโทรมคตวคิงเป็นระยะ 9, 14, 19 และ 24 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.4 พบว่าเมื่อมีการเลื่อนตำแหน่งของถ้ายฟาราเดย์ ห่างออกจากแหล่งกำเนิดไอออนมากขึ้น ขนาดของลำไอออนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ค่ากระแสสูงสุดของลำไอออน กลับมีค่าลดลง โดยสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของลำไอออนและค่ากระแสสูงสุดของลำไอออน กับระยะห่างของถ้ายฟาราเดย์ที่เลื่อนออกจากแหล่งกำเนิด ได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของลำไอออนและค่ากระแสสูงสุดของลำไอออน กับตำแหน่งของถ้ายฟาราเดย์

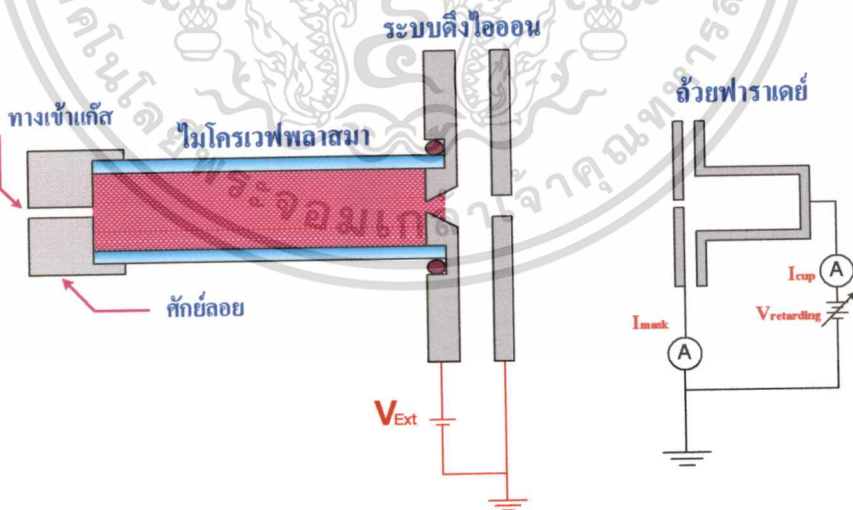
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 5.5 สามารถคำนวณหามุมบานของลำไอออนได้ประมาณ 2 องศา(full angle) ซึ่งบ่งบอกถึงแนวโน้มของขนาดและรูปร่างลำไอออนเมื่อเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด

5.1.3 การกระจายพลังงานของลำไอออน

การกระจายพลังงานของลำไอออนเป็นสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของลำไอออน โดยทั่วไปไอออนภายในลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน อาจมีระดับพลังงาน (ion energy) ที่แตกต่างกันได้ ทั้งนี้เกิดจากการสูญเสียพลังงานจากการชนกับผนังของแหล่งกำเนิดพลาสติก หรือว่าชนกันเองระหว่างไอออนภายในระบบ การที่อนุภาคภายในลำไอออนมีพลังงานไม่เท่ากันจะทำให้เกิดปัญหาในการโฟกัสลำไอออนได้ ผลที่เกิดขึ้นคือเมื่ออนุภาคมีพลังงานไม่เท่ากันเคลื่อนที่ผ่านระบบโฟกัส ลำอนุภาคจะมีตำแหน่งของจุดโฟกัสที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคนั้น กล่าวคือระยะโฟกัสของระบบเลนส์มีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาค ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากพลังงาน (chromatic aberration) โดยที่ช่วงพลังงานสูงสุดถึงต่ำสุดของอนุภาคภายในลำไอออน เรียกว่า การกระจายพลังงาน (energy spread)

การวัดการกระจายพลังงานของลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด ทำได้โดยการจัดระบบและต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 5.6 โดยที่ระยะห่างของถ้วยฟาราเดย์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวดึงเท่ากับ 9 มิลลิเมตร และเลื่อนตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ให้อยู่ในตำแหน่งที่สามารถวัดค่ากระแสไอออนได้มากที่สุด ซึ่งระหว่างการวัดจะไม่มี การเลื่อนตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์



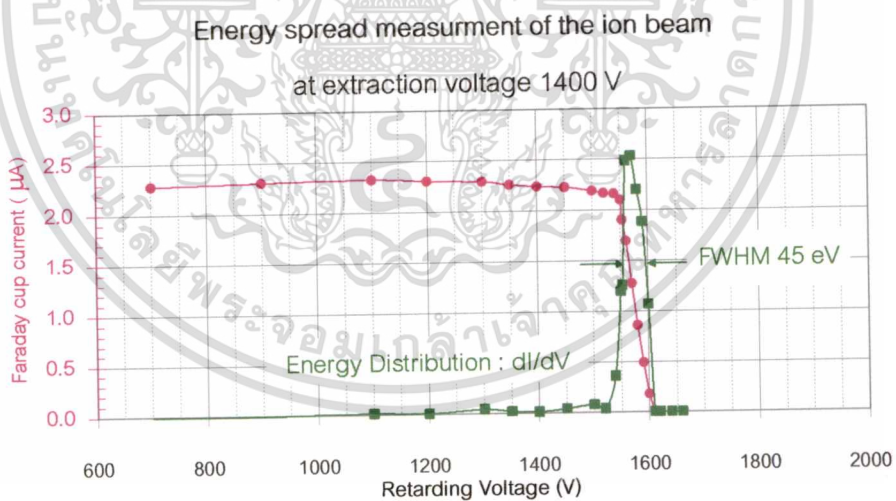
รูปที่ 5.6 การต่อวงจรไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไอออน และถ้วยฟาราเดย์สำหรับการวัดการกระจายพลังงานของลำไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.6 สามารถวัดการกระจายพลังงานของลำไอออนได้โดยการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้าน ($V_{\text{retarding}}$) เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 โวลต์ จนถึงค่าที่สูงกว่าพลังงานของลำไอออน โดยพิจารณาค่ากระแสของถ้วยฟาราเดย์ จะพบว่ามีค่าเป็น 0 แอมป์ เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้านมีค่ามากกว่าพลังงานของไอออน จากนั้นเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสของถ้วยฟาราเดย์กับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้าน แล้วจึงหาค่าการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสที่ถ้วยฟาราเดย์กับการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้าน ($dI_{\text{cup}}/dV_{\text{retarding}}$) จากนั้นนำค่า $dI_{\text{cup}}/dV_{\text{retarding}}$ ที่ได้มาเขียนกราฟเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้านอีกครั้งหนึ่ง โดยที่การกระจายพลังงานของลำไอออนหาได้จากกราฟความสัมพันธ์นี้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความกว้างของพีก (peak) ที่ความสูงครึ่งหนึ่ง (FWHM) ซึ่งตัวอย่างผลการวัดการกระจายพลังงาน เมื่อทำการวัดภายใต้เงื่อนไข

- $P_{\text{vacuum chamber}}$	8.5×10^{-6}	mbar
- $P_{\text{plasma tube}}$	3.0×10^{-2}	mbar
- Magnetron power	25	W
- Extraction Voltage	1.4	kV
- Extractor to Detector distance	9	mm

แสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างการวัดการกระจายพลังงานของลำไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากกราฟเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้านมากขึ้น จำนวนไอออน ที่วัดได้ด้วยถ้วยฟาราเดย์จะมีค่าลดลง และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้านมีค่ามากกว่าพลังงานของลำไอออน และพบว่าเมื่อ

ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้านมีค่า 1400 โวลต์ กระแสที่วัดได้ยังมีค่าเท่าเดิม แต่ระดับกระแสไอออนจะเริ่มมีค่าลดลงเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้านมีค่ามากกว่า 1550 โวลต์ จนลดลงเป็นศูนย์ในที่สุดเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ด้านมีค่า 1600 โวลต์ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อชั่วอิเล็กโทรมอดูลีมีศักย์ไฟฟ้า 1400 โวลต์ จะได้ลำไอออนที่มีค่าพลังงานอยู่ในช่วง 1550–1600 อิเล็กตรอน โวลต์ สาเหตุที่ทำให้พลังงานของลำไอออนมีค่ามากกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการดึงนั้น เกิดเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูงที่ใช้ในการทดลองนั้นมีค่าออฟเซต (offset) 200 โวลต์ นอกจากนี้ยังทำการวัดการกระจายพลังงานของลำไอออนที่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการดึงอื่นๆ อีกซึ่งแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การกระจายพลังงานของลำไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน

Extraction Voltage (V)	Beam energy (eV)	ΔE at FWHM (eV)	Percentage (%)
1000	1200	65	5.4
1100	1300	55	4.2
1200	1400	65	4.6
1300	1500	60	4.0
1400	1600	45	2.8
1500	1700	50	2.9

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อลำไอออนมีค่าพลังงานอยู่ในช่วง 1200-1700 อิเล็กตรอน โวลต์ การกระจายพลังงานของลำไอออนมีค่าอยู่ใน ช่วง 45-65 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับค่าพลังงานของลำไอออน และที่สำคัญคือมีค่าไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานของลำไอออนด้วย

สำหรับลำไอออนที่จะใช้สำหรับการศึกษาระบบโพกัสลำไอออนขั้นต้นนั้น จะใช้ลำไอออนที่มีค่าพลังงาน 1700 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมีค่าการกระจายพลังงาน 50 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าพลังงานของลำไอออน ได้เท่ากับ 2.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าน้อย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ลำไอออนที่จะใช้ในการโพกัสต่อไปนั้นมีคุณภาพที่ดี และเหมาะสมสำหรับการศึกษาระบบโพกัสลำไอออน

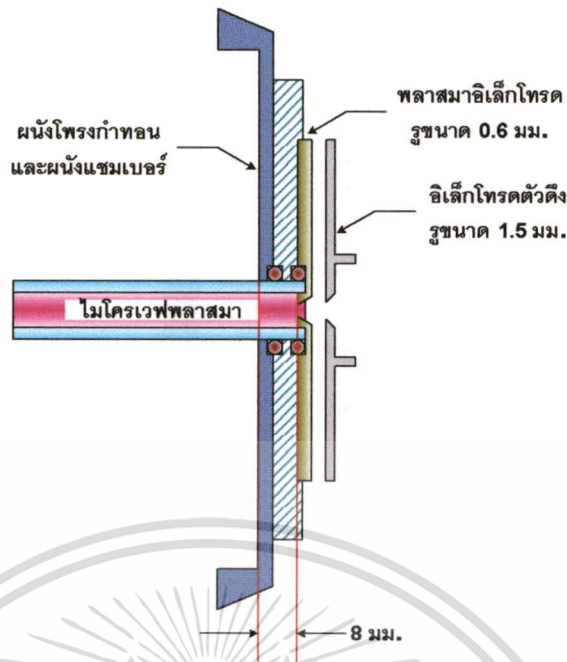
5.1.4 การปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออน

จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าขนาดของลำไอออนที่ได้จากแหล่งกำเนิด มีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ กระแสสูงสุดของลำไอออนยังมีค่าต่ำ ส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแสไอออนมีค่าต่ำลงไปด้วย นอกจากนี้ลำไอออนที่ได้ยังมีมุมบานที่มาก ซึ่งสมบัติของแหล่งกำเนิดไอออนเหล่านี้ จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบโฟกัสลดลง ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโฟกัสขึ้น จึงได้ทำการปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออนในสองแนวทาง คือ เพื่อลดขนาดของลำไอออนลงและเพิ่มค่ากระแสไอออนให้มีค่าที่สูงขึ้น

เนื่องจากขนาดของลำไอออนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพลาสมาอิเล็กโทรด โดยเมื่อพลาสมาอิเล็กโทรดมีขนาดรูที่เล็กลงลำไอออนที่สามารถดึงออกมาได้ก็จะมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย ดังนั้น จากแนวทางในการปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออนเพื่อลดขนาดของลำไอออน จะสามารถทำได้โดยการปรับลดขนาดของรูพลาสมาอิเล็กโทรดให้มีขนาดเล็กลง และเพื่อจะทำให้ระบบดึงไอออนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องมีการปรับขนาดรูของขั้วอิเล็กโทรดตัวดึงให้เหมาะสมกับขนาดของรูพลาสมาอิเล็กโทรดด้วย ซึ่งในแหล่งกำเนิดไอออนที่ได้ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ พลาสมาอิเล็กโทรดจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 600 ไมโครเมตร และรูขั้วอิเล็กโทรดตัวดึงจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1500 ไมโครเมตร

การลดขนาดของรูพลาสมาอิเล็กโทรดเพื่อลดขนาดของลำไอออน จะส่งผลทำให้กระแสของลำไอออนมีค่าลดลงตามไปด้วย โดยที่ค่ากระแสของลำไอออนที่สามารถดึงได้นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพลาสมาอิเล็กโทรดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพลาสมาด้วย ดังนั้นเพื่อให้ลำไอออนมีค่ากระแสที่สูงขึ้น จึงต้องกรเพิ่มความหนาแน่นของพลาสมาขึ้นจากเดิม

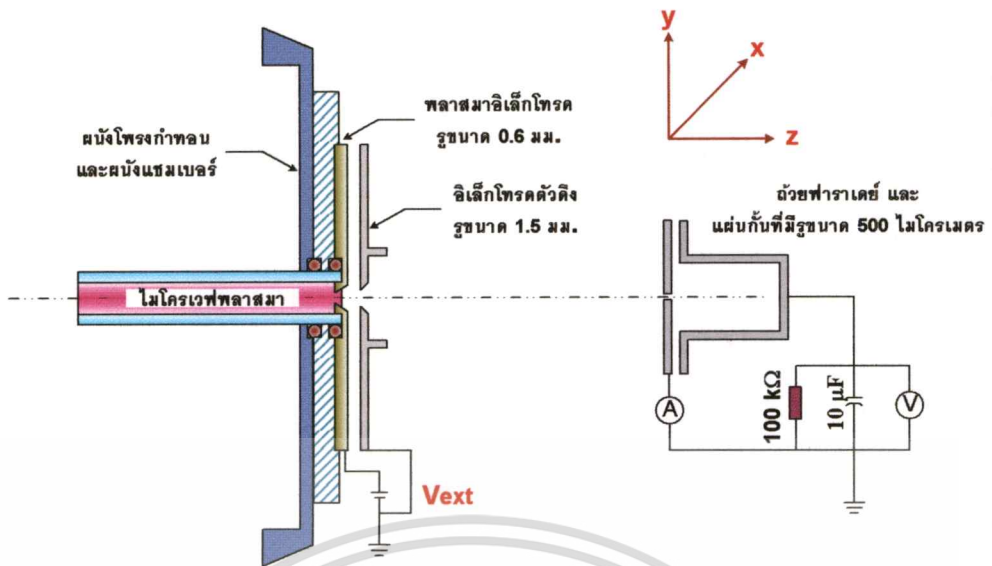
สำหรับพลาสมาที่กำเนิดด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยคลื่น ไมโครเวฟที่กำเนิดในโพรงกำเนิดรูสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยธรรมชาติแล้วจะมีความหนาแน่นสูงสุด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของโพรงกำเนิด และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพ้นจากผนังของโพรงกำเนิดออกไป ดังนั้นในระบบเดิมซึ่งตำแหน่งของพลาสมาอิเล็กโทรดอยู่ห่างจากผนังของโพรงกำเนิดถึง 30 มิลลิเมตร พลาสมาบริเวณนั้นจึงมีความหนาแน่นที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งส่งผลให้ลำไอออนที่ได้จากแหล่งกำเนิดดังกล่าวมีค่ากระแสต่ำด้วย ดังนั้นเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพลาสมาในการออกแบบเพื่อปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออน จึงต้องลดระยะห่างของขั้วพลาสมาอิเล็กโทรดให้อยู่ใกล้กับผนังของโพรงกำเนิดให้มากที่สุด ซึ่งแหล่งกำเนิดไอออนที่ปรับปรุงแล้วจะมีระยะระหว่างขั้วพลาสมาอิเล็กโทรดกับผนังของโพรงกำเนิด ใกล้ที่สุดเท่ากับ 8 มิลลิเมตร เนื่องจากข้อจำกัดของการออกแบบและสร้างระบบ



รูปที่ 5.8 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดไอออนที่ทำการปรับปรุงขึ้นมาใหม่

สำหรับแหล่งกำเนิดลำไอออนที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมาใหม่ รูของพลาสมาอีเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นกรวยกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร ส่วนขั้วอีเล็กโทรดตัวตั้งมีรูลักษณะเป็นกรวยกลมเช่นกัน โดยด้านที่อยู่ติดกับขั้วพลาสมาอีเล็กโทรดจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และขยายออกจนถึงอีกด้านมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.8

การทดสอบแหล่งกำเนิดไอออน ทำได้โดยการต่อศักย์ไฟฟ้าค่าสูงขั้วบวกให้กับขั้วพลาสมาอีเล็กโทรด และต่อขั้วอีเล็กโทรดตัวตั้งลงกราวด์ จากนั้นทำการวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็มขนาด 500 ไมโครเมตร สำหรับการต่อวงจรไฟฟ้าในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.9

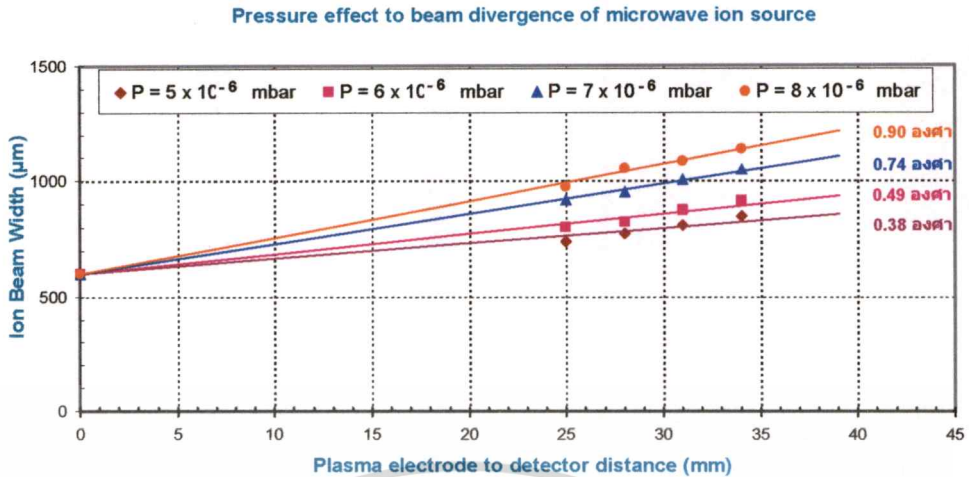


รูปที่ 5.9 การต่อวงจรไฟฟ้าให้กับแหล่งกำเนิดไอออนและระบบวัด

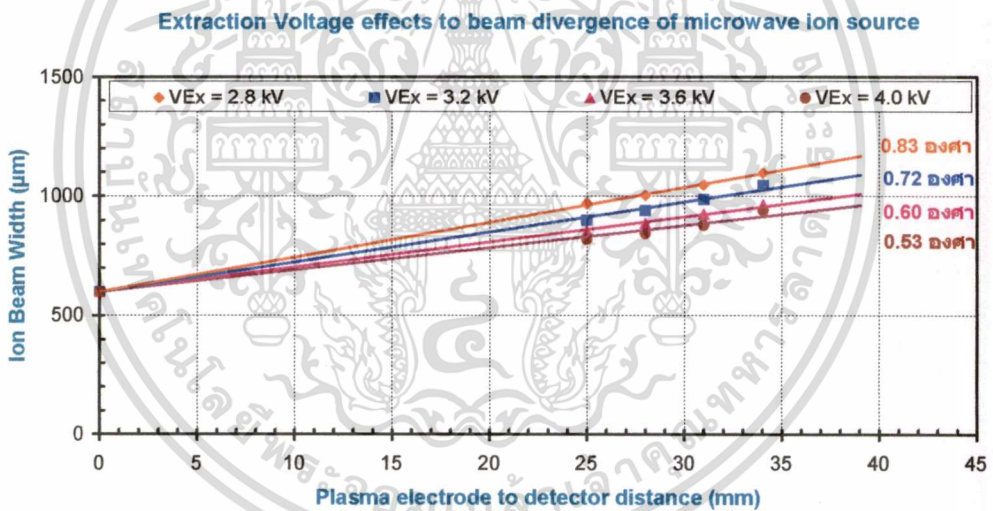
สำหรับผลการศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นใหม่ เมื่อทำการทดลอง ภายใต้งี๊อนไขดังต่อไปนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11

- Magnetron power	25	W
- scan step	200	μm
- pin hole on mask	500	μm
- plasma electrode to detector distance	25-34	mm
- extraction voltage	2.80 - 4.00	kV
- P _{main chamber}	5.0×10^{-6} - 8.0×10^{-6}	mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ผลของความดันภายในแชนเบอรัหลักที่มีต่อขนาดและมุมบานของลำไอออน เมื่อกำลังของแมกนีตรอนมีค่าเท่ากับ 25 วัตต์ และใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการดึง 3.20 กิโลโวลต์



รูปที่ 5.11 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการดึงที่มีต่อขนาดและมุมบานของลำไอออน เมื่อกำลังของแมกนีตรอนมีค่าเท่ากับ 25 วัตต์ และความดันภายในแชนเบอรัหลักมีค่า 7.0×10^{-6} มิลลิบาร์

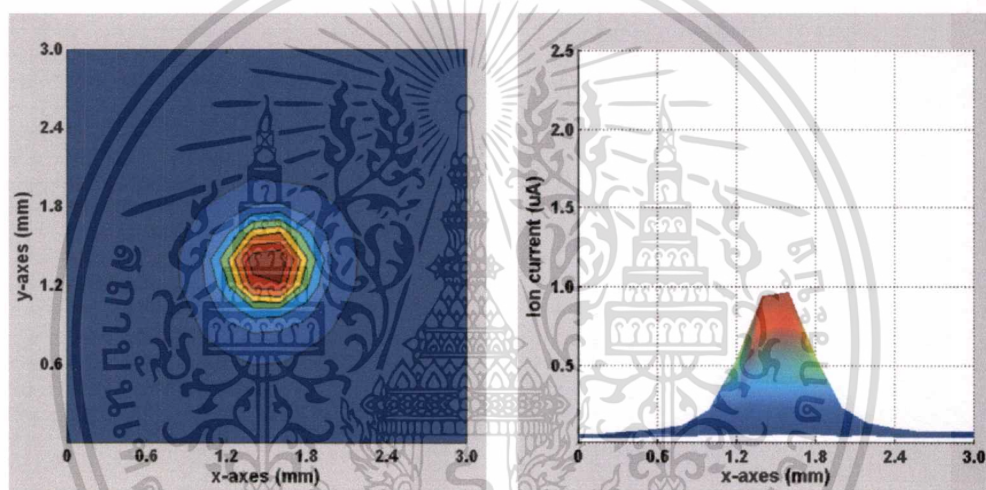
จากกราฟรูปที่ 5.10 พบว่าเมื่อความดันของแชนเบอรัหลักมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ลำไอออนมีขนาดใหญ่มากขึ้นตาม ไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า มุมบานของลำไอออนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะพบว่าลำไอออนมีมุมบานต่ำสุดคือ 0.38 องศา ที่ความดัน 5.0×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิบาร์ ส่วนกราฟในรูปที่ 5.11 เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น พบว่าขนาดของลำไอออนจะมีขนาดเล็กลง และมีมุมบานของลำไอออนที่เล็กลงด้วยเช่นกัน

จากผลการทดลองในรูปกราฟทั้งสอง จึงสรุปได้ว่า ขนาดและมุมบานของลำไอออน มีค่าขึ้นอยู่กับความดันของแอมเบอร์หลัก และศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการดึง

สำหรับระบบที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมาใหม่ เมื่อทำการวัดขนาดของลำไอออนที่ได้จากระบบด้วยวิธีการกวาดรูเข็มขนาด 0.5 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง 25 มิลลิเมตรห่างจากแหล่งกำเนิด จะได้ลำไอออนที่มีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งมีขนาดเมื่อวัดจากค่า FWHM ของรูปร่างลำไอออนมีค่าเท่ากับ 738 ไมโครเมตร มีค่ากระแสสูงสุด 9.6 ไมโครแอมป์ ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสของลำไอออนจะได้เท่ากับ 5.61 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมีมุมบานของลำไอออนที่ดีที่สุด 0.38 องศา ที่ความดันแอมเบอร์หลักเท่ากับ 5.0×10^{-6} มิลลิบาร์



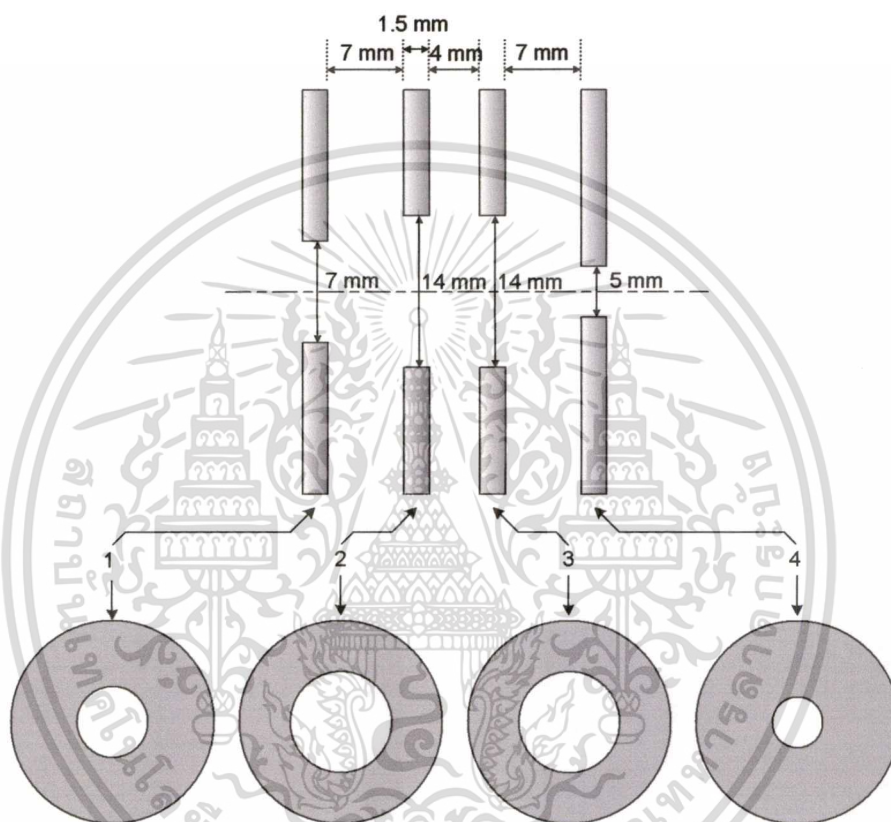
รูปที่ 5.12 ขนาดและรูปร่างของลำไอออนจากแหล่งกำเนิดที่ได้รับการปรับปรุงขึ้นใหม่

5.2 การศึกษาระบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดียว

สำหรับลำไอออนโดยทั่วไปเมื่อเคลื่อนที่ออกจากระบบดึง ไอออนเข้าสู่บริเวณพื้นที่ว่าง (free space) ซึ่งไม่มีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากระบบดึงไอออน และไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ลำไอออนจะบานออก เนื่องจากอิทธิพลของแรงคูลอมบ์ระหว่างไอออนภายในลำไอออน (coulomb force interaction) ดังนั้นถ้าต้องการให้ลำไอออนมีขนาดเท่าเดิมหรือมีขนาดเล็กลง จึงจำเป็นต้องมีแรงกระทำจากภายนอกที่มีค่ามากกว่าแรงคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นมากระทำต่อไอออนในทิศตรงกันข้าม

กับแรงคูลอมบี ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ได้จากเลนส์ไฟฟ้า(electrostatic lens) ประกอบกันเป็นระบบโฟกัส(focusing system)

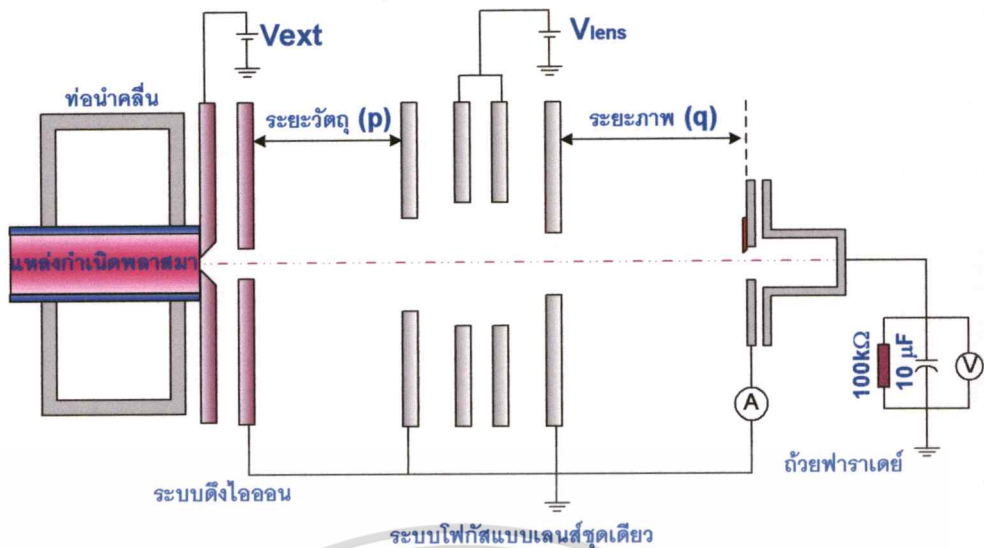
ระบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดียว ประกอบด้วยเลนส์ไฟฟ้า ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลมเจาะรูกลมทะลุตรงกลาง จำนวน 4 ชั้น โดยที่ขนาดรูปร่าง และระยะห่างระหว่างแผ่นเลนส์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ขนาด รูปร่าง และระยะห่างของเลนส์ไฟฟ้าเมื่อประกอบเป็นระบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดียว

สำหรับการประกอบชุดเลนส์ และการต่อขั้วไฟฟ้าของระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งจะมีการวัดขนาด และแนวการเคลื่อนที่ของลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านระบบโฟกัส ด้วยวิธีขอบมีด (knife-edge method) โดยจะทำการวัดขนาดของลำไอออนทั้งสองแนวแกน คือ แกน X และแกน Y ส่วนการวัดแนวการเคลื่อนที่ของลำไอออนนั้น จะวัดขนาดของลำไอออนในแนวแกน X และแกน Y ที่ตำแหน่งในแนวแกน Z ใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ชุดเลนส์และการต่อขั้วไฟฟ้าของระบบที่ใช้ในการศึกษา

จากรูปที่ 5.14 p คือระยะวัตถุของชุดเลนส์ ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตัวดึงกับแผ่นเลนส์ชิ้นแรกของชุดเลนส์ ส่วน q คือระยะภาพของชุดเลนส์ ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างแผ่นเลนส์ชิ้นสุดท้ายของชุดเลนส์ กับตำแหน่งที่ลำไอออนมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อลำไอออนเคลื่อนที่ผ่านชุดเลนส์

ในการศึกษาระบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดียว จะศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดของลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านระบบโฟกัส และระยะโฟกัสของชุดเลนส์ ดังนี้

5.2.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดเลนส์

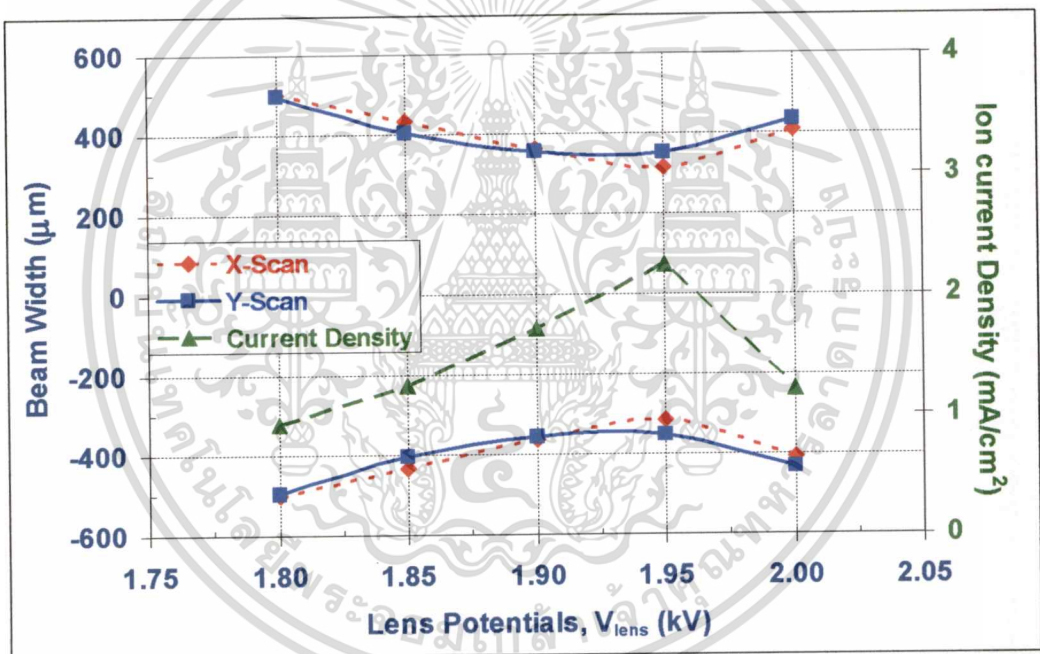
การศึกษาถึงผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดเลนส์ ทำได้โดยการจัดระบบ และต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 5.14 ทำการทดลองโดยการสร้างพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟ จากนั้นทำการดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยการจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับระบบดึงไอออน (extraction system) ซึ่งจะได้ลำไอออนเพื่อเข้าสู่ระบบโฟกัสต่อไป โดยจะศึกษานาขนาดของลำไอออนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านระบบโฟกัส (focusing system) ซึ่งประกอบขึ้นจากชิ้นเลนส์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนการต่อขั้วไฟฟ้าของแผ่นที่ 1 และ 4 จะต่อเข้ากับเป็นกราวด์ของระบบ และขั้วไฟฟ้าของแผ่นที่ 2 และ 3 ต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวก ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าได้ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าของเลนส์ (V_{lens})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขดังนี้

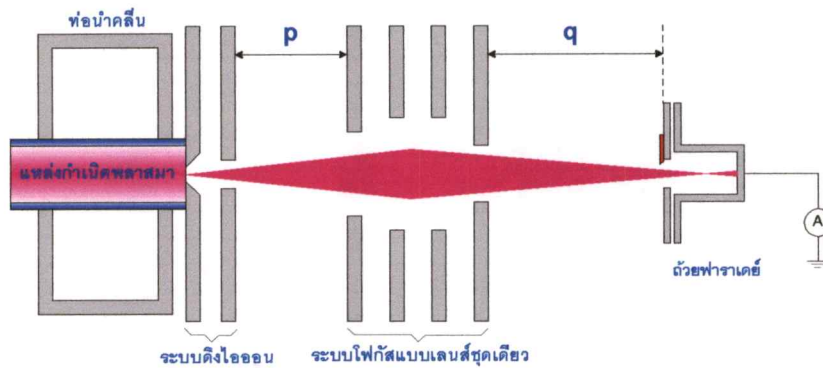
- $P_{\text{main chamber}}$	8.5×10^{-6}	mbar
- $P_{\text{plasma tube}}$	3.0×10^{-2}	mbar
- Magnetron Power	25.0	W
- Beam energy	1.90	keV
- Extractor to Lens Distance : p	31.2	mm
- Lens to Detector Distance: q	10.0	mm
- Lens Potential, V_{lens}	1.8-2.0	keV

เมื่อทำการวัดขนาดของลำไอออนด้วยวิธีขอบมืดเพื่อศึกษาผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าของเลนส์ที่มีต่อขนาดของลำไอออนและระยะโฟกัสของเลนส์จะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.15

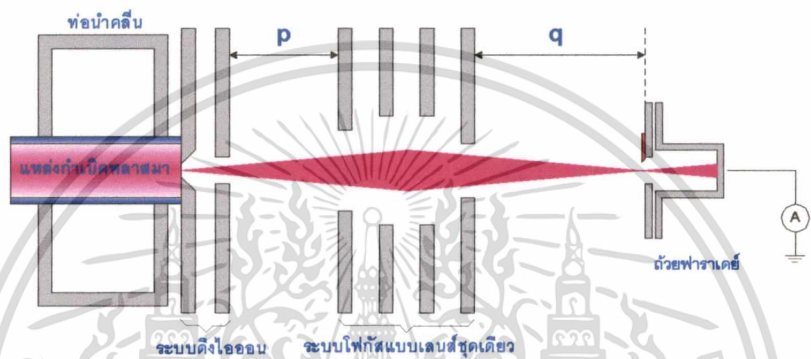


รูปที่ 5.15 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลนส์ที่มีต่อขนาดของลำไอออน เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.90 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ และวัดที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 10 มิลลิเมตร

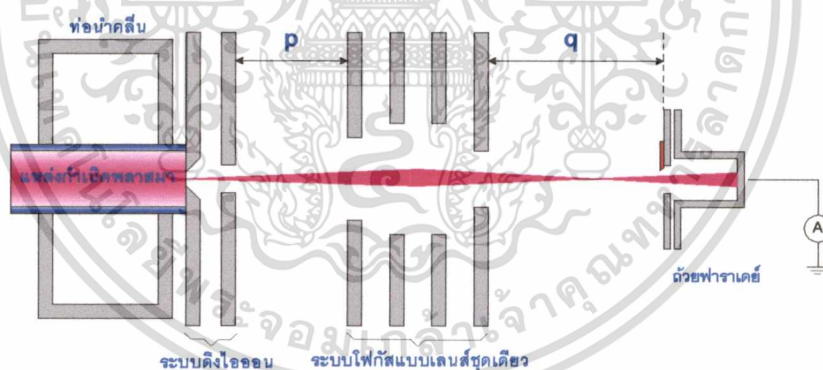
จากรูปที่ 5.15 แสดงขนาดของลำไอออนที่ได้จากการวัดด้วยวิธีขอบมืดในสองแนวแกน โดยกราฟเส้นไขว้ปลาตีแดง แสดงขนาดของลำไอออนในแนวแกน x และกราฟเส้นทึบสีน้ำเงินเป็นขนาดของลำไอออนในแนวแกน y ซึ่งทำการวัดที่ระยะของถ้วยฟาราเดย์อยู่ห่างจากระบบเลนส์ 10 มิลลิเมตร ส่วนกราฟเส้นประสีเขียวนั้นจะแสดงถึงความหนาแน่นของกระแสลำไอออนที่ทำการวัด



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.16 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ เมื่อตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

โดยที่ $V_{\text{lens-1}} < V_{\text{lens-2}} < V_{\text{lens-3}}$

(ก) เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์มีค่าเป็น $V_{\text{lens-1}}$

(ข) เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์มีค่าเป็น $V_{\text{lens-2}}$

(ค) เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์มีค่าเป็น $V_{\text{lens-3}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่า V_{lens} จากกราฟเห็นได้ชัดว่าเมื่อตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์อยู่ที่เดิม ขนาดของลำไอออนจะขึ้นอยู่กับค่า V_{lens} โดยในช่วงที่ค่า V_{lens} เพิ่มขึ้นจาก 1.80-1.95 กิโลโวลต์ ขนาดของลำไอออนมีค่าลดลงตามค่า V_{lens} ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นของกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อ V_{lens} มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.95-2.00 กิโลโวลต์ ขนาดของลำไอออนมีค่ามากขึ้น และค่าความหนาแน่นของกระแสมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถอธิบายให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นโดยอาศัยแผนภาพดังรูปที่ 5.16

การทำงานของระบบโฟกัสอธิบายได้ดังนี้ เมื่ออนุภาคในลำไอออนที่เป็นไอออนบวกวิ่งผ่านสนามไฟฟ้าของชุดเลนส์ที่มีการต่อขั้วไฟฟ้าสองขั้วตรงกลางให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ในขณะที่สองขั้วด้านนอกต่อลงกราวด์ ซึ่งการต่อขั้วไฟฟ้าของชุดเลนส์ในลักษณะดังกล่าว จะทำให้เกิดแรงกระทำเนื่องจากสนามไฟฟ้าโดยรวมของชุดเลนส์ที่มีต่อ ไอออนมีทิศทางพุ่งเข้าหาแกนทางแสง (optical axis) ของเลนส์ แรงกระทำนี้จะผลักลำไอออนให้เกิดการเบี่ยงเบนวิถีการเคลื่อนที่ให้เข้าสู่แกนทางแสงของเลนส์จนกระทั่งลำไอออนถูกบีบให้มีขนาดเล็กที่สุดที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบน แกนทางแสง เกิดเป็นจุดโฟกัสของลำไอออน โดยที่ตำแหน่งของจุดโฟกัสหรือที่เรียกว่า ระยะโฟกัสขึ้นอยู่กับความแรงของสนามไฟฟ้าของชุดเลนส์ ซึ่งถ้าสนามไฟฟ้ามีค่ามาก คือเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับชุดเลนส์ด้วยค่าสูงๆ ลำไอออนจะถูกบีบให้มีขนาดเล็กที่สุดอย่างรวดเร็ว นั่นคือระยะโฟกัสจะสั้นเมื่อใช้ V_{lens} ค่าสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าสนามไฟฟ้าของชุดเลนส์มีค่าต่ำ ซึ่งได้จากการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับชุดเลนส์ด้วยค่าน้อยๆ ลำไอออนจะถูกบีบให้มีขนาดเล็กที่สุดอย่างช้าๆ นั่นคือระยะโฟกัสจะยาวขึ้น เมื่อใช้ V_{lens} มีค่าน้อย

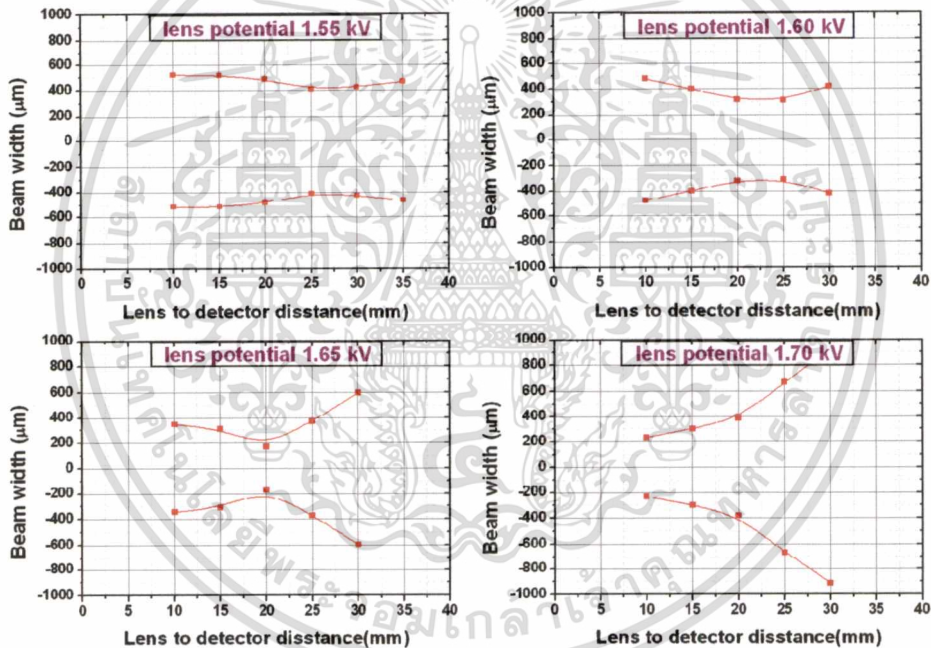
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการทำงานของเลนส์ไฟฟ้ากับเลนส์ทางแสงแล้ว พบว่ามีลักษณะการทำงานที่คล้ายกันคือ สามารถทำการโฟกัสหรือขยายได้ แต่เลนส์ไฟฟ้าจะใช้สำหรับอนุภาคที่มีประจุ ส่วนเลนส์ทางแสงใช้สำหรับแสง โดยที่การกำหนดความสามารถของเลนส์ไฟฟ้าว่าจะทำให้เกิดการโฟกัสหรือขยายนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นสมศักย์ภายในชุดเลนส์ แต่เลนส์ทางแสงกำหนดจากลักษณะความหนาแน่นหรือเว้าของเลนส์ แต่เลนส์ไฟฟ้าจะมีข้อแตกต่างจากเลนส์ทางแสงก็คือสามารถปรับความยาวของระยะโฟกัสของเลนส์ได้โดยการปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ แต่เลนส์ทางแสงซึ่งเป็นแก้วนั้นไม่สามารถทำได้

เนื่องจากผลการวัดที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า ขนาดของลำไอออนที่วัดได้จากทั้งสองแนวแกนคือ แกน x และ แกน y นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการแสดงผลการทดลองในต่อไปนี้จะแสดงเฉพาะ ขนาดของการวัดในแนวแกน x เท่านั้น

ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ ที่มีต่อระยะ โฟกัสของชุดเลนส์สามารถแสดงให้เห็นด้วยการทดลองปรับเปลี่ยนค่า V_{lens} ที่ต่างกัน 4 ค่า โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

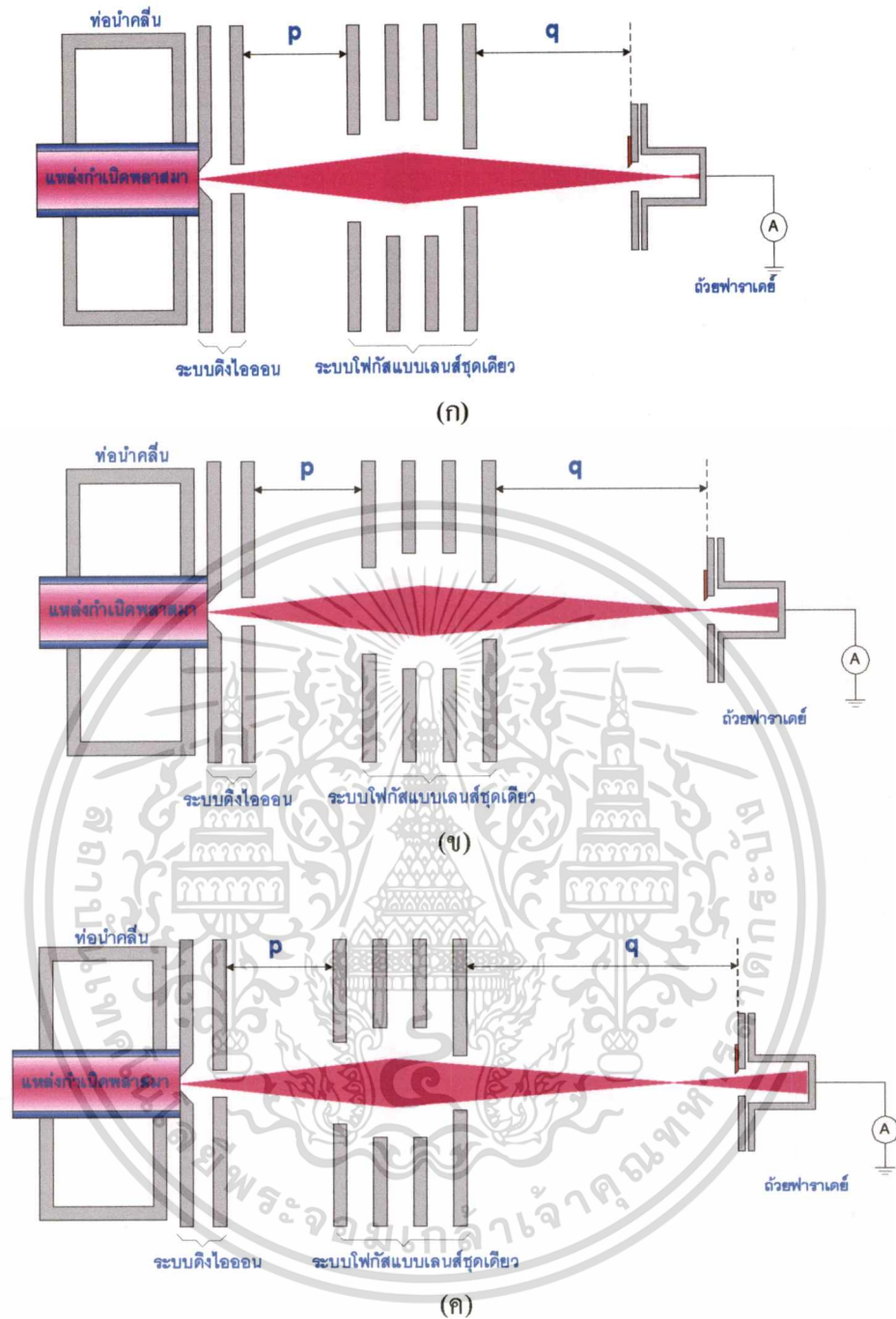
- $P_{\text{main chamber}}$	8.5×10^{-6}	mbar
- $P_{\text{plasma tube}}$	3.0×10^{-2}	mbar
- Magnetron Power	25.0	W
- Beam energy	1.70	keV
- Extractor to Lens Distance : p	31.2	mm
- Lens to Detector Distance: q	10.0-35.0	mm
- Lens Potential, V_{lens}	1.55, 1.60, 1.65 และ 1.70	keV

ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ที่มีต่อขนาดและตำแหน่งของจุดโฟกัส เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ V_{lens} มีค่า 1.55, 1.60, 1.65 และ 1.70 กิโลโวลต์ โดยทำการเลื่อนตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ ตั้งแต่ระยะ 10-35 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 การวัดขนาดของลำไอออนที่ระยะของถ้วยฟาราเดย์แตกต่างกันเมื่อลำไอออนมีพลังงานคงที่

(ก) เมื่อตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์อยู่หน้าจุดโฟกัส : ลำไอออนที่วัดได้มีขนาดใหญ่

(ข) เมื่อตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์อยู่ที่จุดโฟกัส : ลำไอออนที่วัดได้มีขนาดเล็กที่สุด

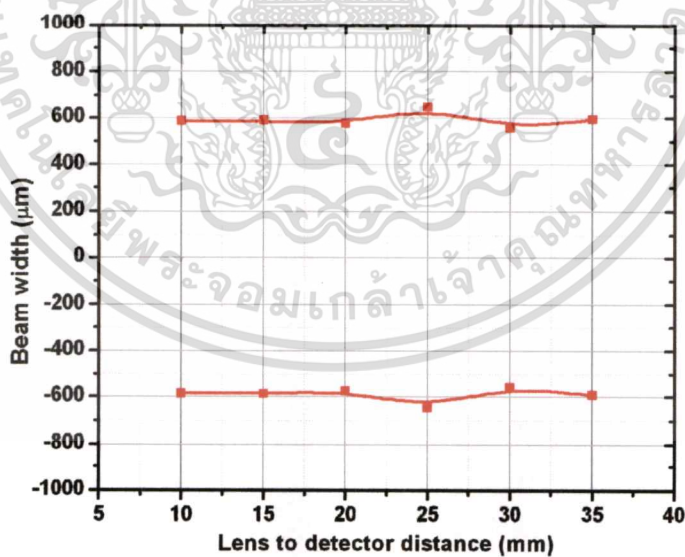
(ค) เมื่อตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์อยู่หลังจุดโฟกัส : ลำไอออนที่วัดได้มีขนาดใหญ่อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.17 สังเกตเห็นว่า เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์มีค่าคงที่ ในช่วง 1.55-1.65 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดของลำไอออนที่วัดได้มีขนาดเล็กลงจนถึงจุดที่เล็กที่สุดและกลับมีขนาดใหญ่ขึ้นอีกครั้ง เมื่อทำการวัดขนาดของลำไอออนที่ระยะห่างจากเลนส์ในช่วง 30-35 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังแผนภาพในรูปที่ 5.18

นอกจากนี้ ในรูปที่ 5.17 ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ตำแหน่งของจุดที่ลำไอออนมีขนาดเล็กที่สุดหรือระยะโฟกัสจะสั้นลง นั่นคือจุดโฟกัสจะเลื่อนเข้าใกล้เลนส์มากขึ้นหรืออาจอยู่ภายในชุดเลนส์ ถ้าเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์มากขึ้น และพบว่า ระยะโฟกัสของลำไอออนเมื่อ $V_{\text{lens}} = 1.70$ กิโลโวลต์ มีค่าสั้นกว่า 10 มิลลิเมตร ซึ่งนอกจากระยะโฟกัสที่มีค่าน้อยลงแล้วยังพบว่าลำไอออนยังมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ให้มีความมากขึ้นด้วย

จากการทดลองยังพบว่า นอกจากการปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าสามารถจะกำหนดระยะโฟกัสได้แล้ว ยังสามารถทำให้ลำไอออนเกิดเป็นลำที่ขนานได้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.19 เมื่อเปรียบเทียบกับเลนส์ทางแสงแล้ว เลนส์จะให้ลำแสงขนานได้นั้นตำแหน่งของแสงจะต้องอยู่ที่จุดโฟกัสของเลนส์ ดังนั้นในกรณีนี้อาจกล่าวได้ว่า เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์มีค่า 1.40 กิโลโวลต์ ความยาวโฟกัสของของชุดเลนส์จะมีค่าเท่ากับระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดตัวเดียวกับเลนส์ นั่นคือ 31.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.19 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ที่ทำให้ลำไอออนที่มีลักษณะเป็นลำขนาน เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.50 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ และมี $V_{\text{lens}} = 1.40$ กิโลโวลต์ ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับรูปที่ 5.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

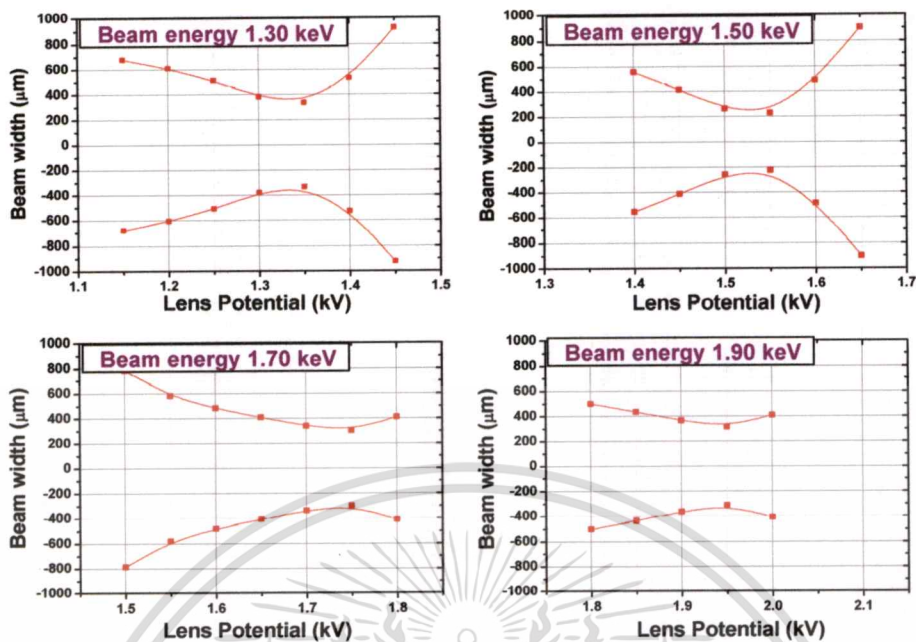
จากการทดลองที่ผ่านมา สรุปได้ว่า สามารถกำหนดขนาดของลำไอออน และระยะ โฟกัสของชุดเลนส์ได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ โดยเมื่อศักย์ไฟฟ้าง่ายค่ามากขึ้น จุดโฟกัสของเลนส์จะอยู่ใกล้ชุดเลนส์มากขึ้น หรืออาจอยู่ภายในชุดเลนส์ก็ได้ และขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัสที่เกิดจากชุดเลนส์ที่มีระยะ โฟกัสสั้นจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัสที่เกิดจากเลนส์ที่มีระยะ โฟกัสยาวกว่า นอกจากนี้ยังสามารถทำให้ลำไอออนมีลักษณะเป็นลำขนาน ได้ด้วยการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ที่เหมาะสม

5.2.2 ผลของระดับพลังงานลำไอออน

สำหรับการศึกษาผลกระทบของระดับพลังงานลำไอออนที่มีต่อระบบโฟกัส จะทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- P _{main chamber}	8.5×10^{-6}	mbar
- P _{plasma tube}	3.0×10^{-2}	mbar
- Magnetron Power	25.0	W
- Beam energy	1.3, 1.5, 1.7 และ 1.9	keV
- Extractor to Lens Distance : p	31.2	mm
- Lens to Detector Distance: q	10.0	mm
- Lens Potential, V _{lens}	1.1-2.1	keV

ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 ผลของระดับพลังงานของลำไอออนที่มีต่อระบบโฟกัส

จากการทดลองในรูปที่ 5.20 แสดงให้เห็นว่า เมื่อลำไอออนมีระดับพลังงานสูงขึ้น ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ที่จะทำให้เกิดจุดโฟกัสที่ระยะ 10 มิลลิเมตร จะต้องเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากต้องใช้สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการเบี่ยงเบนลำไอออนที่มีระดับพลังงานสูง นั่นคือต้องมี ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ที่สูงขึ้น นั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่า สามารถโฟกัสลำไอออนที่มีระดับพลังงาน 1.50 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ให้มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ 400 ไมโครเมตร ที่ระยะ 10 มิลลิเมตร ห่างจากชุดเลนส์ เมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดเลนส์เท่ากับ 1.55 กิโล โวลต์

5.2.3 ผลของระยะห่างระหว่างชุดเลนส์กับแผ่นอิเล็กทรอนิกส์

จากการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าขนาดของลำไอออนที่สามารถโฟกัสได้เล็กที่สุดมีขนาดประมาณ 400 ไมโครเมตร ซึ่งจะมีความหนาแน่นของกระแสลำไอออน 3.8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เท่านั้น โดยหลักการของเลนส์ทางแสง พบว่า

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{ระยะภาพ}}{\text{ระยะวัตถุ}} = \frac{q}{p} = \frac{\text{ขนาดภาพ}}{\text{ขนาดวัตถุ}} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับเลนส์ไฟฟ้า ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะได้ว่า

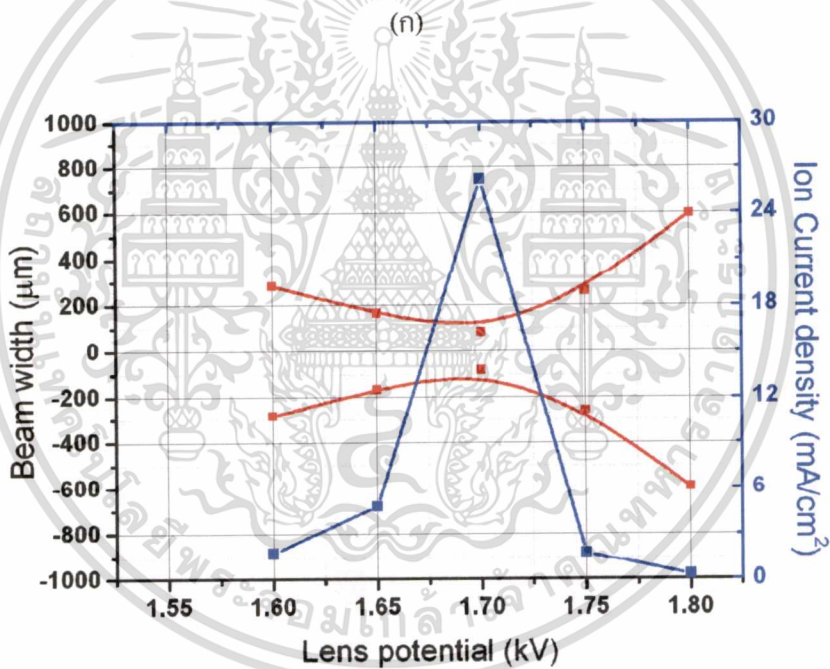
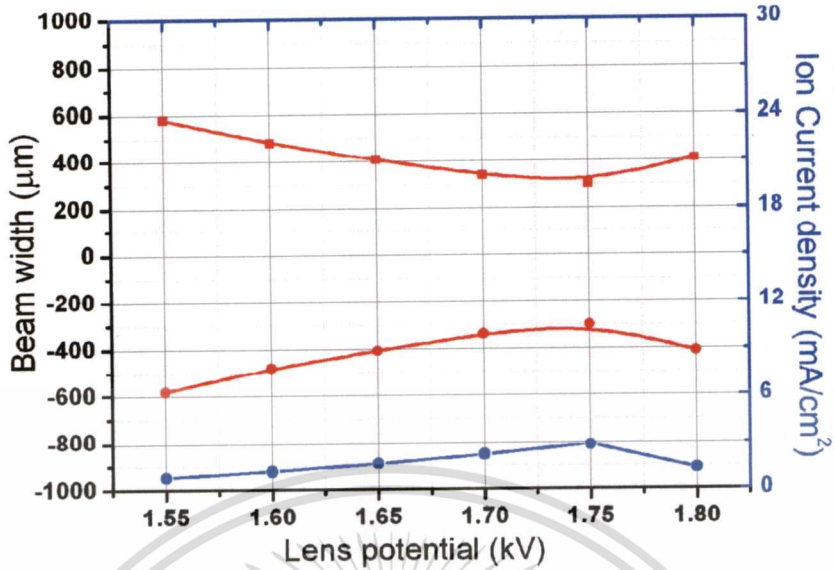
$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{ระยะห่างของชุดเลนส์กับถ้วยฟาราเดย์}}{\text{ระยะห่างอิเล็กโทรดตัวดึงกับชุดเลนส์}} = \frac{q}{p} = \frac{\text{ขนาดของลำไอออนที่ตำแหน่งโฟกัส}}{\text{ขนาดของช่วงฟลอสมาอิเล็กโทรด}} \quad (5.2)$$

เพื่อที่จะทำให้สามารถลดขนาดของลำไอออนที่ผ่านชุดเลนส์ จะต้องใช้ชุดเลนส์ที่มีกำลังขยายต่ำกว่า 1 มากๆ (Magnification $\ll 1$) ดังนั้นจากสมการที่ (5.2) จะมีกำลังขยายของเลนส์มีค่าน้อยๆ ได้ก็ต่อเมื่อ ระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวดึง (extractor to lens distance) มีค่ามากๆ เมื่อเทียบกับ ระยะห่างของเลนส์กับถ้วยฟาราเดย์ (lens to detector distance)

เพื่อพิสูจน์สมการดังกล่าว ได้ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวดึงให้มีค่ามากขึ้น ซึ่งจากเดิม 31.2 มิลลิเมตร เป็น 50.0 มิลลิเมตร และวัดขนาดของลำไอออนที่ระยะห่างของเลนส์กับถ้วยฟาราเดย์เท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.21

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวดึง มีค่ามากขึ้น และทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับชุดเลนส์ จนทำให้เกิดจุดโฟกัสที่ระยะ 10 มิลลิเมตร จะได้ลำไอออนที่มีขนาดเล็กมองเห็นได้ชัด โดยถ้าระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวดึงเท่ากับ 31.2 มิลลิเมตรขนาดของลำไอออนที่เล็กที่สุดเมื่อวัดที่ระยะของถ้วยฟาราเดย์ 10 มิลลิเมตร มีขนาดประมาณ 600 ไมโครเมตร ในขณะที่ ระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวดึงเท่ากับ 50.0 มิลลิเมตร จะมีขนาดลดลงเพียง 180 ไมโครเมตร นอกจากนี้การที่ลำไอออนมีขนาดเล็กส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 2.8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เป็น 26.2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์มีค่าใกล้เคียงกัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวดึง เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถปรับลดขนาดของลำไอออนได้ โดยเมื่อมีค่ามากขึ้นจะได้ลำไอออนที่มีขนาดเล็ก และส่งผลให้มีความหนาแน่นของกระแสไอออน มากขึ้นด้วย



(ข)

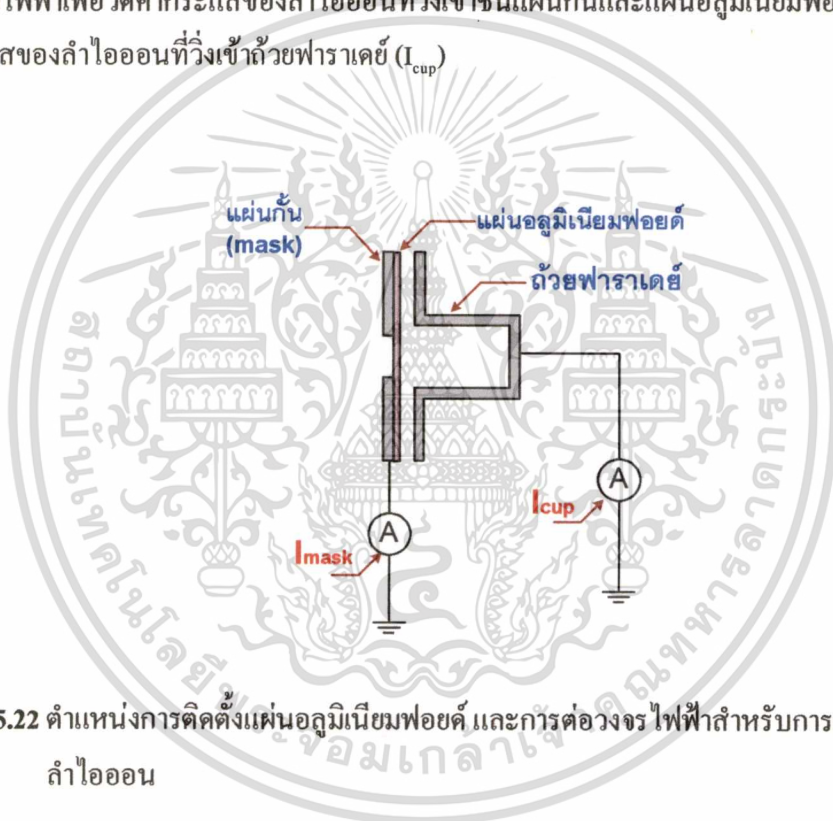
- รูปที่ 5.21** การเปรียบเทียบขนาดของลำไอออนเมื่อปรับเปลี่ยนระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโตรดตัวตั้ง ที่ตำแหน่งการวัดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และลำไอออนมีระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์
- (ก) ระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโตรดตัวตั้ง 31.2 มิลลิเมตร
- (ข) ระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโตรดตัวตั้ง 50.0 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 การใช้ลำไอออนเจาะแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์

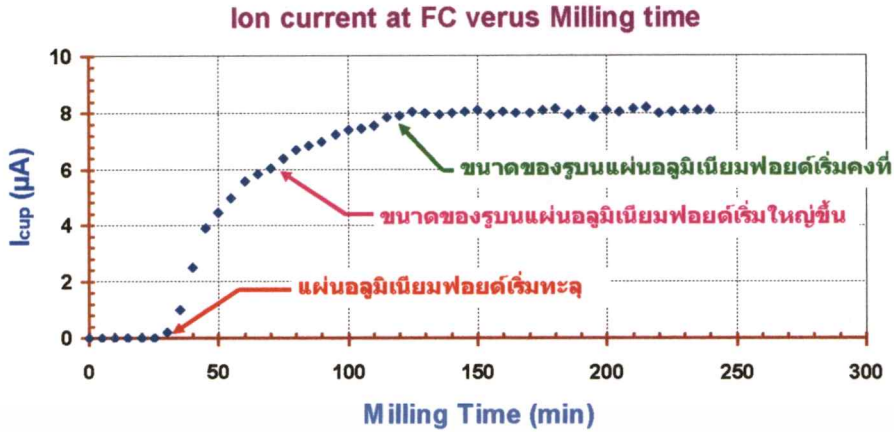
จากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่าระบบโฟกัสลำไอออนสามารถโฟกัสลำไอออนซึ่งมีระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ให้มีขนาดเล็กที่สุดได้ 180 ไมโครเมตร โดยมีความหนาแน่นของกระแสไอออน 26.2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมีระยะโฟกัส 10 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบขนาดที่แท้จริงของลำไอออน จึงได้นำไอออนดังกล่าวไปทำการเจาะรูลงแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์(aluminum foil) ความหนา 20 ไมโครเมตร

ในการทดลองเจาะรูลงบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ ทำได้โดยนำแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ดังกล่าวไปติดไว้ด้านหลังของแผ่นกั้น(mask) ที่อยู่ด้านหน้าถ้วยฟาราเดย์ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.22 จากนั้นต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อวัดค่ากระแสของลำไอออนที่วิ่งเข้าชนแผ่นกั้นและแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (I_{mask}) และกระแสของลำไอออนที่วิ่งเข้าถ้วยฟาราเดย์ (I_{cup})



รูปที่ 5.22 ตำแหน่งการติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์และการต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการเจาะรูด้วยลำไอออน

สำหรับผลการทดลองเมื่อใช้ลำไอออนระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ขนาด 180 ไมโครเมตร มีระยะโฟกัสที่ 10 มิลลิเมตร ซึ่งก่อนการทดลองจะวัดค่ากระแส I_{mask} เพื่อทดสอบสถานะการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออน โดยจะปรับระบบให้มีค่ากระแสดังกล่าวคงที่ตลอดการทดลอง จากนั้นทำการวัดค่ากระแสของถ้วยฟาราเดย์เพื่อตรวจสอบการทะลุของรูที่เจาะ โดยบันทึกการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของถ้วยฟาราเดย์กับเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออนได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.23

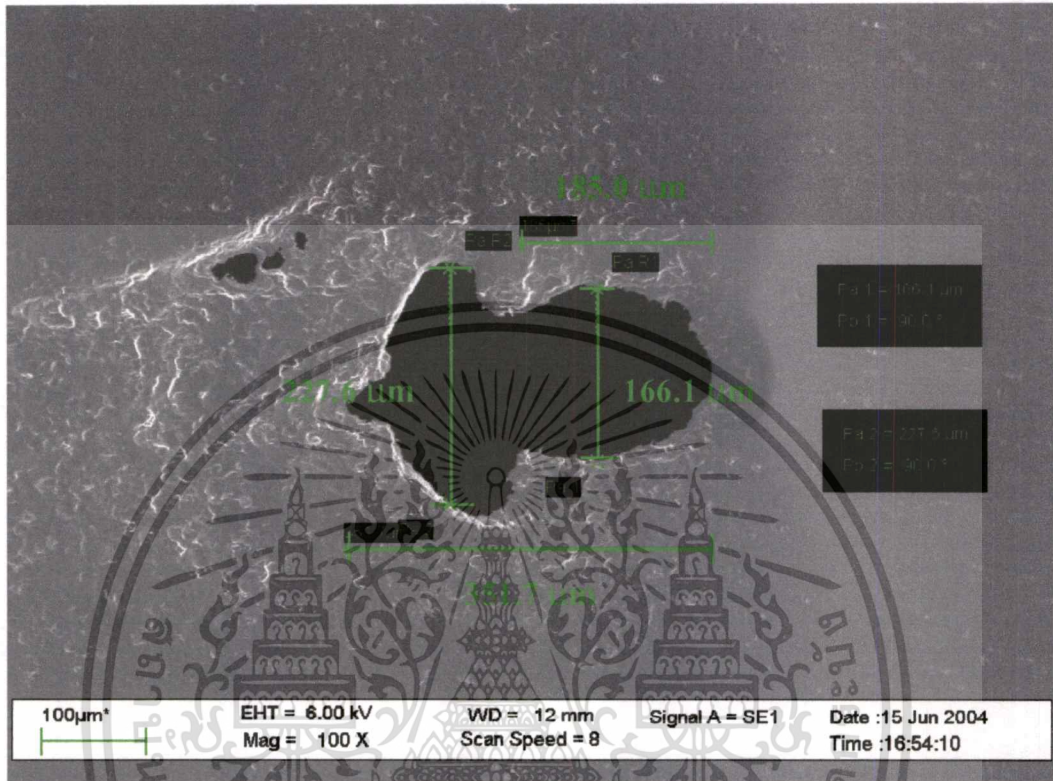


รูปที่ 5.23 การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ถ้วยฟาราเดย์เทียบกับเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออนในการทดลองเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์หนา 20 ไมโครเมตร เมื่อใช้ลำไอออนที่มีระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ขนาด 180 ไมโครเมตร ที่ระยะ 10 มิลลิเมตร ห่างจากชุดเลนส์

จากแผนภาพแสดงตำแหน่งการติดตั้งของแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ระบบวัดกระแสในรูปที่ 5.22 และผลการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสที่ถ้วยฟาราเดย์กับเวลาที่ใช้ในรูปที่ 5.23 สามารถอธิบายได้ว่า ในช่วงเริ่มต้นการเจาะซึ่งเวลายังน้อยกว่า 30 นาที กระแสของถ้วยฟาราเดย์ที่วัดได้จะยังมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงว่าช่วงเวลานี้ลำไอออนยังไม่สามารถทะลุแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์เข้าไปถึงถ้วยฟาราเดย์ได้ ที่เวลา 30 นาที กระแสถ้วยฟาราเดย์ที่วัดได้เริ่มมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าลำไอออนเริ่มที่จะทะลุผ่านแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์เข้าไปถึงถ้วยฟาราเดย์ได้ หลังจากนั้นค่ากระแสถ้วยฟาราเดย์ที่วัดได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงเวลา 50 นาที แสดงได้ว่ารูที่เจาะทะลุเริ่มมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วตามเวลาที่เพิ่มขึ้นด้วย หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของค่ากระแสถ้วยฟาราเดย์จะมีค่าลดลงจนกระทั่งคงที่ที่เวลาประมาณ 120 นาที ซึ่งแสดงได้ว่ารูที่เจาะมีขนาดใหญ่เท่ากับขนาดของลำไอออนแล้ว และจะไม่มีการเพิ่มขึ้นอีก จากการวัดการเปลี่ยนแปลงของถ้วยฟาราเดย์เทียบกับเวลานี้เองทำให้ทราบว่า ลำไอออนสามารถเจาะทะลุแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ได้ที่เวลาใด และเมื่อวัดขนาดของรูที่เจาะได้ในช่วงเวลาต่างๆแล้ว จะสามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวกำหนดขนาดของรูที่เจาะ โดยการควบคุมเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออนนั่นเอง

เนื่องจากรูที่ได้จากการเจาะนั้นมีขนาดเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตร จึงต้องนำไปวัดขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งได้ผลการวัดแสดงได้ในรูปที่ 5.24 ซึ่งในรูปจะแสดงขนาดของรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ เมื่อใช้เวลาเจาะทั้งหมด 240 นาที สังเกตเห็นได้ว่ารูที่ได้จะมีลักษณะไม่กลม แต่มีลักษณะเหมือนกับแบ่งเป็น 2 ส่วนซ้อนทับกัน โดย

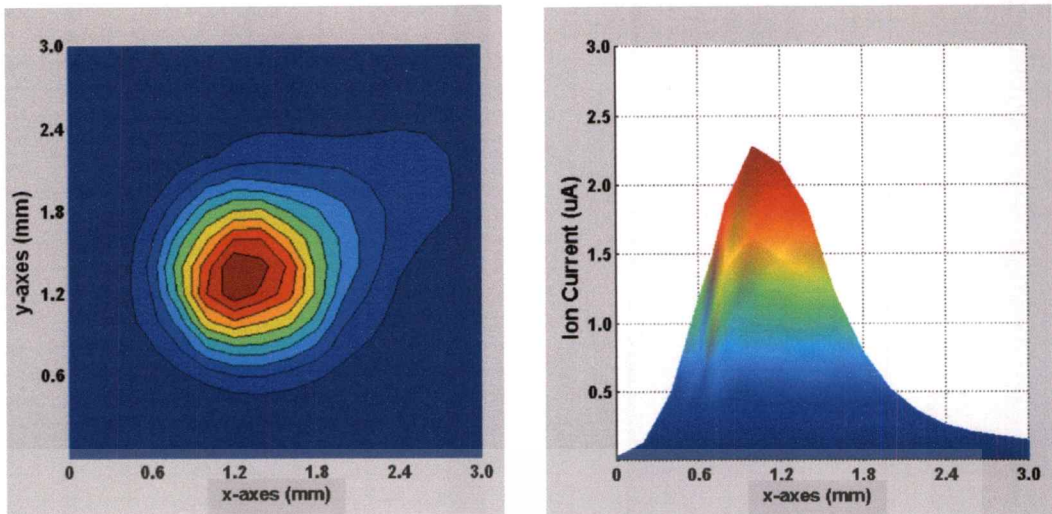
ร่องทางขวจะมีลักษณะค่อนข้างกลม แต่ส่วนทางซ้ายจะไม่กลม ซึ่งขนาดของร่องทางด้านขวา โดยประมาณจะมีส่วนยาว 185 ไมโครเมตร และส่วนกว้าง 165 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับที่วัดได้ด้วยวิธีขอบมืด



รูปที่ 5.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของรูบนแผ่นอลูมิเนียมพอยด์ที่เกิดจากการใช้ลำไอออนระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ขนาด 180 ไมโครเมตร ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 10 มิลลิเมตร เมื่อเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออน 240 นาที

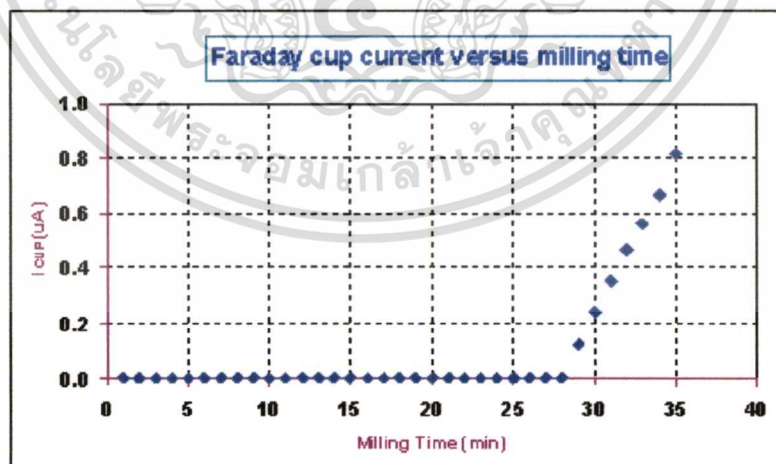
จากการที่ลักษณะของรูโดยรวม ไม่กลมมนนั้น แสดงว่าที่จริงแล้ว รูปร่างของลำไอออนไม่ได้มีลักษณะเป็นเกาส์เซียน (Gaussian beam) อย่างที่ตั้งสมมุติฐานไว้ ซึ่งเมื่อย้อนกลับไปพิจารณาผลการวัดรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็ม พบว่ารูปร่างของลำไอออนมีลักษณะดังรูปที่ 5.25 ซึ่งในรูปร่างของลำไอออนจะมีลักษณะกลมจริงเฉพาะบริเวณใจกลาง (เส้นสีแดง) จนถึงบริเวณกึ่งกลางของลำไอออน (เส้นสีเขียว) ซึ่งเป็นบริเวณที่ทำการวัดขนาดลำไอออน (FWHM) เท่านั้น โดยลำไอออนตั้งแต่ช่วงบริเวณสีแดงจนถึงช่วงสีเขียวนี้จะมี ความหนาแน่นกระแสเป็นแบบเกาส์เซียน และจากนั้นลำไอออนจะเริ่มมีลักษณะไม่กลม (เส้นสีน้ำเงิน) ซึ่งในตอนแรกคาดว่าบริเวณดังกล่าวจะไม่ส่งผลต่อการเจาะ เพราะว่าเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของไอออนต่ำมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



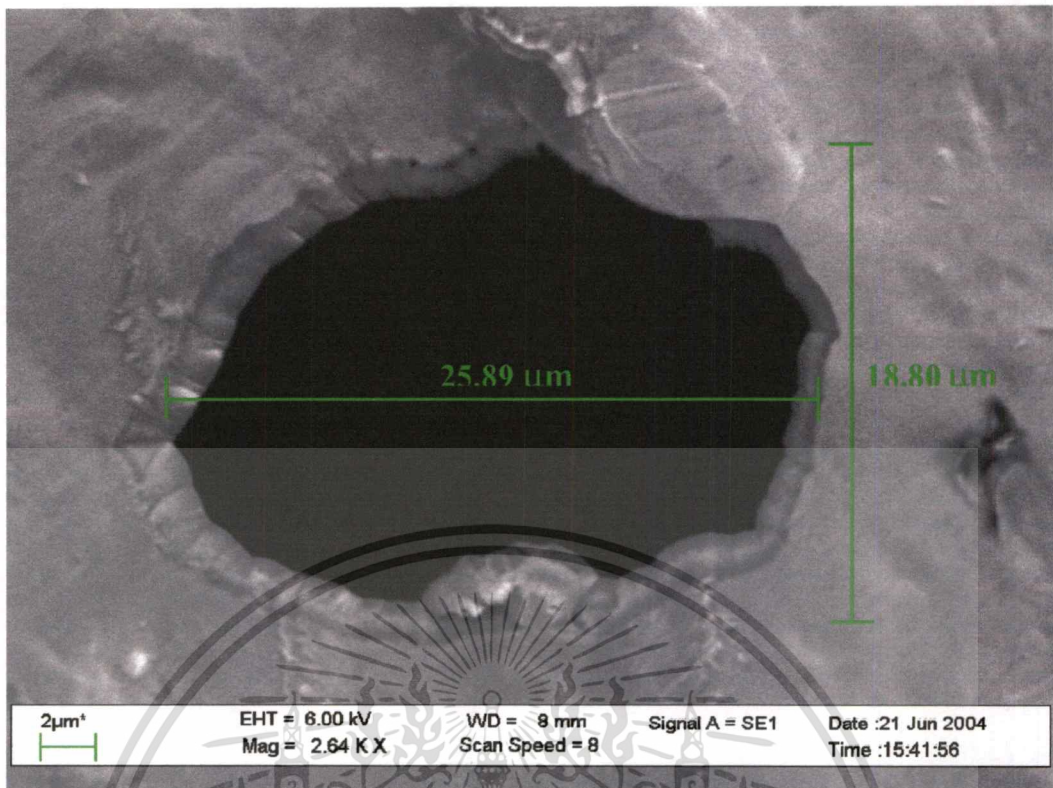
รูปที่ 5.25 ลักษณะรูปร่างของลำไอออนที่ใช้ในการเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ในรูปที่ 5.24

จากนั้นได้ทำการเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์อีกครั้ง แต่จะใช้เวลาน้อยลง โดยตั้งสมมุติฐานว่าขอบของลำไอออนในส่วนที่ไม่กลมจะมีความหนาแน่นของลำไอออนต่ำมากจนไม่สามารถทำให้แผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ทะลุได้ ผลจากการเจาะจะเกิดจากลำไอออนบริเวณใจกลางลำไอออนเป็นหลัก โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการเจาะเพียง 35 นาที โดยเมื่อสามารถวัดค่ากระแสที่ถ้วยฟาราเดย์ได้ จะปล่อยให้ลำไอออนวิ่งเข้าชนอีกประมาณ 7 นาที ซึ่งจะได้ผลการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสที่ถ้วยฟาราเดย์กับเวลาที่ใช้ ดังรูปที่ 5.26 และมีลักษณะรูปร่างของรูที่สามารถเจาะได้ ดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.26 การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ถ้วยฟาราเดย์เมื่อทำการเจาะแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์เป็นเวลา 35 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของรูบนแผ่นอลูมิเนียมพอลิเมอร์ที่เกิดจากการใช้ลำไอออนระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ขนาด 180 ไมโครเมตร ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 10 มิลลิเมตร เมื่อเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออน 35 นาที

จากรูปที่ 5.27 พบว่าการลดเวลาที่ใช้ในการเจาะลงเหลือ 35 นาที จะได้ลักษณะรูปร่างของลำไอออนค่อนข้างกลมมากขึ้น เนื่องจากรูที่เกิดจากส่วนของลำไอออนที่มีความหนาแน่นของกระแสสูงจะมีลักษณะรูปร่างของลำไอออนค่อนข้างกลม ซึ่งก็คือบริเวณสีแดงในรูปที่ 5.25

5.2.4 การปรับปรุงระบบโฟกัสแบบเลนส์เดี่ยว

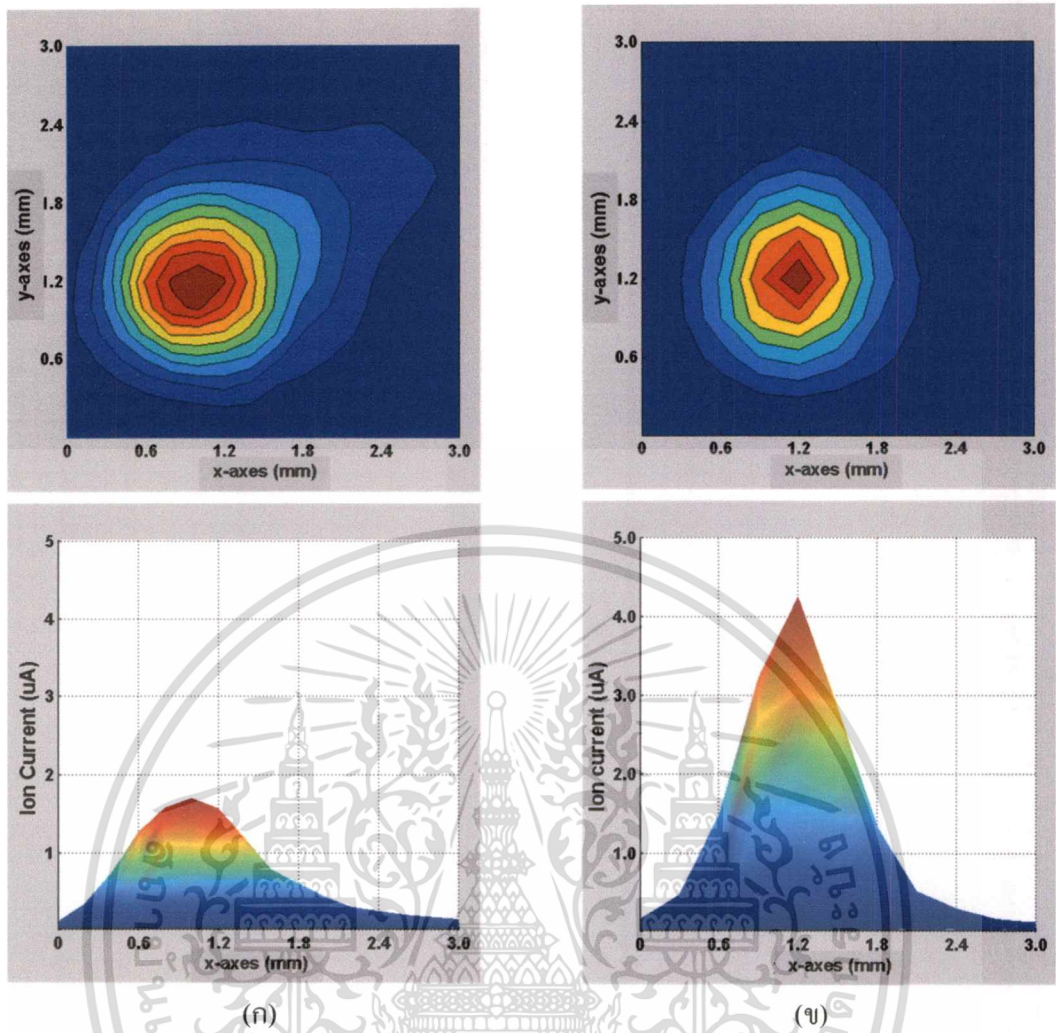
จากผลที่ได้จากการใช้ลำไอออนเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมพอลิเมอร์ พบว่าลำไอออนมีลักษณะที่ไม่กลมเฉพาะที่บริเวณขอบๆ ของลำไอออน ส่งผลให้รูปที่ได้จากการเจาะมีลักษณะไม่กลมตามไปด้วย จากการพิจารณาถึงสาเหตุที่ทำให้ลำไอออนเกิดการบิดเบี้ยว และไม่กลมที่บริเวณขอบของลำไอออนนั้น เนื่องจากไอออนเกิดจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแล้วถูกดึงออกเป็นลำไอออนด้วยระบบดึงไอออน หลังจากนั้นลำไอออนจะถูกบีบให้มีขนาดเล็กเมื่อเคลื่อนที่ผ่านระบบโฟกัส ดังนั้น สาเหตุที่ทำให้ลำไอออน ที่ถูกโฟกัสแล้วไม่กลมน่าจะมีอยู่ 2 สาเหตุ คือ สาเหตุแรกคาดว่าน่าจะเป็น

เนื่องจาก ลำไอออนมีลักษณะไม่กลมตั้งแต่เคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด และอีกสาเหตุคือ เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าของขดเลนส์เอง

จากการพิจารณาผลการวัดรูปร่างของลำไอออนที่ถูกดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา เมื่อยังไม่ได้ติดตั้งระบบโพกัส พบว่าลักษณะรูปร่างของลำไอออนนั้นค่อนข้างกลมดังเห็นได้จาก รูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้ลำไอออนนั้นเกิดการบิดเบี้ยวตรงบริเวณของขอบลำนั้น น่าจะมีสาเหตุมาจากสนามไฟฟ้าของขดเลนส์ ซึ่งจากการพิจารณาลักษณะและโครงสร้างของขดเลนส์แล้ว พบว่า ชิ้นงานที่นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าของระบบโพกัสนั้นเป็นแผ่น โลหะที่มีความหนา เพียง 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งได้จากการนำโลหะทรงกระบอกตันยาวมาแบ่งออกเป็นส่วนๆ แล้วนำไป กลึงเป็นแผ่นให้เหลือความหนาเพียง 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะมีความร้อนเกิดขึ้น ส่งผลให้แผ่น โลหะที่กลึงออกมานั้นเกิดการบิดงอและไม่ได้ระนาบ นอกจากนี้ในการเจาะรูบนแผ่นโลหะ แต่ละแผ่นก็ทำการเจาะทีละแผ่น ทำให้เมื่อนำมาติดตั้งเข้ากับระบบจับยึดแล้ว โอกาสที่จุดศูนย์กลางของแผ่นโลหะแต่ละแผ่นจะไม่อยู่บนแนวเดียวกันมีมาก จากสาเหตุดังกล่าว น่าจะเป็นสาเหตุสำคัญ ที่ทำให้สนามไฟฟ้าที่ออกมาตามขั้วไฟฟ้า ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ แรงกระทำทางไฟฟ้าที่จะกระทำ ต่ออนุภาคภายในลำไอออน ในแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากันทุกทิศทาง ส่งผลให้เกิดการเสียรูปทรงของลำ ไอออนในที่สุด

สาเหตุดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ โดยการเปลี่ยนขั้นตอนในการผลิตโลหะที่นำมาใช้ทำเป็น ขั้วไฟฟ้าเสียใหม่ โดยใช้โลหะที่มีความหนาเพียง 0.3 มิลลิเมตร ซึ่งผลิตมาจากโรงงานผู้ผลิต โดยตรง มาใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้า และเปลี่ยนวิธีการเจาะรูซึ่งเดิมใช้เครื่องเจาะมาเป็นการเจาะด้วย เลเซอร์ ซึ่งมีระบบการวัดระยะและขนาดที่มีความแม่นยำสูง และมากกว่าเครื่องเจาะธรรมดา

หลังจากนั้น ได้ทำการติดตั้งระบบ โพกัสชุดใหม่ โดยระบบโพกัสชุดใหม่นี้ยังคง ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสี่ขั้ว ทำมาจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมความหนา 0.3 มิลลิเมตร ระยะห่าง ระหว่างชิ้นเลนส์และขนาดรูตรงกลางยังคงเท่าเดิม รวมทั้งเงื่อนไขและสภาวะต่างๆ ในการทดลอง ยังคงเดิม และการต่อวงจร ไฟฟ้าให้กับระบบโพกัส ยังคงเป็นดังรูปที่ 5.13 โดยผลการวัดขนาดและ รูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็มขนาด 1 มิลลิเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 5.28(ข)



รูปที่ 5.28 ลักษณะรูปร่างของลำไอออนที่ได้จากชุดเลนส์ซึ่งแผ่นโลหะที่นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าของชุดเลนส์มีขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน

(ก) แผ่นโลหะที่นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าของชุดเลนส์ได้มาจากการนำ โลหะท่อนมาแบ่งแล้วทำการกลึงให้เป็นแผ่นมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร

(ข) แผ่นโลหะที่นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าของชุดเลนส์ได้มาจากแผ่น โลหะที่รีดให้บาง โดยโรงงานผู้ผลิตแต่ละแผ่นมีความหนา 0.3 มิลลิเมตร

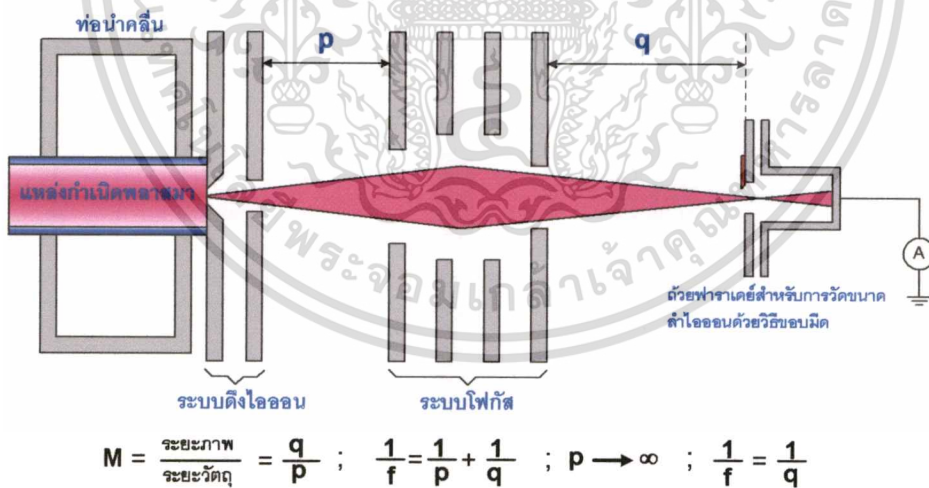
จากผลการวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออน จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าเป็นแผ่นโลหะบางซึ่งได้มาจากการรีดของโรงงานผู้ผลิต และเพิ่มความแม่นยำในการเจาะรูให้กับชิ้นเลนส์มากขึ้น พบว่ารูปร่างของลำไอออนซึ่งจากเดิมเฉพาะบริเวณใจกลางของลำไอออนเท่านั้นที่มีความกลมแต่บริเวณขอบของลำนั้น ไม่กลม จะมีรูปร่างของลำไอออนที่กลมเท่ากันตลอดทั้ง

ภาพตัดขวาง(cross section) ของลำไอออน นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้อีกว่า จำนวนไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านระบบโพกัสมายังถ้วยฟาราเดย์มีจำนวนมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.28(ข)

สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงวิธีการผลิตลำไฟฟ้าเป็นการใช้โลหะที่มีความหนาเพียง 0.3 มิลลิเมตรและเพิ่มความแม่นยำในการเจาะรูแผ่น โลหะที่นำมาผลิตเป็นลำไฟฟ้าของระบบโพกัส จะส่งผลให้ลำไอออนที่ได้มีลักษณะรูปร่างกลมมากขึ้นกว่าเดิม นอกจากนี้ยังทำให้ค่ากระแสสูงสุดของลำไอออนที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เท่าอีกด้วย

5.3 การศึกษาระบบโพกัสแบบเลนส์สองชุด

จากผลการทดลองในระบบโพกัสแบบเลนส์ชุดเดียว พบว่าขนาดของลำไอออนจะมีความสัมพันธ์กับระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้ง โดยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อระยะห่างมีค่ามากขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้งมีค่ามากขึ้น จะเสมือนว่าเป็นการเพิ่มระยะวัตถุ (แหล่งกำเนิดไอออน) ของชุดเลนส์ให้มีค่ามากขึ้น (ระยะ p มีค่ามากขึ้น) ส่งผลให้กำลังขยายของชุดเลนส์มีค่าลดลง นั่นคือจะได้ขนาดภาพ ณ จุดโพกัสมีขนาดเล็กลงด้วย และถ้าระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้งมีค่ามากขึ้นจนทำให้ลำไอออนเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดเลนส์เป็นลำขนานแล้ว ขนาดของลำไอออนที่ได้จากชุดเลนส์จะมีขนาดเล็กลงจนเป็นจุด และจะได้ระยะภาพหรือระยะโพกัสมีค่าเท่ากับความยาวโพกัสของชุดเลนส์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.29

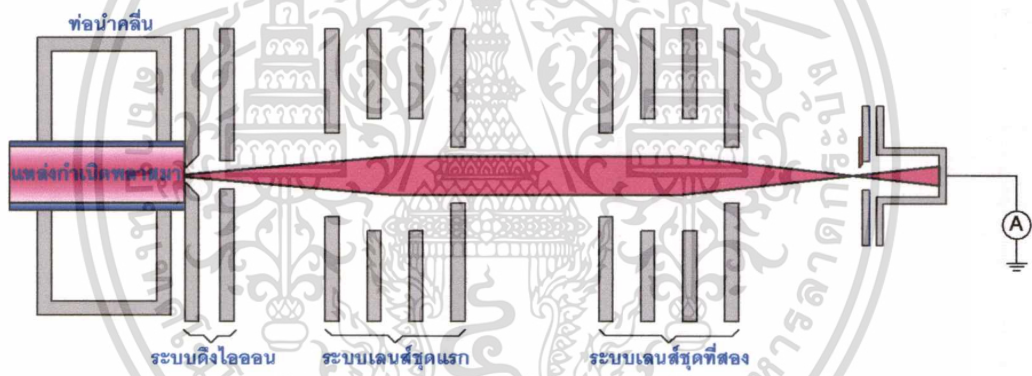


รูปที่ 5.29 ระบบโพกัสลำไอออนแบบเลนส์ชุดเดียว ถ้าระยะ $p \rightarrow \infty$ จะส่งผลให้อัตราการขยายของชุดเลนส์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ในทางปฏิบัตินั้น จะมีข้อจำกัดของการเพิ่มระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้งให้มากขึ้นนั้น เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มค่าดังกล่าวจนถึงระดับหนึ่งแล้ว จำนวนไอออนที่จะเข้าสู่ชุดเลนส์จะมีค่าน้อยลง เนื่องจากมุมบานของลำไอออน และวิถีอิสระเฉลี่ย(mean free path) ของลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด ดังนั้น ถ้าสามารถทำให้ลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออนมีลำขนานก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดเลนส์โฟกัสได้ โดยไม่ต้องมีการเพิ่มระยะห่างของชุดเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้งแล้ว จะส่งผลให้ได้ลำไอออนที่มีขนาดเล็กลง และความหนาแน่นของกระแสไอออนมีค่าสูงขึ้นด้วย จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้ทำการสร้างระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุด โดยที่แต่ละชุดมีหน้าที่ต่างกัน คือ

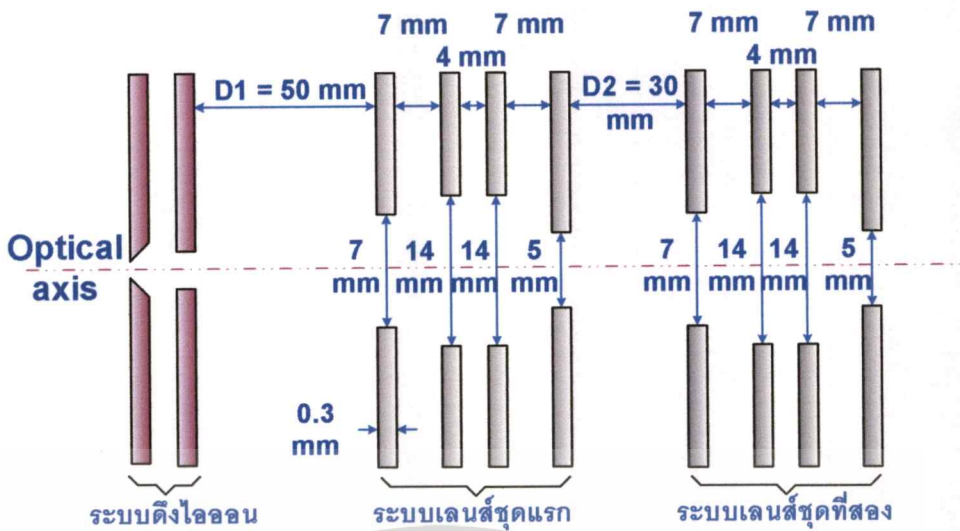
- **เลนส์ชุดแรก** ทำหน้าที่ควบคุมให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออน ซึ่งมีมุมบาน 2 องศา เกิดเป็นลำไอออนขนาน
- **เลนส์ชุดที่สอง** ทำหน้าที่ในการโฟกัสลำไอออนที่ได้จากเลนส์ชุดแรก และกำหนดตำแหน่งโฟกัสของลำไอออนที่ได้จากระบบ

โดยแผนภาพการทำงานของระบบเลนส์โฟกัสแบบเลนส์สองชุดแสดงได้ในรูปที่ 5.30



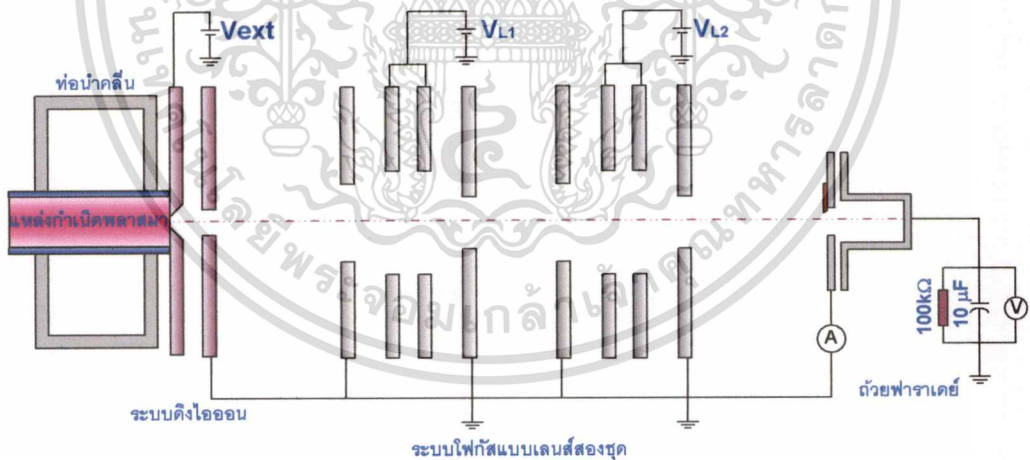
รูปที่ 5.30 การทำงานของระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุด

ระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุดนั้น เลนส์แต่ละชุดจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว แต่ละขั้วทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม(stainless steel) หนา 0.3 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลมมีรูกลมเจาะทะลุตรงกลาง ซึ่งขนาดและรูปร่างของขั้วไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างเลนส์แต่ละชั้น แสดงได้ดังรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 การจัดวางขั้วเลนส์ของระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุด

สำหรับการวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนเพื่อศึกษาระบบโฟกัสนั้นจะมีการต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 5.32 โดยที่จะวัดลำไอออนด้วยวิธีการวัดทั้ง 2 วิธี คือการวัดด้วยวิธีกวาดรูเข็มขนาด 1 มิลลิเมตร และการวัดด้วยวิธีขอบมืด



รูปที่ 5.32 การต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการศึกษาระบบเลนส์โฟกัสแบบเลนส์สองชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาระบบเลนส์โฟกัสแบบเลนส์สองชุด จะศึกษาถึงผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ทั้งสองว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อขนาด รูปร่าง ระยะโฟกัส และแนววิถีการเคลื่อนที่ของลำไอออน นอกจากนี้ยังทำการทดสอบใช้ลำไอออนเจาะแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อตรวจสอบรูปร่างของลำไอออนอีกด้วย

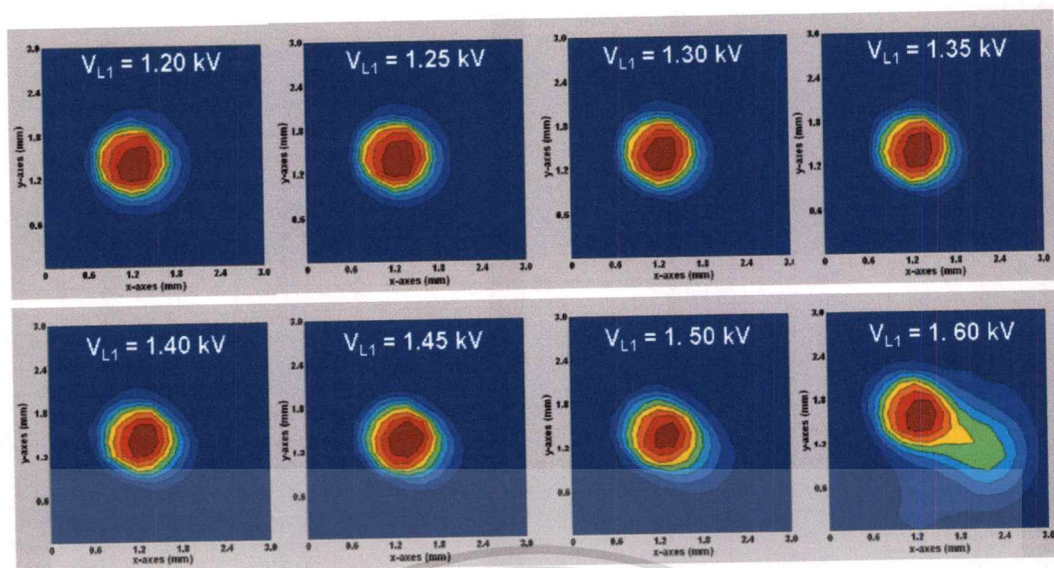
สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับเลนส์ชุดแรก(V_{L1}) และผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง(V_{L2}) จะมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- P _{main chamber}	8.5×10^{-6}	mbar
- P _{plasma tube}	3.0×10^{-2}	mbar
- Magnetron Power	25.0	W
- Beam energy	1.70	keV
- Extractor to 1 st Lens distance	50.0	mm
- 1 st Lens to 2 nd Lens distance	30.0	mm
- scan area	3.0 x 3.0	mm ²
- scan step	0.20	mm

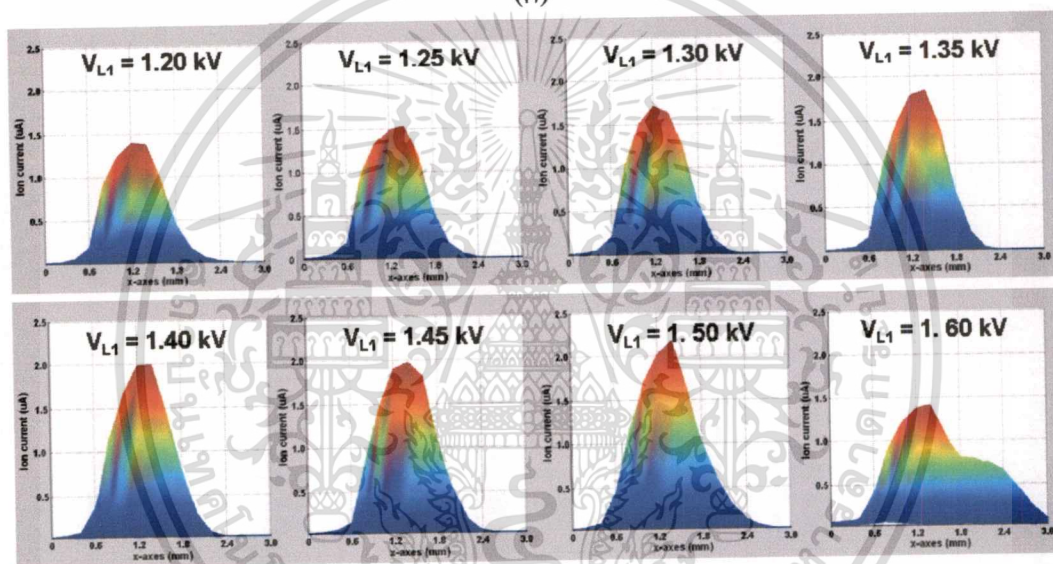
โดยจะมีผลการทดลองในแต่ละส่วนดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.3.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรก

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรก(V_{L1}) ทำได้โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับเลนส์ชุดที่สองด้วยค่า V_{L2} เท่ากับ 1.80 กิโลโวลต์ และวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็ม เมื่อถ้วยฟาราเดย์อยู่ห่างจากชั้นเลนส์ชิ้นสุดท้ายเป็นระยะ 14 มิลลิเมตร ได้ผลการวัดแสดงได้ในรูปที่ 5.33(ก) และ รูปที่ 5.33(ข) โดยพื้นที่ในการสแกนลำไอออนขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตร ซึ่งรูปที่ 5.33(ก) แสดงมุมมองด้านบนของลำไอออนและรูปที่ 5.33(ข) แสดงมุมมองด้านข้างของลำไอออน เมื่อแกนตั้งเป็นขนาดกระแสน้ำของลำไอออน



(ก)



(ข)

- รูปที่ 5.33 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรก (V_{L1}) ที่มีต่อขนาดและรูปร่างของลำไอออน เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่ 2 (V_{L2}) เท่ากับ 1.80 กิโลโวลต์ และวัดที่ระยะ 14 มิลลิเมตรห่างจากชั้นเลนส์สิ้นสุดท้าย
- (ก) มองจากด้านบน
- (ข) มองจากด้านข้าง

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.33(ก) เห็นได้ชัดเจนว่า ขนาดและรูปร่างของลำไอออนที่ได้ นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรก โดยเมื่อ V_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.20 กิโลโวลต์ไปเป็น 1.35 กิโลโวลต์ ขนาดของลำไอออนจะมีขนาดเล็กลงและกลม

มากขึ้น นอกจากนี้จะเห็นได้ก็ว่า ในขณะที่ V_{L1} มีค่า 1.20 กิโลโวลต์ เส้นแสดงรูปร่าง(contour) ที่น้ำเงินเส้นนอกสุด จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีรูปร่างไม่สมมาตรกับใจกลางของลำไอออน แต่ถ้า V_{L1} มีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 1.35 กิโลโวลต์ เส้นแสดงรูปร่างสีน้ำเงินเส้นนอกสุดจะมีลักษณะกลมมากขึ้นและได้รูปร่างที่สมมาตรกับใจกลางของลำไอออน

แต่ถ้า V_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.35 กิโลโวลต์เป็น 1.60 กิโลโวลต์ จะส่งผลให้รูปร่างของลำไอออนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยจากเดิมซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลม แต่เมื่อ V_{L1} มีค่าเพิ่มมากขึ้น รูปร่างของลำไอออนเปลี่ยนไปเป็นวงรีและเอียงไปทางซ้าย และเสียรูปร่างมากยิ่งขึ้นเมื่อ V_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.60 กิโลโวลต์

นอกจากค่า V_{L1} ที่เป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดลักษณะรูปร่างของลำไอออนแล้วยังมีอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อระบบโฟกัส นั่นคือ V_{L2} โดยจากการศึกษาพบว่าค่า V_{L2} มีหน้าที่ในการกำหนดระยะโฟกัสของลำไอออน และยังพบอีกว่า ถ้าค่า V_{L2} เท่ากับ 1.80 กิโลโวลต์แล้ว ระยะโฟกัสของระบบโฟกัสจะสั้นกว่า 14 มิลลิเมตร เมื่อระยะห่างจากชุดเลนส์มีค่ามากกว่า 14 มิลลิเมตร รูปร่างของลำไอออนจะมีลักษณะเป็นวงรีที่เอียงไปทางซ้าย ซึ่งจากรูปที่ 5.31(ก) พบว่าขนาดและรูปร่างของลำไอออนทุกรูปค่อนข้างเอียงไปทางซ้าย ทั้งนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบของ V_{L2} ที่มีต่อขนาดและรูปร่างของลำไอออน โดยรายละเอียดสำหรับผลของ V_{L2} ที่มีต่อลำไอออน จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

สำหรับผลการทดลองในรูปที่ 5.33(ข) จะเห็นได้ว่าค่ากระแสของลำไอออนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า V_{L1} แต่เมื่อ V_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.60 กิโลโวลต์ กระแสของลำไอออนสูงสุดที่วัดได้ จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องลำไอออนมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนั่นเอง

สาเหตุที่ทำให้รูปร่างของลำไอออนมีลักษณะกลมและได้สมมาตร เมื่อ V_{L1} มีค่าอยู่ในช่วง 1.25 ถึง 1.35 กิโลโวลต์ ทั้งนี้สันนิษฐานได้ว่า ในกรณีที่ V_{L1} มีค่าไม่มากพอ อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากชุดเลนส์ที่ออกแรงกระทำต่อลำไอออนจะมีค่าน้อย ผลทำให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออนไม่ถูกเบี่ยงเบนเข้าหา optical axis หรือถูกเบี่ยงเบนน้อยมาก ลำไอออนที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชุดเลนส์ชุดที่สอง จึงเป็นลำไอออนที่ยังคงคู่ออกซึ่งอาจมีมุมบานของลำไอออนเท่ากับหรือน้อยกว่าลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดก็ได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวลำไอออนที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบเลนส์ชุดที่สอง จึงเป็นลำไอออนที่มีลักษณะของลำไอออนที่ยังคงคู่ออกอยู่ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบีบลำไอออนของระบบโฟกัสมีค่าลดลง ลำไอออนที่ได้จากระบบจึงมีขนาดเล็กลงไม่มากนัก

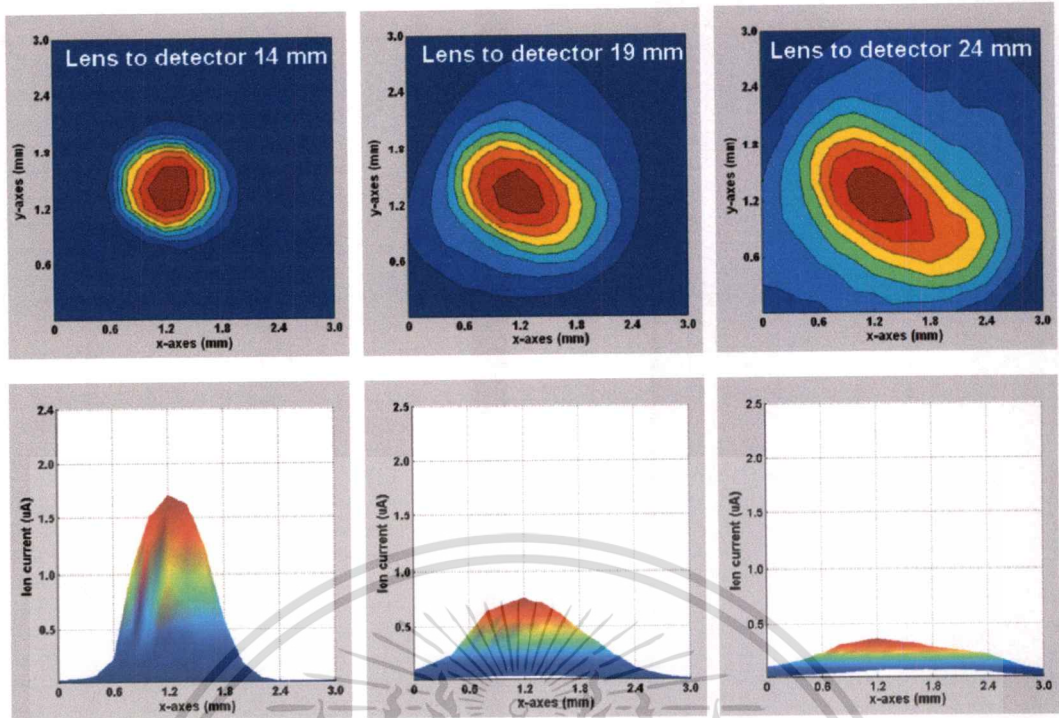
ถ้าปรับ V_{L1} ให้มีค่าที่เหมาะสมแล้ว จนทำให้เกิดเป็นลำไอออนที่ขนานเคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์ชุดที่สองได้ เลนส์ชุดที่สองจะทำการโฟกัสลำไอออนที่ขนานดังกล่าว ซึ่งขนาดและรูปร่างของลำไอออนที่ออกมาจากระบบโฟกัสในกรณีนี้มีลักษณะค่อนข้างกลมที่เดียว นอกจากนี้ขนาดของลำไอออนยังเล็กกว่าในกรณีที่ V_{L1} มีค่าน้อยและมากเกินไป สำหรับเหตุผลที่ทำให้ระบบ

โฟกัสไม่สามารถบีบลำไอออนให้มีขนาดเล็กลงกว่านี้จะได้กล่าวถึงต่อไป ซึ่งในทางทฤษฎีทางแสงแล้ว เมื่อรังสีแสงขนานเคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์ ซึ่งทำหน้าที่โฟกัสแล้วภาพที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กมาก

ในกรณี V_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นมากเกินไป จนส่งผลทำให้อิทธิพลจากสนามไฟฟ้าของเลนส์ชุดแรก ออกแรงกระทำทางไฟฟ้าต่อลำไอออนมากจนลำไอออนถูกเบี่ยงเบนเข้าหา optical axis ของเลนส์อย่างรวดเร็ว นั่นคือ ลำไอออนที่ได้จะมีระยะโฟกัสอยู่หน้า หรือภายในเลนส์ชุดที่สอง ซึ่งจากการทดลองพบว่าขนาดและรูปร่างของลำไอออนในกรณีนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่และมีรูปร่างบิดเบี้ยวไปมาก ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเป็นผลเนื่องจากแรงคูลอมบ์ระหว่างอนุภาคภายในลำไอออน จึงทำให้ขนาดของลำไอออนที่ออกมาจากเลนส์ชุดที่สองในกรณีนี้ มีขนาดค่อนข้างใหญ่และเสียรูปร่างไปมาก

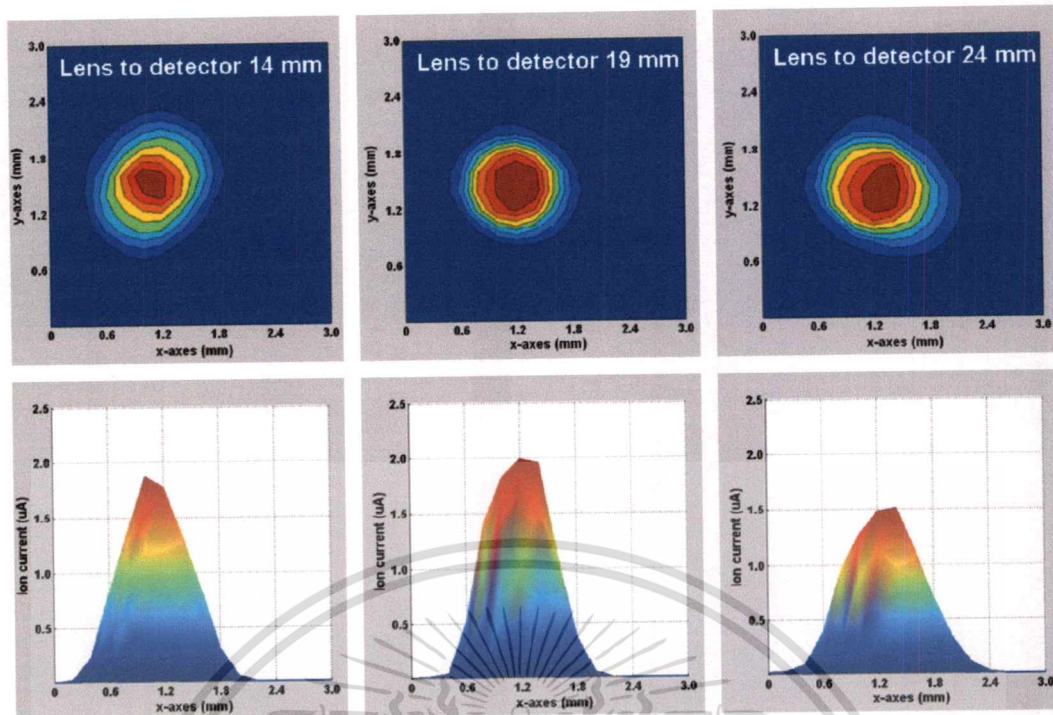
5.3.2 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง V_{L2} ทำได้โดยอาศัยแนวทางการศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรกที่มีต่อขนาดของลำไอออน ซึ่งจากการทดลองพบว่า สำหรับระบบโฟกัสนี้ ค่า V_{L1} ที่ทำให้ได้ลำไอออนมีลักษณะรูปร่างกลมมนั้น มีค่าอยู่ในช่วง 1.25 ถึง 1.35 กิโลโวลต์ โดยในการนี้เลือกใช้ $V_{L1} = 1.30$ กิโลโวลต์ และทำการปรับเปลี่ยน V_{L2} ตามค่าด้วยกันคือ 1.80, 1.65 และ 1.50 กิโลโวลต์ พร้อมกับเลื่อนถ้วยฟาราเดย์เพื่อทำการวัดที่ระยะห่างจากชั้นเลนส์ชั้นสุดท้ายระยะต่างๆ ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.34, 5.35 และ รูปที่ 5.36 ตามลำดับ



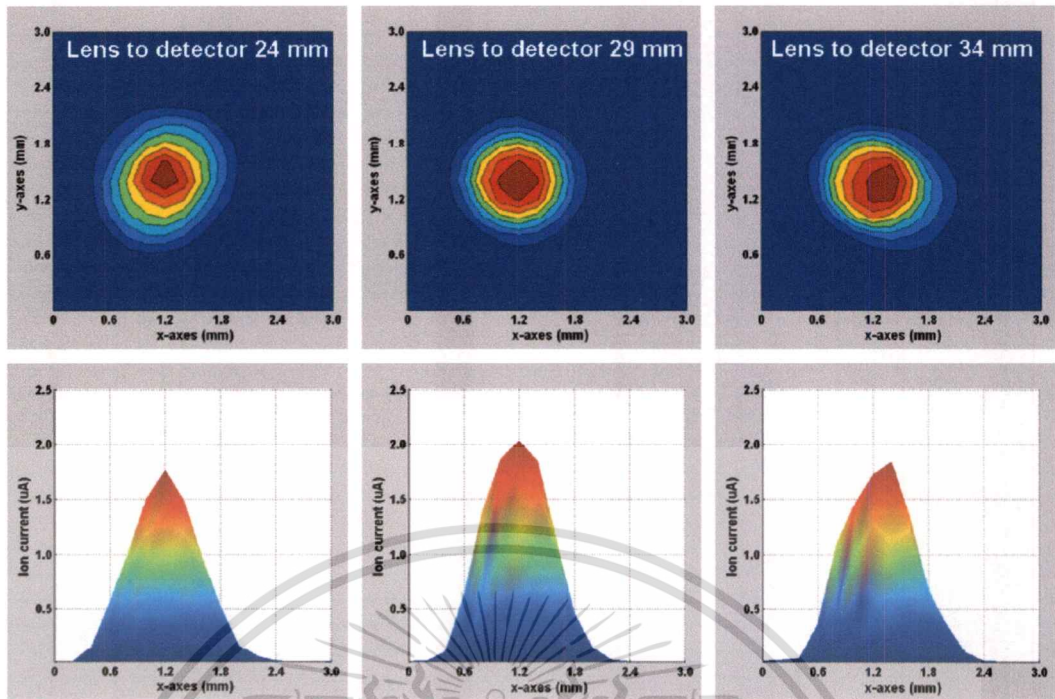
รูปที่ 5.34 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง เมื่อใช้ลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ $V_{L2}=1.80$ กิโลโวลต์ และ $V_{L1}=1.30$ กิโลโวลต์ ที่ตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ 14, 19 และ 24 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.34 พบว่า เมื่อทำการวัดขนาดและรูปร่างของด้วยวิธีการกวาดรูเข็มที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร ที่ระยะห่างจากระบบเลนส์ 14, 19 และ 24 มิลลิเมตร โดยทำการป้อน $V_{L2}=1.80$ กิโลโวลต์ ขนาดลำไอออนที่ได้จะมีขนาดเล็กที่สุด เมื่อวัดที่ระยะห่างจากเลนส์ 14 มิลลิเมตร และเมื่อวัดที่ระยะห่างจากเลนส์มากขึ้น จะเห็นได้ว่าขนาดของลำไอออนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยรูปร่างของลำไอออนที่ได้จากระยะต่างๆ ในกรณีนี้จะมีลักษณะรูปร่างเป็นวงรีและเอียงไปทางด้านซ้ายทั้งหมด



รูปที่ 5.35 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง เมื่อใช้ลำไอออนที่มีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ $V_{L2} = 1.65$ กิโลโวลต์ และ $V_{L1} = 1.30$ กิโลโวลต์ ที่ตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ 14, 19 และ 24 มิลลิเมตร

เมื่อทำการลดศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง ให้มีค่าเป็น 1.65 กิโลโวลต์ รูปร่างของลำไอออนที่ตำแหน่งเดิมจะเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 5.35 จากรูปที่ 5.34 สังเกตได้ว่าเมื่อ V_{L2} มีค่าเท่ากับ 1.80 กิโลโวลต์ รูปร่างของลำไอออนเมื่อวัดที่ระยะ 14 มิลลิเมตร จะมีลักษณะเป็นวงรีและเอียงไปทางซ้าย แต่ถ้า V_{L2} มีค่าลดลงเป็น 1.65 กิโลโวลต์ ลักษณะของลำไอออนยังคงเป็นวงรีเช่นเดิมแต่เปลี่ยนเป็นเอียงไปทางขวา โดยลำไอออนจะมีลักษณะรูปร่างกลมได้สมมาตรเมื่อวัดที่ระยะ 19 มิลลิเมตร ซึ่งต่างจากเดิมที่มีลักษณะวงรีและมีขนาดขยายใหญ่ และเมื่อวัดที่ระยะ 24 มิลลิเมตรพบว่า ลำไอออนมีลักษณะกลับเป็นวงรีอีกครั้ง และมีทิศทางการเอียงไปทางซ้ายเช่นเดิม ดังแสดงในรูปที่ 5.35 นอกจากนี้จากการทดลองยังพบอีกว่า ถ้าทำการเลื่อนตำแหน่งการวัดออกไปอีก มากขึ้นกว่าเดิม ลักษณะของลำไอออนที่วัดได้ จะยังคงมีรูปร่างเป็นวงรีเอียงไปทางซ้ายเช่นเดิม แต่จะมีขนาดของวงรีที่ขยายใหญ่มากขึ้น

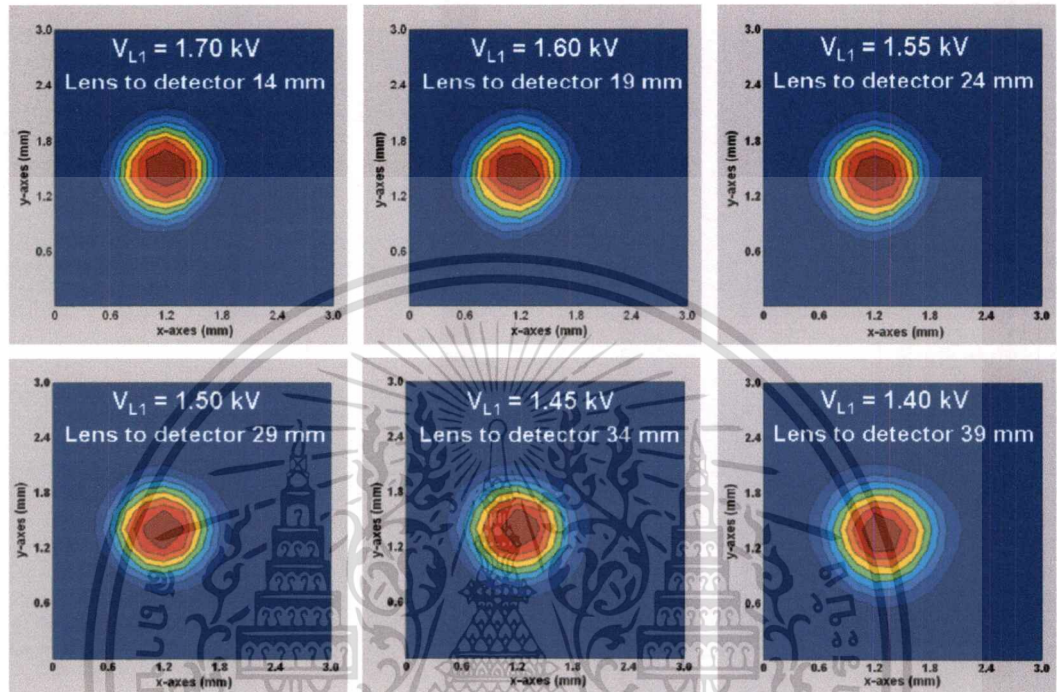


รูปที่ 5.36 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง เมื่อใช้ลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ $V_{L2} = 1.50$ กิโลโวลต์ และ $V_{L1} = 1.30$ กิโลโวลต์ ที่ตำแหน่งของถ้วยฟาราเดย์ 24, 29 และ 34 มิลลิเมตร

เมื่อลดศักย์ไฟฟ้าของ V_{L2} ลงให้เหลือเพียง 1.50 กิโลโวลต์ พบว่าตำแหน่งของลำไอออนที่มีลักษณะรูปร่างกลมจะเลื่อนออกห่างจากตำแหน่งเดิมไปอีก โดยอยู่ที่ระยะ 29 มิลลิเมตร ส่วนที่ตำแหน่ง 24 และ 34 มิลลิเมตรนั้น ลำไอออนที่วัดได้จะมีลักษณะเป็นวงรีเหมือนกันเพียงแต่จะมีทิศทางการเอียงไม่เหมือนกัน โดยที่ตำแหน่ง 24 มิลลิเมตรจะเอียงไปทางขวาและที่ตำแหน่ง 34 มิลลิเมตร จะเอียงไปทางซ้ายตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.36 โดย ณ ตำแหน่งที่ลำไอออนมีขนาดและรูปร่างกลมที่สุดกระแสไอออนสูงสุดที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าในกรณีที่ลำไอออนมีลักษณะเป็นวงรี

จากผลการทดลองดังกล่าวจึงได้ทดสอบเปลี่ยนค่า V_{L2} อีกหลายค่า แล้วทำการวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็มที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งต่างๆกัน ซึ่งถ้าพิจารณาว่าตำแหน่งที่ลำไอออนมีความกลมมากที่สุดเป็นตำแหน่งของจุดโฟกัสแล้ว พบว่าเมื่อ V_{L2} มีค่าเพิ่มมากยิ่งขึ้น ตำแหน่งของจุดโฟกัสจะเลื่อนเข้ามาใกล้ชุดเลนส์มากยิ่งขึ้น จากการสังเกตรูปร่างของลำไอออน พบว่าเมื่อระยะโฟกัสสั้นลง ขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัสมีขนาดเล็กลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.37 นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ที่ตำแหน่งก่อนและหลังจุดโฟกัส รูปร่างของลำไอออนมีลักษณะเป็นวงรี โดยถ้าเป็นตำแหน่งก่อนระยะโฟกัส ลำไอออนก็จะมีลักษณะเป็นวงรี

เอียงไปทางขวา แต่ถ้าเป็นตำแหน่งหลังจากผ่านจุดโฟกัสไปแล้ว ลำไอออนก็จะมีลักษณะเป็นวงรีเอียงไปทางซ้าย ซึ่งปรากฏการณ์ในลักษณะนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรก (สำหรับรูปร่างของลำไอออน ณ ตำแหน่งก่อนและหลังจุดโฟกัส จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลการทดลองในรูปที่ 5.35 และ 5.36 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น)



รูปที่ 5.37 ขนาดของลำไอออน ณ ตำแหน่งโฟกัสเมื่อ V_{L2} ค่าต่างๆ

นอกจากนี้ จากการศึกษาผลของ V_{L1} ที่มีต่อรูปร่างของลำไอออนที่ผ่านมานั้น จากผลการทดลองในรูปที่ 5.33(ก) สังเกตเห็นได้ว่า รูปร่างของลำไอออนในกรณีนี้ที่ V_{L1} มีค่าเป็น 1.30 กิโลโวลต์นั้น แม้ว่ารูปร่างของลำไอออนมีลักษณะค่อนข้างกลมก็จริง แต่ลักษณะการวางตัวของลำไอออนเอียงไปทางซ้ายเล็กน้อย โดยถ้านำผลของ V_{L2} ที่มีต่อรูปร่างของลำไอออนมาพิจารณาด้วยนั้นจะพบว่า ถ้าต้องการให้เกิดลำไอออนที่มีความกลมมากที่สุด ที่ระยะห่างจากเลนส์ 14 มิลลิเมตร จะต้องทำการป้อน V_{L2} ให้มีค่าเท่ากับ 1.70 กิโลโวลต์ แต่รูปร่างของลำไอออนในรูปที่ 5.33(ก) มีค่าเป็น 1.80 กิโลโวลต์ ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งโฟกัสของระบบมีระยะสั้นกว่า 14 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองที่ผ่านมา พอสรุปได้ว่า กรณีของระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุดนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรก จะมีหน้าที่ในการปรับเปลี่ยนแนววิถีการเคลื่อนที่ของไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด ก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์ชุดที่สอง โดยจะบังคับให้มีลักษณะลำที่ถู้ออก ขนาน หรือเป็นลำไอออนที่ถูกโฟกัสอยู่ด้านหน้าหรือภายในเลนส์ชุดที่สอง โดยถ้า V_{L1} มีค่า

น้อยจนเกินไป ขนาดของลำไอออนที่ออกจากระบบโฟกัสมีขนาดใหญ่และมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากเดิมมาก ระดับศักย์ไฟฟ้าของ V_{L1} ที่เหมาะสมจะทำให้มีลำไอออนขนานเคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์ชุดที่สองในระบบโฟกัส ส่งผลให้รูปร่างของลำไอออนที่ออกมาจากระบบโฟกัสค่อนข้างกลมและมีขนาดเล็กกว่าในกรณีที่ศักย์ไฟฟ้า V_{L1} มีค่าน้อยและมากจนเกินไป

ส่วนศักย์ไฟฟ้า V_{L2} มีหน้าที่หลักในการกำหนดระยะโฟกัสของระบบ โดยเมื่อ V_{L2} มีค่ามากขึ้น จุดโฟกัสของระบบจะอยู่ใกล้เลนส์มากขึ้น หรืออาจอยู่ภายในระบบโฟกัสก็ได้ แต่ถ้าศักย์ไฟฟ้า V_{L2} มีค่าน้อยลง ระยะโฟกัสของระบบจะยาวขึ้น โดยขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัสซึ่งเกิดจากระบบโฟกัสที่มีระยะโฟกัสสั้นจะมีขนาดเล็กกว่า เมื่อเทียบกับขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัสซึ่งเกิดจากระบบโฟกัสที่มีระยะโฟกัสยาวกว่า โดยรูปร่างของลำไอออนที่จุดโฟกัสนี้ จะมีลักษณะกลมมากขึ้น ถ้า V_{L1} มีค่าเหมาะสม และนอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของลำไอออนก่อนและหลังจุดโฟกัสมีลักษณะเป็นวงรีโดยจะเอียงซ้ายหรือขวาขึ้นอยู่กับว่าเป็นตำแหน่งที่สั้น หรือยาวกว่าระยะโฟกัส รูปร่างของลำไอออนที่ตำแหน่งก่อนระยะโฟกัส ที่จุดโฟกัส และหลังจุดโฟกัสดังแสดงในรูปที่ 5.35 และรูปที่ 5.36

จากผลการวัดรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดครุเข็ม นั้นไม่สามารถบ่งบอกขนาดของลำไอออนได้ เนื่องจากความละเอียด(resolution) ของเครื่องมือวัด จึงได้ทำการวัดด้วยวิธีขอบมิตอีกครั้งหนึ่ง แต่จากรูปที่ 5.35 จะเห็นได้ว่าในบางตำแหน่งรูปร่างของลำไอออนยังไม่กลมเสียทีเดียว แสดงว่าที่ตำแหน่งดังกล่าวยังไม่ใช่จุดโฟกัสของลำไอออน ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากช่วงห่างของการเคลื่อนที่ด้วยฟาราเดย์ในแนว optical axis นั้น แต่ละชั้นห่างกันถึง 5 มิลลิเมตร ดังนั้นเพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะโฟกัสกับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบโฟกัสถูกต้องมากยิ่งขึ้น ในการวัดขนาดของลำไอออนด้วยวิธีขอบมิต จึงได้ทำการเคลื่อนตำแหน่งแต่ละครั้งเพียง 3 มิลลิเมตร โดยการปรับเลื่อนตำแหน่งของขอบมิต ทำครั้งละ 20 ไมโครเมตร ดังนั้น ขนาดของลำไอออนที่วัดออกมาได้ในแต่ละตำแหน่งจะมีความผิดพลาด ± 20 ไมโครเมตร และเพื่อให้พิจารณาผลการวัดด้วยวิธีขอบมิตมีความถูกต้องในระดับหนึ่ง จึงต้องทำการวัดขนาดของลำไอออน สองแนวแกน คือ แกน x และแกน y ตามทิศทางการติดตั้งไบมิต ซึ่งได้ผลการวัดแสดงได้ดังตารางที่ 5.2

จากผลการวัดขนาดของลำไอออนด้วยวิธีขอบมิต จะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งการวัดที่อยู่ห่างจากเลนส์ 11 มิลลิเมตร จะเกิดลำไอออนที่มีขนาดเล็กที่สุด และขนาดของลำไอออนที่วัดได้ในทั้งสองแนวแกนจะมีค่าเท่ากันเมื่อศักย์ไฟฟ้า V_{L2} มีค่าเท่ากับ 1.75 กิโลโวลต์ โดยถ้ามีการเพิ่มหรือลดค่าของ V_{L2} จะส่งผลให้ขนาดของลำไอออนที่วัดได้ในทั้งสองแนวแกนมีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งแสดงว่าลักษณะรูปร่างของลำไอออนไม่กลมอย่างแน่นอน นอกจากนี้ จากตารางที่ 2 ยังพบว่า เมื่อตำแหน่งของการวัดอยู่ห่างจากจุดเลนส์มากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้ได้ลำไอออนที่มีลักษณะกลม นั้นจะมีค่าลดลง เช่น ในกรณีเมื่อตำแหน่งของการวัดอยู่ห่างจากจุดเลนส์เป็นระยะ 14 มิลลิเมตร ศักย์ไฟฟ้า V_{L2} ต้องมีค่าเป็น 1.70 กิโลโวลต์ เพื่อที่จะทำให้ได้ลำไอออนที่วัดได้จากทั้งสอง

ตารางที่ 5.2 ผลการวัดขนาดของลำไอออนที่ผ่านระบบโฟกัสด้วยวิธีขอบมืด ในแนวแกน x และแนวแกน y เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และศักย์ไฟฟ้า V_{L1} มีค่าเท่ากับ 1.30 กิโลโวลต์

Lens to detector (mm)	V_{L2} (V)	Beam Width	
		x-scan(μm)	y-scan(μm)
11	1700	455	548
	1750*	296	306
14	1800	300	217
	1650	417	488
	1700*	308	289
	1750	344	215
17	1700	406	227
	1675	321	260
	1650*	321	306
	1625	377	407
	1600	447	541
20	1650	368	249
	1625	343	265
	1600*	354	346
	1575	411	453
	1550	511	593
23	1600	375	290
	1575	365	331
	1550*	391	401
	1525	473	550
26	1550	394	293
	1525	410	381
	1500*	456	468
	1475	530	717
	1450	618	938

* ค่าของ V_{L2} ที่ทำให้เกิดจุดโฟกัสของลำไอออนที่ระยะต่างๆ

แนวแกนมีค่าเท่ากัน แต่ถ้าเลื่อนตำแหน่งการวัด โดยเพิ่มระยะห่างให้มากขึ้นเป็น 17 มิลลิเมตร ศักย์ไฟฟ้า V_{L2} มีค่าลดลงมาเป็น 1.65 กิโลโวลต์ จึงจะทำให้ได้ลำไอออนที่วัดได้ในทั้งสองแนวแกนมีขนาดเท่ากันเหมือนเดิม

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งของลำไอออนที่เป็นจุดโฟกัสสามารถกำหนดได้จากศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง (V_{L2}) โดยเมื่อศักย์ไฟฟ้า V_{L2} มีค่าลดลงระยะ โฟกัสจะยิ่งยาวมากขึ้น แต่ลำไอออนที่ได้ก็จะมีขนาดใหญ่ตามขึ้นด้วย ซึ่ง ณ ตำแหน่งที่ไม่ใช่จุดโฟกัส ลักษณะของลำไอออนจะไม่กลม เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการกวาดรูเข็ม

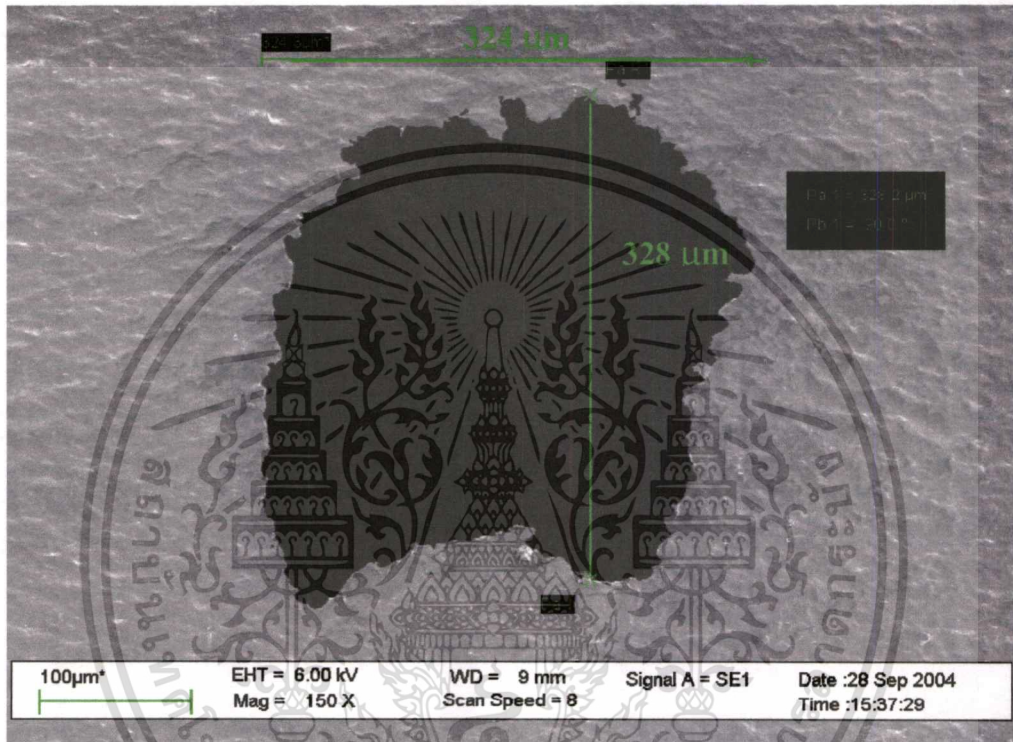
5.3.3 การใช้ลำไอออนเจาะแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์

เนื่องจากข้อจำกัดของการวัดลำไอออนด้วยวิธีขอบมืดที่ไม่สามารถ แสดงถึงลักษณะรูปร่างของลำไอออนเหมือนกับการวัดลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็ม อีกทั้งในการวัดขนาดของลำไอออนจะต้องทำการวัดในสองแนวแกน คือ แกน x และ แกน y แทนที่จะวัดเพียงแกนเดียว ซึ่งรูปร่างของลำไอออนจะได้จากคาคเคา โดยพิจารณาว่าถ้าลำไอออนมีลักษณะกลม ขนาดของลำไอออนที่วัดได้ในทั้งสองแนวแกนจะมีค่าเท่ากัน แต่ถ้าขนาดของลำไอออนที่วัดได้ในทั้งสองแนวแกนนั้น ไม่เท่ากัน ก็จะสรุปว่าลำไอออนนั้นมีลักษณะไม่กลม ในบางกรณีที่ลำไอออนมีลักษณะไม่กลม และมีลักษณะเป็นวงรี ถ้ามีการวางตัวในแนวแกนทั้งสองในลักษณะที่ทำให้ขนาดที่วัดได้ในแนวแกนทั้งสองมีขนาดเท่ากัน ซึ่งอาจจะสรุปได้ว่าลำไอออนนั้นมีลักษณะกลมได้เช่นกัน แต่ในความจริงแล้วเป็นวงรี ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันว่าลำไอออนมีลักษณะและขนาดตามที่วัดได้จากการวัดด้วยวิธีขอบมืดหรือไม่ จึงนำลำไอออน ดังกล่าวไปทำการเจาะแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นนำไปวัดขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งสาเหตุที่ไม่ทำการวัดขนาดของลำไอออนด้วยการนำไปเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมโดยตลอดนั้น ก็เพราะว่าวิธีการวัดดังกล่าวต้องใช้เวลาในการทดลองที่ค่อนข้างมาก

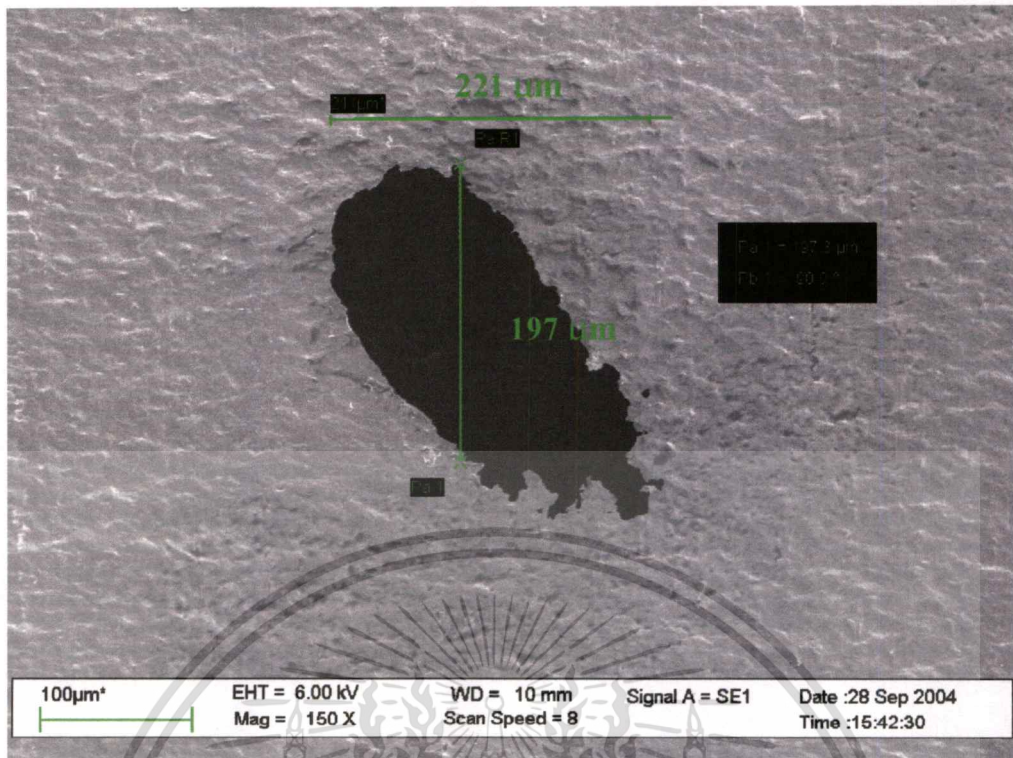
จากการทดลองใช้ลำไอออนเจาะแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (โดยใช้วิธีเดียวกันกับหัวข้อ 5.2.4) เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ผ่านระบบ โฟกัสแบบเลนส์สองชุดที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับเลนส์ชุดแรกเท่ากับ 1.30 กิโลโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองที่แตกต่างกันสองค่าคือ 1.70 และ 1.75 กิโลโวลต์ โดยที่ตำแหน่งของแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์อยู่ห่างจากชุดเลนส์เป็นระยะ 14 มิลลิเมตร จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.38 และรูปที่ 5.39 ซึ่งในรูปที่ 5.38 จะแสดงผลการเจาะรูด้วยลำไอออนเมื่อมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองเท่ากับ 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งพบว่าแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เริ่มทะลุหลังจากที่เจาะไปแล้วเป็นเวลา 130 นาที และใช้เวลาเจาะทั้งหมด 240 นาที และรูปร่างของรูที่เจาะได้จะมีลักษณะค่อนข้างกลม รวมทั้ง

ขนาดใกล้เคียงกับผลการวัดที่ได้จากการวัดด้วยวิธีขอบมืด ดังแสดงในตารางที่ 5.2 คือประมาณ 300 ไมโครเมตร

ส่วนรูปที่ 5.39 จะแสดงผลการเจาะรูด้วยลำไอออนเมื่อมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองเท่ากับ 1.75 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งพบว่าแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เริ่มทะลุหลังจากที่เจาะไปแล้วเป็นเวลา 50 นาที และใช้เวลาเจาะทั้งหมด 130 นาที จะได้รูปร่างของรูที่เจาะมีลักษณะเปลี่ยนเป็นวงรี



รูปที่ 5.38 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เมื่อใช้ลำไอออนพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรกและชุดที่ 2 เท่ากับ 1.30 และ 1.70 กิโลโวลต์ตามลำดับ ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 14 มิลลิเมตร

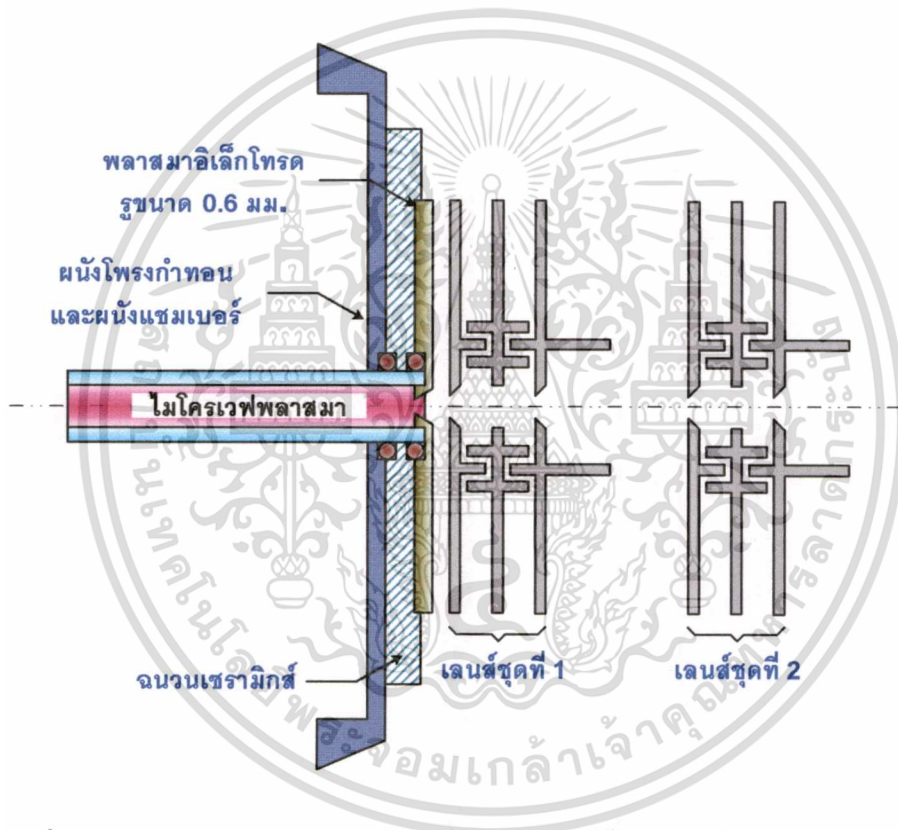


รูปที่ 5.39 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์เมื่อใช้ลำไอออนพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรกและชุดที่ 2 เท่ากับ 1.30 และ 1.75 กิโลโวลต์ตามลำดับ ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 14 มิลลิเมตร

จากผลการเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ด้วยลำไอออน พบว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.70 กิโลโวลต์ เป็น 1.75 กิโลโวลต์ จะเห็นได้ว่าลักษณะรูปร่างของลำไอออนมีการเปลี่ยนแปลงจากกลมเป็นวงรี ซึ่งจากวัฏรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีกวาดรูเข็ม และขนาดลำไอออนด้วยวิธีขอบมิด ก็จะมีผลการวัดในลักษณะเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาที่เริ่มทะลุก็แตกต่างกันออกไปด้วย โดยเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองขึ้น เวลาที่เริ่มทะลุจะลดลงจาก 130 นาที่ เป็น 50 นาที่ ซึ่งจากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ลำไอออนที่กลมมากที่สุด ไม่ใช่ตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของกระแสไอออนต่อหน่วยพื้นที่สูงสุด และไม่ใช่ตำแหน่งของจุดโฟกัสของระบบโฟกัสอย่างแท้จริง

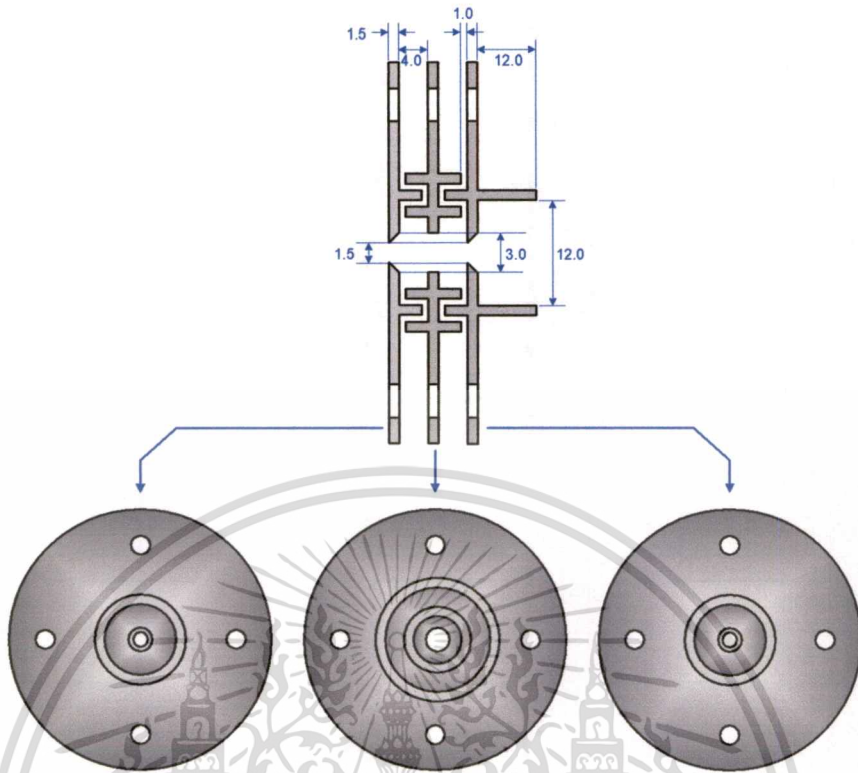
5.3.4 การปรับปรุงระบบโฟกัสลำไอออน

จากปัญหาการเกิดการบิดเบี้ยวของลำไอออนเนื่องจากการติดตั้งชุดเลนส์ และปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบโฟกัส รวมทั้งแหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้ยังมีขนาดใหญ่ และมุมบานของลำไอออนยังมากอยู่ ส่งผลให้การโฟกัสลำไอออนที่ผ่านมานั้น จะได้ลำไอออนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงระบบขึ้นมาใหม่โดยใช้แหล่งกำเนิดไอออนที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อลดขนาดมุมบานของลำไอออนมาแล้ว และทำการออกแบบระบบโฟกัสขึ้นมาใหม่ให้เหมาะสมสำหรับการโฟกัสลำไอออนโดยออกแบบให้มีโครงสร้างที่สามารถสร้างและติดตั้งให้สมมาตรได้ง่าย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.40



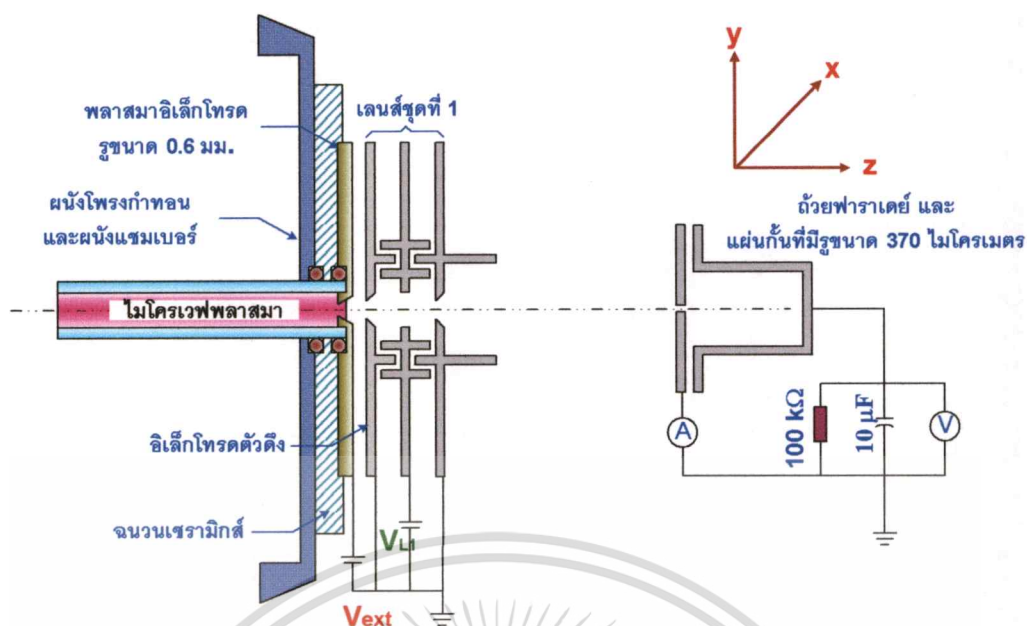
รูปที่ 5.40 โครงสร้างของระบบโฟกัสที่ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่เมื่อใช้แหล่งกำเนิดไอออนที่มีมุมบานของลำไอออนต่ำ และชุดเลนส์แบบใหม่

สำหรับระบบโฟกัสที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่นี้ จะประกอบด้วยชุดเลนส์สองชุดเหมือนเดิม แต่ว่า เลนส์ที่ใช้ในแต่ละชุดจะลักษณะรูปร่างที่แตกต่างจากเดิม โดยในแต่ละชุดเลนส์จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ที่แต่ละขั้วทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม หนา 1.5 มิลลิเมตร มีลักษณะรูปร่างดังในรูปที่ 5.41



รูปที่ 5.41 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ประกอบเป็นระบบเลนส์ชุดใหม่

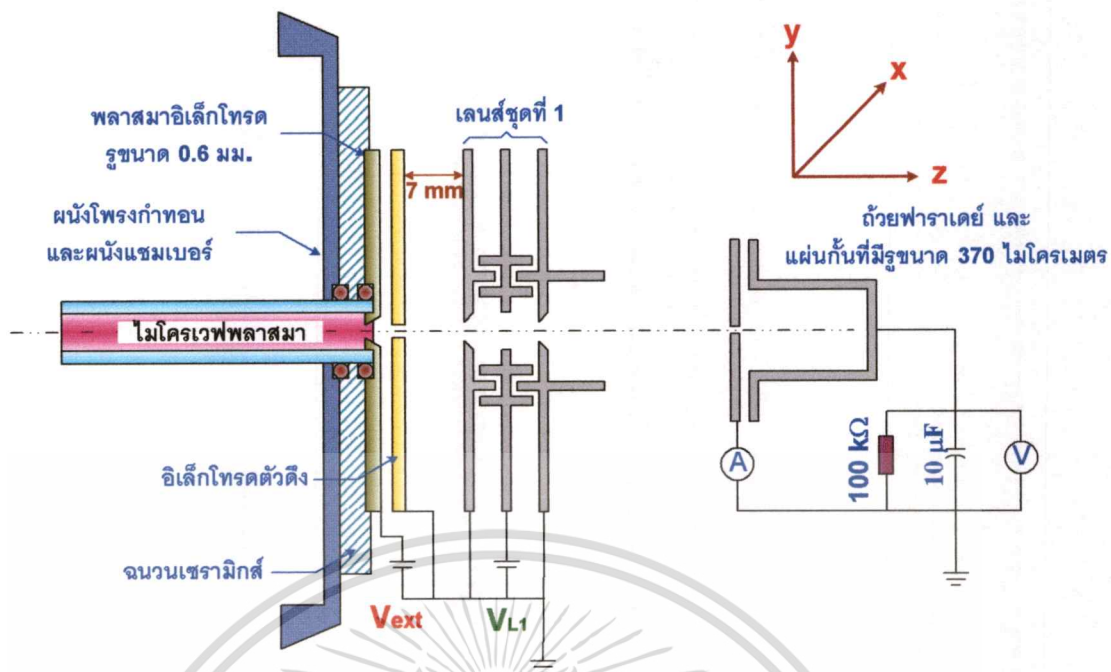
ในขั้นต้น ได้ทำการทดสอบระบบโฟกัสซึ่งใช้เลนส์เพียงชุดเดียว สำหรับโครงสร้างของระบบ เมื่อนำชุดเลนส์ประกอบเข้ากับแหล่งกำเนิดไอออนแล้ว แสดงได้ดังรูปที่ 5.42 เห็นได้ว่า ขั้วไฟฟ้าชิ้นแรกของชุดเลนส์จะทำหน้าที่เป็น ขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้งด้วย ซึ่งจุดประสงค์ดังกล่าวก็เพื่อให้ไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดเลนส์ได้ทั้งหมด โดยคาดว่าถ้าระบบโฟกัสไอออน สามารถที่จะทำการโฟกัสไอออนทั้งหมดที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด ความหนาแน่นของไอออน ณ จุดโฟกัสก็จะมีค่าสูงมากขึ้น



รูปที่ 5.42 ระบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดียว และการต่อวงจร ไฟฟ้าสำหรับการทดลอง เมื่อแผ่นอิเล็กโทรดตัวตั้งกับขั้วไฟฟ้าของเลนส์ชิ้นแรก เป็นชิ้นเดียวกัน

โดยทำการทดลองที่ความดันในแชมเบอร์หลักเท่ากับ 8.0×10^{-6} มิลลิบาร์ เมื่อกำลังของแมกนีตรอน 25 วัตต์ ศึกษัไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการดึงไอออน 2.40 กิโลโวลต์ และวัดด้วยวิธีการกวาดรูเข็มขนาด 370 ไมโครเมตร พบว่าถ้าไอออนที่เคลื่อนผ่านออกมาจากชุดเลนส์ มีขนาดใหญ่มาก และมีรูปร่างบิดเบี้ยว จากการสังเกตผลของศึกษัไฟฟ้าที่มีต่อลำไอออน คาดว่า ลำไอออนมีจุดโฟกัสอยู่ภายในชุดเลนส์ ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากว่ามุมบานของลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจากพลาสติกอิเล็กโทรดมีค่ามาก และชุดเลนส์มีระยะห่างจากพลาสติกอิเล็กโทรดเพียง 2 มิลลิเมตร เท่านั้น จึงทำให้ เมื่อลำไอออนเริ่มเคลื่อนที่เข้าไปยังภายในชุดเลนส์ จะพบกับเส้นสมคักซ์ที่มีความโค้งมาก ส่งผลให้ลำไอออนถูกหักเหอย่างรวดเร็ว จึงเกิดจุดโฟกัสอยู่ภายในชุดเลนส์

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการใส่ขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้งไว้เช่นเดิม และเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดตัวตั้งกับชุดเลนส์เป็น 7 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.43 ซึ่งผลการทดลองเมื่อวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออนด้วยวิธีการกวาดรูเข็มขนาด 370 ไมโครเมตร จะพบว่าลำไอออนมีลักษณะค่อนข้างกลม และสามารถบังคับให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกจากชุดเลนส์เป็นลำขนานได้

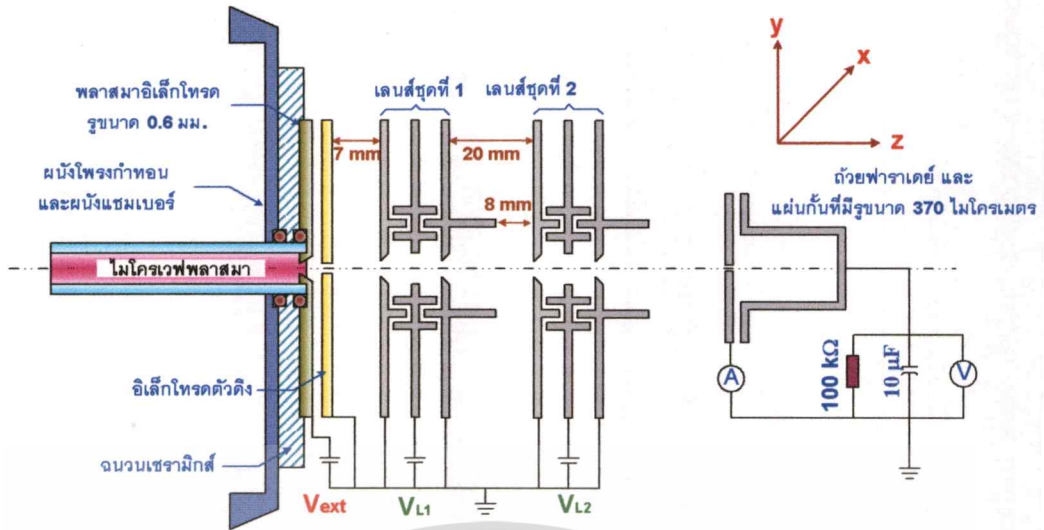


รูปที่ 5.43 ระบบโฟกัสแบบเลนส์ชุดเดียว และแผนผังการต่อวงจร ไฟฟ้าสำหรับการทดลอง เมื่อใช้ แผ่นอิเล็กโทรดตัวดึงกับขั้วไฟฟ้าของเลนส์ชิ้นแรกต่างชิ้นกัน

เมื่อได้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกจากระบบเลนส์ชุดแรกมีลักษณะเป็นลำไอออนที่ขนาน แล้ว จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบระบบ โฟกัสแบบเลนส์สองชุด ซึ่งมีโครงสร้างการติดตั้งชุดเลนส์ แสดงได้ในรูปที่ 5.44 และทำการทดลอง ภายได้เงื่อนไข ดังต่อไปนี้

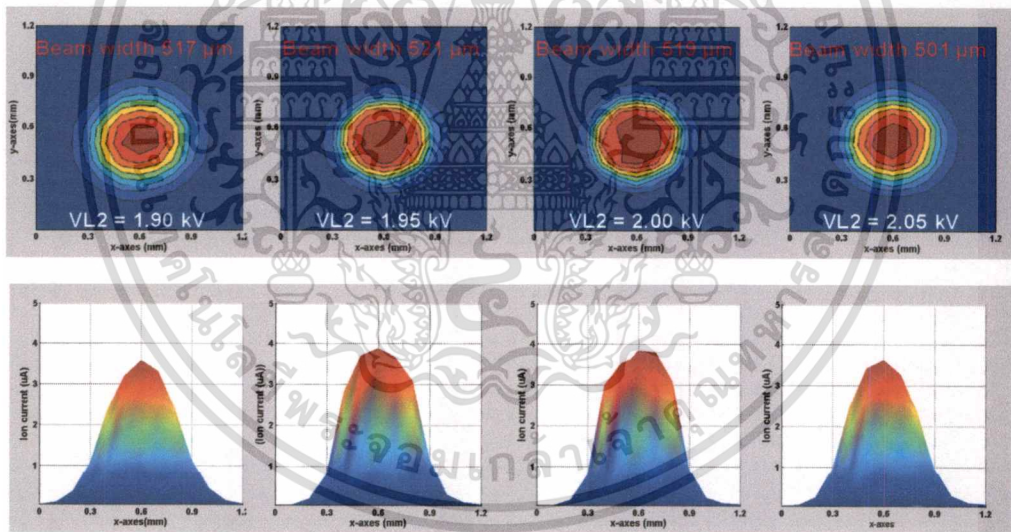
- P _{main chamber}	7.5×10^{-6}	mbar
- Magnetron power	25	W
- Extraction voltage	2.40	kV
- Extractor to Lens distance	7.0	mm
- Lens to Detector distance	10.0	mm
- scan step	100	μm
- Pin hole on mask	370	μm
- First Lens potential: V_{L1}	1.90	kV
- Second Lens potential: V_{L2}	1.90-2.05	kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.44 ระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุดและแผนผังวงจรไฟฟ้าสำหรับการทดลอง

จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.45



รูปที่ 5.45 ลักษณะรูปร่างของลำไอออนที่จากระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุดที่ปรับปรุ้งแล้ว ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 10 มิลลิเมตร เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 2.40 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรกเท่ากับ 1.90 กิโลโวลต์ และศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองมีค่าเป็น 1.90, 1.95, 2.00 และ 2.05 กิโลโวลต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง เมื่อทำการเปลี่ยนค่า ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองเป็น 1.90, 1.95, 2.00 และ 2.05 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดของลำไอออนที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก คือประมาณ 500 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของรูบนแผ่นกั้นของถ้วยฟาราเดย์ และระบบโพกัสไม่สามารถบีบลำไอออนลงให้มีขนาดของลำไอออนเล็กลงกว่านี้ได้ ซึ่งขนาดของลำไอออนที่วัดได้อาจเป็นผลมาจากระบบวัดที่สามารถวัดค่าได้เล็กที่สุดประมาณ 500 ไมโครเมตร เนื่องจากทำการวัดขนาดของลำไอออนที่ใหญ่ขึ้นจะให้ค่าที่แตกต่างกัน แต่เมื่อลำไอออนมีขนาดเล็กกว่า 500 ไมโครเมตร ขนาดของลำไอออนที่วัดได้ จะมีค่าไม่มากกว่านี้ นอกจากนี้การออกแบบระบบโพกัสได้คาดไว้ว่า ลำไอออนควรจะมีขนาดเล็กกว่า 300 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงคาดเดาไว้ว่า ขนาดของรูบนแผ่นกั้นถ้วยฟาราเดย์ที่ใช้ในระบบวัดอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงได้ทำการทดสอบโดยการ นำแผ่นกั้นดังกล่าวไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ได้ภาพดังรูปที่ 5.46(ข) พบว่าขนาดของรูบนแผ่นกั้นมีค่าเปลี่ยนไปจริง โดยมีค่าประมาณ 500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับขนาดของลำไอออนที่สามารถวัดได้



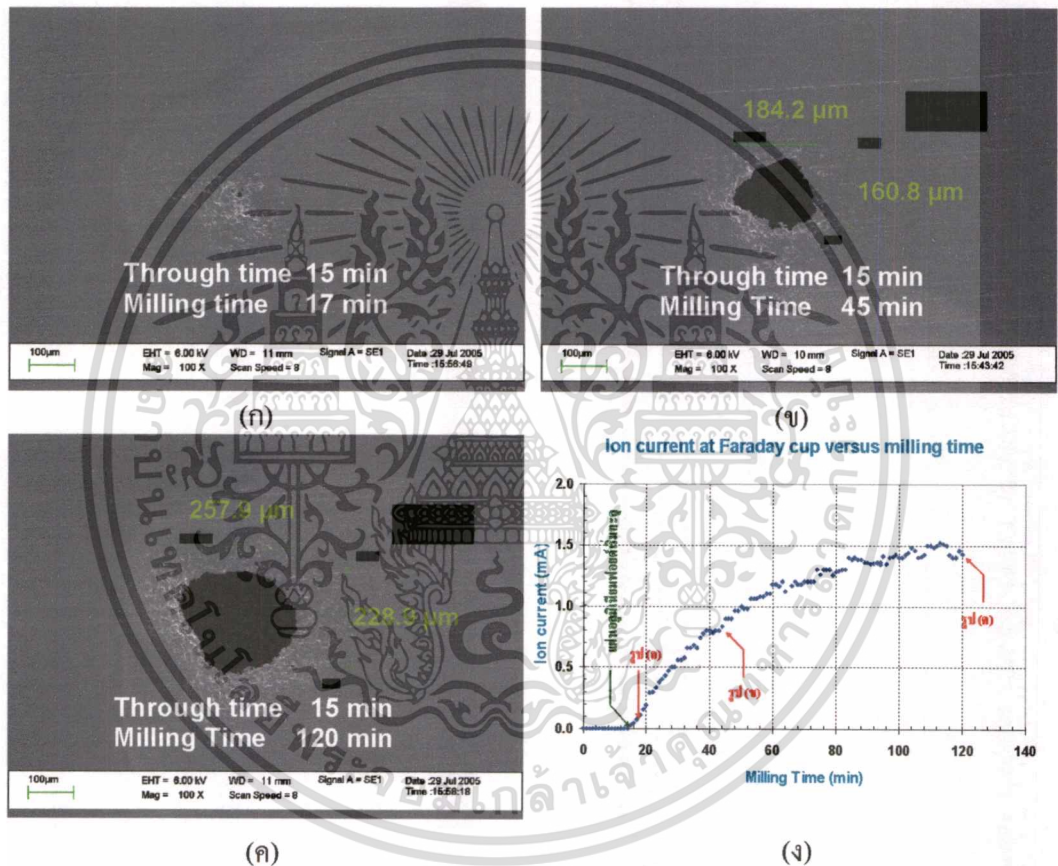
รูปที่ 5.46 เปรียบเทียบลักษณะของและรูแผ่นกั้นถ้วยฟาราเดย์ ก่อนและหลังการนำไปใช้วัดขนาดและรูปร่างของลำไอออน

(ก) ก่อนนำไปใช้งาน มีขนาด 372 ไมโครเมตร

(ข) หลังนำไปใช้งาน มีขนาด 516 ไมโครเมตร

หลังจากนั้นทำการวัดลำไอออนที่เงื่อนไขเดียวกันกับผลที่ได้ในรูปที่ 5.45 ด้วยวิธีขอบมืด เพื่อตรวจสอบขนาดของลำไอออนอีกครั้ง ซึ่งพบว่า ลำไอออนมีขนาดใกล้เคียงกัน ทั้งสองแนวแกน เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรกมีค่า 1.90 กิโลโวลต์ และ ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองมีค่าเท่ากับ 2.00 กิโลโวลต์ โดยจะมีขนาดของลำไอออนอยู่ใน ช่วง 110 -120 ไมโครเมตร

จากนั้นทำการเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ โดยในการเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ด้วยลำไอออนที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้(รูปที่ 5.44) แผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ที่ใช้จะมีขนาดเท่าเดิมคือ 20 ไมโครเมตร และมีลักษณะการติดตั้ง การต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการทดลอง เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 5.2.4 โดยใช้ลำไอออนที่มีระดับพลังงาน 2.40 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ตำแหน่งการเจาะห่างจากชุดเลนส์ 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเมื่อวัดด้วยวิธีขอบมืดเท่ากับ 120 ไมโครเมตร ทำการยิงลำไอออนด้วยเวลาที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 17, 45 และ 120 นาที จะได้ลักษณะของรูที่เกิดขึ้นบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.47(ก)-(ค)



รูปที่ 5.47 ลักษณะของรูที่เกิดขึ้นบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์ เมื่อยิงด้วยลำไอออนระดับพลังงาน 2.40 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน

(ก) เวลาที่ใช้ในการยิง เท่ากับ 17 นาที

(ข) เวลาที่ใช้ในการยิง เท่ากับ 45 นาที

(ค) เวลาที่ใช้ในการยิง เท่ากับ 120 นาที

(ง) ความสัมพันธ์ของค่ากระแสที่ด้วยฟาราเดย์กับระยะเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เริ่มทะลุ เมื่อทำการยิงลำไอออนเป็นระยะเวลา 15 นาที ซึ่งสังเกตได้จากค่ากระแสของถ้วยฟาราเดย์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อยิงลำไอออนต่อไปอีก 2 นาที พบว่าค่ากระแสที่ถ้วยฟาราเดย์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยรูที่ได้จากการเจาะมีขนาด 10 ไมโครเมตร แต่มีลักษณะไม่กลมคีนึก ดังแสดงในรูปที่ 5.47(ก)

เมื่อทำการยิงลำไอออนลงบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์อีกครั้ง โดยใช้เวลาในการยิงมากขึ้นเป็น 45 นาที พบว่าค่ากระแสที่ถ้วยฟาราเดย์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังในรูปที่ 5.47(ง) ซึ่งแสดงว่า ลำไอออนเริ่มทะลุแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์มากขึ้น โดยรูที่ได้จากการเจาะมีขนาด 180 ไมโครเมตร มีลักษณะดังในรูปที่ 5.47(ข)

เมื่อใช้เวลาในการเจาะ 120 นาที พบว่าอัตราการเพิ่มของกระแสที่ถ้วยฟาราเดย์เริ่มมีค่าคงที่ ส่วนลักษณะของรูบนแผ่นอลูมิเนียม แสดงได้ดังรูปที่ 5.47(ค) จะเห็นว่าลักษณะของรูที่ได้ค่อนข้างกลม มีขนาด 250 ไมโครเมตร ซึ่งใหญ่กว่าขนาดของลำไอออนที่วัดด้วยวิธีขอบมิดถึง 2 เท่า



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟและระบบโพกัสลำไอออน ซึ่งจะมีการศึกษาสองส่วนหลักคือแหล่งกำเนิดไอออน และระบบโพกัสลำไอออน ซึ่งจะมีการศึกษาในสองระบบคือระบบโพกัสแบบเลนส์ซุกเคียว และระบบโพกัสแบบเลนส์สองซุก โดยจะกล่าวถึงลักษณะและรูปร่างของลำไอออนที่ได้จากแหล่งกำเนิดไอออน และระบบโพกัสทั้งสองแบบ รวมถึงปัญหาที่พบในการทดลองศึกษาและข้อเสนอแนะต่อไป

6.1 สรุปผลการศึกษแหล่งกำเนิดไอออน

1. แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะอาศัยหลักการกระตุ้นให้เกิดอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาในบริเวณหลอดแก้วควอร์ตซึ่งติดตั้งผ่านโพรงกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ณ ตำแหน่งที่มีแอมพลิจูดของคลื่นกำลังมากที่สุด โดยที่ไอออนของอาร์กอนจะถูกดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาผ่านขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้ง
2. ระบบดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมา ขั้วพลาสมาอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นรูปกรวยซึ่งด้านติดแหล่งกำเนิดพลาสมามีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร และอีกด้านมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าค่าสูง โดยที่แผ่นอิเล็กโทรดตัวตั้งจะมีลักษณะเป็นรูปกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร ต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าที่เป็นกราวด์
3. กระแสของลำไอออนที่ได้จากแหล่งกำเนิดไอออนจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากเปิดเครื่องแล้วเป็นเวลาประมาณ 10 ถึง 15 นาที
4. ลักษณะรูปร่างของลำไอออนที่มีระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อวัดด้วยวิธีการกวาดรูเข็มขนาด 1 มิลลิเมตร ที่ระยะห่างจากแผ่นอิเล็กโทรดตัวตั้ง 9 มิลลิเมตร จะมีลักษณะค่อนข้างกลม และมีขนาดของลำไอออนเมื่อวัดจากค่า FWHM (Full width at Half Maximum) เท่ากับ 1.35 มิลลิเมตร มีค่ากระแสสูงสุด 2.45 ไมโครแอมป์ ซึ่งนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของลำไอออนได้เท่ากับ 0.17 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมีมุมบานประมาณ 2 องศา

5. การกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดที่มีระดับพลังงาน 1200 -1700 อิเล็กตรอนโวลต์ การกระจายพลังงานของลำไอออนมีค่าอยู่ใน ช่วง 45-65 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เทียบกับค่าพลังงานของลำไอออน มีค่ามากที่สุด 5.4 เปอร์เซ็นต์ นั้น โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ลำ ไอออนที่มีค่าพลังงาน 1700 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าการกระจายพลังงาน 50 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่ง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าพลังงานของลำไอออน ได้เท่ากับ 2.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าน้อย จึง กล่าวได้ว่า ลำไอออน นั้นมีคุณภาพที่ดี และเหมาะสมสำหรับการศึกษาระบบฟลักซ์ลำไอออน

6. หลังจากทำการ ปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออนใหม่แล้ว พบว่า ลำไอออนที่ได้จาก แหล่งกำเนิดมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม และมีขนาดเล็กลงกว่าเดิมคือ ขนาดของเส้นผ่าน ศูนย์กลาง มีค่าเท่ากับ 738 ไมโครเมตร มีค่ากระแสไอออนสูงสุด 9.6 ไมโครแอมป์ ซึ่งจะได้ความหนาแน่นของกระแสเท่ากับ 5.61 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยลำไอออนมีมุมบานของลำ ไอออนที่น้อยลงและมีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.38 องศาที่ความดันแอมเบอร์หลักเท่ากับ 5×10^{-6} มิลลิบาร์ นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดและมุมบานของลำไอออนจะขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการดึงไอออน และ ความดันของแอมเบอร์หลัก ซึ่งถ้าความดัน ในแอมเบอร์หลักมีค่าเพิ่มขึ้นลำไอออนมีมุมบานที่ มากขึ้นและ ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการดึงเพิ่มขึ้น มุมบานของลำไอออนจะมีค่าลดลง

6.2 สรุปผลการศึกษาระบบฟลักซ์แบบเลนส์ขูดเดียว

1. ระบบฟลักซ์แบบเลนส์ขูดเดียว ประกอบด้วยเลนส์ไฟฟ้า ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลมเจาะรูกลมทะลุตรงกลาง ทั้งหมด 4 ชิ้น ซึ่งต่อขั้วไฟฟ้าของแผ่นที่ 1 และ 4 เข้ากับกราวด์ของระบบ และขั้วไฟฟ้าของแผ่นที่ 2 และ 3 ต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวก ซึ่ง สามารถปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าได้ เพื่อบังคับควบคุมแนววิถีของไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านระบบ โดย จะมีการวัดขนาดของลำไอออนที่ผ่านระบบฟลักซ์ด้วยวิธีขอบมืด ในสองแนวแกนคือ แกน x และ แกน y

2. ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขูดเลนส์ ส่งผลให้ไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านระบบฟลักซ์เกิดการเบี่ยงเบนวิถีการเคลื่อนที่ให้เข้าสู่แกนทางแสงของเลนส์ ทำให้ได้ลำไอออนที่มีขนาดเล็กที่สุด ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนแกนทางแสงในแนวแกน z เกิดเป็นจุดโฟกัสของลำไอออน โดยที่ ตำแหน่งของจุด โฟกัส หรือที่เรียกว่าระยะ โฟกัสนี้ ขึ้นอยู่กับความแรงของสนามไฟฟ้าของขูดเลนส์ ซึ่งถ้าสนามไฟฟ้ามีค่ามาก คือเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับขูดเลนส์ด้วยค่าสูงๆจะทำให้ได้ระยะโฟกัส สั้นลง แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยลง คือเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับขูดเลนส์ด้วยค่าต่ำลงจะทำให้ได้ ระยะโฟกัสยาวขึ้น นั่นคือศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขูดเลนส์ สามารถปรับความยาวโฟกัสของขูด เลนส์ได้

3. หลักการของระบบเลนส์ไฟฟ้ากับเลนส์ทางแสงจะมีความคล้ายคลึงกัน คือสามารถที่จะโฟกัสหรือขยายได้เพียงแต่ใช้ในคนละกรณี โดยที่เลนส์ทางแสงจะใช้สำหรับรังสีแสง แต่ว่าเลนส์ไฟฟ้าจะใช้ในกรณีของอนุภาคที่มีประจุ แต่เลนส์ไฟฟ้าจะมีข้อแตกต่างจากเลนส์ทางแสงก็คือสามารถปรับความยาวของระยะโฟกัสของเลนส์ได้โดยการปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ แต่เลนส์ทางแสงซึ่งเป็นแก้วนั้นไม่สามารถทำได้

4. ระบบโฟกัสสามารถทำให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านมีลักษณะรูปร่างเป็นลำขนานได้ โดยการปรับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ด้วยค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ที่ทำให้ความยาวโฟกัสของชุดเลนส์มีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดตัวตั้งกับชุดเลนส์ ซึ่งในการทดลองมีค่าเท่ากับ 1.40 กิโลโวลต์ เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1.50 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์

5. ผลของการเพิ่มพลังงานของลำไอออนจะส่งผลให้ต้องเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ด้วย เพื่อที่จะทำให้ลำไอออนเกิดการโฟกัสที่ตำแหน่งเดิม เนื่องจากว่าต้องใช้สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการเบี่ยงเบนลำไอออนที่มีระดับพลังงานสูง

6. การปรับเปลี่ยนระยะห่างของชุดเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้งเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ได้ลำไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยถ้าระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้งเท่ากับ 31.2 มิลลิเมตร ขนาดของลำไอออนที่เล็กที่สุดเมื่อวัดที่ระยะของถ้วยฟาราเดย์ 10 มิลลิเมตร มีขนาดประมาณ 600 ไมโครเมตร ในขณะที่ระยะห่างของเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวตั้งเท่ากับ 50.0 มิลลิเมตร จะมีขนาดลดลงเหลือเพียง 180 ไมโครเมตร นอกจากนี้การที่ลำไอออนลำไอออนมีขนาดเล็กส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 2.8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เป็น 26.2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

7. สามารถใช้ลำไอออนระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ขนาด 180 ไมโครเมตร ที่มีระยะโฟกัสที่ 10 มิลลิเมตร เจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์หนา 20 ไมโครเมตร ในเวลาประมาณ 30 นาที และเมื่อทำการเจาะด้วยเวลาที่มากพอ ขนาดของรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์จะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของลำไอออนที่วัดได้ด้วยวิธีของมิด นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถที่กำหนดขนาดของรูที่เจาะ ได้ด้วยการควบคุมเวลาที่ใช้ในการยิงลำไอออน

8. การเปลี่ยนแปลงวิธีการผลิตขั้วไฟฟ้าเป็นการใช้โลหะที่มีความหนาเพียง 0.3 มิลลิเมตร และเพิ่มความแม่นยำในการเจาะรูแผ่นโลหะที่นำมาผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าของระบบโฟกัส จะส่งผลให้ลำไอออนที่ได้มีลักษณะรูปร่างกลมมากขึ้นกว่าเดิม นอกจากนี้ยังทำให้ค่ากระแสสูงสุดของลำไอออนที่วัด ได้มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เท่า

6.3 สรุปผลการศึกษาระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุด

1. ระบบเลนส์โฟกัสแบบเลนส์สองชุด จะช่วยลดข้อจำกัดในการเพิ่มระยะห่างของชุดเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวคิง เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มค่าดังกล่าวจนถึงระดับหนึ่งแล้ว จำนวนไอออนที่จะเข้าสู่ชุดเลนส์จะมีค่าน้อยลง เนื่องจากมุมบานของลำไอออน และวิถีอิสระเฉลี่ยของลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด ดังนั้นจึงมีการเพิ่มชุดเลนส์เพื่อทำหน้าที่ทำให้ลำไอออนเคลื่อนที่เป็นลำขนาน ก่อนที่จะเข้าสู่ชุดเลนส์อีกชุดที่ทำหน้าที่ในการโฟกัสโดยเฉพาะ โดยไม่ต้องเพิ่มระยะห่างของชุดเลนส์กับขั้วอิเล็กโทรดตัวคิง ทำให้ได้ลำไอออนที่มีขนาดเล็กกลง นอกจากนี้ยังได้ลำไอออนที่มีความหนาแน่นของกระแสไอออนสูงขึ้นอีกด้วย

2. เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สอง (V_{L2}) มีค่าคงที่ ขนาดและรูปร่างของลำไอออนที่ได้จากระบบโฟกัสขึ้นอยู่กับ การปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลนส์ชุดแรก (V_{L1}) โดยในกรณีที่มี V_{L1} มีค่าไม่มากพอ อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากชุดเลนส์ที่ออกแรงกระทำต่อลำไอออนจะมีค่าน้อย ลำไอออนที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชุดเลนส์ชุดที่สอง จึงเป็นลำไอออนที่ยังคงรู้ออกซึ่งอาจมีมุมบานของลำไอออนเท่ากับหรือน้อยกว่าลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดก็ได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวลำไอออนที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบเลนส์ชุดที่สอง จึงเป็นลำไอออนที่มีลักษณะของลำไอออนที่ยังคงรู้ออกอยู่ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบีบลำไอออนของระบบโฟกัสมีค่าลดลง ลำไอออนที่ได้จากระบบจึงมีขนาดเล็กกลงไม่มากนัก ส่วนกรณีที่มี V_{L1} มีค่าที่เหมาะสม จนทำให้เกิดเป็นลำไอออนที่ขนานเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดเลนส์ชุดที่สองได้ ขนาดและรูปร่างของลำไอออนที่ได้จากระบบโฟกัสจะมีลักษณะค่อนข้างกลม และมีขนาดเล็กกว่าในกรณีแรก และในกรณีสุดท้ายที่ V_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นมากเกินไป จนส่งผลทำให้อิทธิพลจากสนามไฟฟ้าของเลนส์ชุดแรก ออกแรงกระทำทางไฟฟ้าต่อลำไอออนมากจนกระทั่งทำให้ลำไอออนเกิดการโฟกัสหน้า หรืออยู่ภายในเลนส์ชุดที่สอง จะทำให้ขนาดของลำไอออนที่ออกมาจากระบบโฟกัสในกรณีนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่และเสียรูปร่างไป

3. เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับเลนส์ชุดแรก (V_{L1}) มีค่าคงที่ และพิจารณาว่าตำแหน่งที่ลำไอออนมีลักษณะที่กลมมากที่สุดเป็นตำแหน่งของจุดโฟกัสแล้ว จะพบว่า เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลนส์ชุดที่สอง (V_{L2}) มีค่าเพิ่มขึ้น ตำแหน่งของจุดโฟกัสจะเลื่อนเข้าใกล้ชุดเลนส์มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้ขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัสมีขนาดเล็กกลงไปด้วย สำหรับรูปร่างของลำไอออนที่ตำแหน่งก่อนและหลังจุดโฟกัสจะมีลักษณะเป็นวงรี โดยจะมีลักษณะเป็นวงรีเอียงไปทางขวาถ้าอยู่ก่อนจุดโฟกัส และมีลักษณะเป็นรูปวงรีเอียงไปทางซ้ายถ้าตำแหน่งอยู่หลังจุดโฟกัส

4. กรณีของระบบโฟกัสแบบเลนส์สองชุดนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรก จะมีหน้าที่ในการปรับเปลี่ยนแนววิถีการเคลื่อนที่ของ ไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด ให้มีลักษณะลำที่ถู้ออก ขนาน หรือเป็นลำไอออนที่ถูกโฟกัสอยู่ด้านหน้าหรือภายในเลนส์ชุดที่สอง โดยถ้า V_{L1} มี

ค่าน้อยจนเกินไป ขนาดของลำไอออนที่ออกจากระบบไฟกัสมิขนาดใหญ่และมีรูปร่างผิเคเพิ่มขึ้นไปจากเดิมมาก ระดับศักย์ไฟฟ้าของ V_{L1} ที่เหมาะสมจะทำให้มีลำไอออนขนาดเคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์ชุดที่สองในระบบไฟกัสมิ ส่งผลให้รูปร่างของลำไอออนที่ออกมาจากระบบไฟกัสมิค่อนข้างกลมและมีขนาดเล็กกว่าในกรณีที่ศักย์ไฟฟ้า V_{L1} มีค่าน้อยและมากจนเกินไป ส่วนศักย์ไฟฟ้า V_{L2} มีหน้าที่หลักในการกำหนดระบบไฟกัสมิของระบบ โดยเมื่อ V_{L2} มีค่ามากขึ้น จุดไฟกัสมิของระบบจะอยู่ใกล้เลนส์มากขึ้น หรืออาจอยู่ภายในระบบไฟกัสมิก็ได้ แต่ถ้าศักย์ไฟฟ้า V_{L2} มีค่าน้อยลง ระยะไฟกัสมิของระบบจะยาวขึ้น โดยขนาดของลำไอออนที่จุดไฟกัสมิซึ่งเกิดจากระบบไฟกัสมิที่มีระยะไฟกัสมิสั้นจะมีขนาดเล็กกว่า เมื่อเทียบกับขนาดของลำไอออนที่จุดไฟกัสมิซึ่งเกิดจากระบบไฟกัสมิที่มีระยะไฟกัสมิยาวกว่า โดยรูปร่างของลำไอออนที่จุดไฟกัสมิ จะมีลักษณะกลมมากขึ้น ถ้า V_{L1} มีค่าเหมาะสม และนอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของลำไอออนก่อนและหลังจุดไฟกัสมิมีลักษณะเป็นวงรี โดยจะเอียงซ้ายหรือขวาขึ้นอยู่กับเป็นตำแหน่งที่สั้น หรือยาวกว่าระยะไฟกัสมิ

5. ขนาดของลำไอออนที่วัดด้วยวิธีขอบมิดที่มีความแม่นยำในระดับ ± 20 ไมโครเมตรในทั้งสองแนวแกน คือ แกน x และแกน y เมื่อ ลำไอออนมีระดับพลังงาน 1.70 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ผ่านระบบไฟกัสมิ ที่ V_{L1} มีค่าเท่ากับ 1.30 กิโลโวลต์ จะได้ว่า ลำไอออนจะมีขนาดที่วัดได้ในทั้งสองแนวแกนเท่ากันและมีขนาดเล็กที่สุด เมื่อค่า V_{L2} เท่ากับ 1.75 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างจากชุดเลนส์ 11 มิลลิเมตร โดยแนวโน้มขนาดและรูปร่างของลำไอออนที่ได้จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการวัดด้วยวิธีการกวาดรูเข็ม

6. เมื่อใช้ลำไอออนที่ได้จากระบบไฟกัสมิเมื่อเงื่อนไขของระดับพลังงานลำไอออนและศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดแรกเท่ากัน ทำการเจาะแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ พบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ชุดที่สองเพิ่มขึ้นจาก 1.70 เป็น 1.75 กิโลโวลต์ ระยะเวลาที่ลำไอออนเริ่มทะลุแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ มีค่าน้อยลง จาก 130 นาฬิกาเป็น 50 นาฬิกา และลักษณะรูปร่างของรูที่เจาะได้มีลักษณะใกล้เคียงกับที่วัดได้ด้วยวิธีขอบมิด โดยจะมีลักษณะค่อนข้างกลมและเป็นวงรีตามลำดับ

7. ผลของการติดตั้งชุดเลนส์ในระบบไฟกัสมิที่มีลักษณะทำให้แนวแกนของชุดเลนส์ทั้งสองกับแหล่งกำเนิดไอออนเกิดการบิดเบี้ยว ทำให้ลำไอออนที่ได้ ณ ตำแหน่งไฟกัสมิที่แท้จริงซึ่งมีขนาดเล็กที่สุด และกระแสสูงที่สุด มีลักษณะเป็นวงรีไม่กลม อย่างที่ควรจะเป็น โดยลำไอออน ณ ตำแหน่งที่วัดได้กลมขึ้น ยังไม่ใช่จุดไฟกัสมิที่แท้จริงของระบบไฟกัสมิ

8. ระบบไฟกัสมิหลังจากการปรับปรุง เมื่อใช้แหล่งกำเนิดไอออนที่มีมุมบานของลำไอออนต่ำ จะสามารถทำให้ลำไอออนมีขนาดเล็กกลงได้ เมื่อวัดด้วยวิธีการกวาดรูเข็มจะมีขนาดประมาณ 500 ไมโครเมตร เนื่องจากข้อจำกัดของระบบวัด และเมื่อนำไปวัดด้วยวิธีขอบมิดจะพบว่า ลำไอออนที่ได้จะมีขนาดเท่ากันทั้งสองที่แนวแกนในช่วง 120-130 ไมโครเมตร และเมื่อนำไปทำการเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์หนา 20 ไมโครเมตร จะได้ว่ารูที่มีขนาดประมาณ 250 ไมโครเมตร

และสามารถทำให้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ทะลุได้เร็วขึ้น คือ ประมาณ 15 นาที ซึ่งหมายความว่าถ้าไอออนที่ได้นั้นมี ความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้นกว่าเดิม

6.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟและระบบฟ็อกส์ลำไอออน ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีปัญหาบางประการที่ควรได้รับการปรับปรุงระบบ ดังต่อไปนี้

1. การกำเนิดไมโครเวฟพลาสมาเพื่อดึงไอออนออกมาใช้งาน พบว่าการปรับจูนแหล่งกำเนิดทุกครั้งเพื่อให้ได้เงื่อนไขของไมโครเวฟพลาสมาที่คงที่เหมือนเดิม นั้น มีความยุ่งยากอยู่มาก เนื่องจากระบบยังไม่สามารถวัดปริมาณแก๊สที่ไหลเข้าได้บริเวณที่เกิดพลาสมาอย่างแม่นยำ ซึ่งการกำหนดปริมาณของแก๊สเป็นเพียงการพิจารณาจากความดันในแชมเบอร์หลัก ซึ่งอาจมีความผิดพลาดได้ ถึงแม้ว่าความดันในแชมเบอร์หลักยังคงที่ก็ตาม ทำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นนั้นไม่คงที่เนื่องจากปริมาณแก๊สไม่คงที่ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากความดันในระบบหลักมีค่าเปลี่ยนไปเนื่องจากอัตราการปั๊มของปั๊มไอฟุ้งกระจายในระบบมีค่าลดลง เนื่องจากน้ำในระบบหล่อเย็นปั๊มร้อนขึ้น ทำให้ปริมาณแก๊สที่อยู่ภายในบริเวณที่เกิดพลาสมามีค่ามากขึ้น ซึ่งปัญหานี้อาจจะแก้ไขได้โดยการใช้ระบบน้ำหล่อเย็นที่สามารถทำการรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ได้ตลอด

2. การจ่ายกำลังของไมโครเวฟเพื่อทำให้เกิดพลาสมา ต้องมีการปรับจูนทั้งพลังเกอร์และตัวสลับปรับจูน เพื่อให้ได้แหล่งกำเนิดพลาสมาที่คงที่เหมือนเดิมกันทุกครั้ง ตลอดจนการทดลอง ซึ่งต้องระวังการเกิดพลาสมาในลักษณะที่จะทำให้เกิดการสปัดเตอร์ ของขั้วพลาสมาอิเล็กโทรดด้วย ซึ่งสังเกตได้จากกระแสของแหล่งกำเนิดพลาสมามีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นมากผิดปกติ หรือสังเกตได้จากการเกิดฟิล์มเคลือบหลอดแก้วควอร์ตซ์บริเวณขั้วพลาสมาอิเล็กโทรด นอกจากนี้การป้อนศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากเกินไปให้กับระบบดึงไอออนของแหล่งกำเนิดก็จะส่งผลให้เกิด การสปัดเตอร์ได้ด้วยเช่นกัน

3. การติดตั้งชุดเลนส์ให้กับระบบฟ็อกส์ เข้ากับแหล่งกำเนิดไอออนต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญพอสมควร โดยการการติดตั้งระบบแต่ละครั้งต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน และยังคงต้องระวังการติดตั้งชุดเลนส์ที่ทำให้แกนของชุดเลนส์แต่ละชุด ไม่อยู่ในแนวเดียวกัน ถึงแม้ว่าจะพยายามติดตั้งอย่างดีที่สุดแล้วก็ยังเกิดปัญหานี้ขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงระบบจับยึดชุดเลนส์ให้สามารถติดตั้งได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้นกว่าเดิม

4. ระบบการเก็บข้อมูลในการวัดขนาดและรูปร่างของลำไอออน ยังมีปัญหาการหยุดทำงานเมื่อมีการวัดที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งในบางครั้งจำเป็นต้องทำให้ได้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน ดังนั้นจึงควรปรับปรุงระบบเก็บข้อมูลดังกล่าวให้สามารถทำการเก็บข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่หยุดการทำงานขึ้นระหว่างการทดลอง

5. เนื่องจากมีการใช้ศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง ในการดึงไอออน และระบบโพกัส ดังนั้นการคิดตั้งขั้วไฟฟ้าจึงต้องระวังไม่ให้เกิดการลัดวงจร อีกทั้งระหว่างการทดลองต้องระวังศักย์ไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นเนื่องจากระบบดึงไอออนที่แหล่งกำเนิดพลาสมา เมื่อมีการปรับจูนระบบเพื่อให้เข้าสู่เงื่อนไขที่ต้องการ ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายได้

6. ข้อจำกัดของระบบวัดขนาดลำไอออนยังมีอยู่มาก คือในส่วนของ การวัดด้วยวิธีกวาดรูเข็ม ความสามารถของระบบวัดจะขึ้นอยู่กับขนาดของรูแผ่นกัน ซึ่งไม่สามารถที่จะเจาะได้เล็กกว่า 370 ไมโครเมตร โดยที่ขนาดของรูจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการวัดไประยะหนึ่ง ทำให้ผลที่ได้ไม่ถูกต้อง ซึ่งอาจแก้ปัญหาได้โดยการหาวิธีการวัดแบบอื่น หรือไม่ก็หาวิธีการเจาะรูแผ่นกันให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อเพิ่มความสามารถของระบบวัดให้มากขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] John C. Vickerman. **Surface Analysis The Principal Techniques**. New York: John Willy & Sons, Inc. 1997.
- [2] A.J. Steckl, P.Chen, H.E. Jackson, A.G. Choo, X. Cao, J.T. Boyd and M. Kumar. "Review of focused ion beam implantation mixing for the fabrication of GaAs-Based optoelectronics devices" **J.Vac. Sci. Technol.**, Vol.13 no.6, Nov/Dec 1995. pp. 2570-2575.
- [3] A. Wagner and J. P. Levin. "Focused ion beam repair of lithographic masks" **Nucl. Instr. and Meth. B**, Vol. 37/38, February 1989. pp. 224-230.
- [4] I. G. Brown. **The Physics and Technology of Ion Sources**. New York: John Willy & Sons, Inc. 1989.
- [5] J. Root and J.Asmussen. "Experimental performance of a microwave cavity plasma disk ion source" **Rev. Sci. Instrum.**, Vol.56 no.8, August 1985. pp. 1511-1519.
- [6] S. R. Walther, K. N. Leung and W. B. Kunkel. "Characteristics of a compact microwave ion source" **Rev. Sci. Instrum.**, Vol.57 no.8, August 1986. pp. 1531-1535.
- [7] M.Reiser. **Theory and Design of Charged Particle Beams**. New York: John Willy & Sons, Inc., 1994.
- [8] J. A. Seeger. **Microwave Theory Components and Devices**. The United States of America: Prentice-Hall, 1986.
- [9] D.L. Smith. **Thin-Film Deposition Principle and Practice**. The United States of America: McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [10] Nasser E. **Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics**. The United States of America: John Wiley & Son, Inc. 1971.
- [11] A. Grill. **Cold Plasma in Materials Fabrication From Fundamentals to Applications**. New York: IEEE Press, 1994.
- [12] Francis F. Chen. **Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion**. New York: Plenum Press, 1984.
- [13] M. Moisan and J. Pelletier. **Microwave excited Plasmas**. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science B.V., 1999.
- [14] R. Keller. "Ion extraction system: optics and design" **Nucl. Instr. and Meth. A**, Vol. 298, 1990. pp. 247-254.

- [15] Stanley Humphries, Jr. **Principle of Charged Particle Acceleration**. University of New Mexico: John Wiley and Sons.1999.
- [16] B. Wolf. **Handbook of Ion Sources**. United States of America: CRC Press, Inc., 1995.
- [17] James M. Lafferty, Edition. **Foundations of Vacuum Science and Technology**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [18] Yasuyuki Ishii, Akira Isoya, Takaji Kojima and Kazao Arakava. "Estimation of keV submicronion beam with using knife-edge method" **Nucl. Instr. and Meth. B.**, Vol. 221 April 2003. pp. 415-424.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายอมร เทศสกุลวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 18 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ.2520 ณ อ.พลับพลาชัย จังหวัด บุรีรัมย์ จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนประโคนชัยพิทยาคม สำเร็จ การศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมื่อปีการศึกษา 2542 จากนั้น ได้เข้าทำงานตำแหน่งผู้ช่วยสอน ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี เป็นเวลา 3 ปี ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ณ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้