



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อการประยุกต์ใช้
ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัมเชนวิช” Phase 1

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา

พฤษภาคม 2546

สัญญาเลขที่ RDG3/11/2541
และ RDG3/16/2544

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อการประยุกต์ใช้ ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัมแซนวิช” Phase 1

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา	ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ชุดโครงการพัฒนาเซลล์แสงแดดไทย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ABSTRACT

Focus ion beams technique for Groove-Cutting “Club Sandwich” solar cell has been developed at Department of Applied Physics, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang in the following topics : hollow cathode magnetron ion source development, ion detector development, ion source characterizations, focusing and scanning system, microwave ion source, lens system modeling.

Hollow cathode magnetron ion source and ion beam formation system were developed. The ion source can produce ion current of greater than 1.5 mA. Computer controlled ion detector scanning system was designed and implemented for ion beam characterization. Ion detector has been improved to eliminate the effect of secondary electrons. The focusing system was designed and implemented. The focal length of the double focusing lens system can be adjusted up to 85 mm with 1 mm diameter in focal spot. The scanning system can deflect ion beam with sensitivity of $2^{\circ}/100$ V. Microwave induced plasma source was designed and implemented and plasma of argon and neon can be produced at microwave power of approximately 145 W. Lens system modeling program has been developed and was used to trace the beam for coaxial cylindrical electrode lens system.

บทคัดย่อ

การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนได้ทำขึ้นที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ การพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดฮอลล์ แคโทดแมกนีตรอน การพัฒนาระบบตรวจวัดลำไอออน การศึกษาลักษณะสมบัติของลำไอออน การพัฒนาระบบโฟกัสและระบบกวาดลำไอออน แหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการพัฒนาแบบจำลองระบบโฟกัสด้วยคอมพิวเตอร์

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดฮอลล์แคโทดแมกนีตรอนพร้อมระบบดึงลำไอออนได้ถูกสร้างขึ้นให้สามารถสร้างกระแสไอออนได้มากกว่า 1.5 มิลลิแอมป์ ระบบตรวจวัดลำไอออนควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจวัดลักษณะสมบัติของลำไอออน ระบบการวัดนี้ได้ปรับปรุงให้สามารถลดผลกระทบของอิเล็กตรอนทุติยภูมิได้ดี ระบบโฟกัสลำไอออนที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับระยะโฟกัสได้ถึง 85 mm โดยลำไอออนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ที่จุดโฟกัส ระบบกวาดลำไอออนชนิดเพลาท่อนานที่ติดตั้งต่อจากระบบโฟกัสลำไอออน สามารถเบี่ยงเบนลำไอออนได้ด้วย ความละเอียด $2^\circ/100$ V. แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สร้างขึ้นสามารถทำให้ก๊าซอาร์กอนและนีออนแตกตัวเป็นพลาสมาได้เมื่อใช้กำลังของไมโครเวฟประมาณ 145 W แบบจำลองระบบโฟกัสด้วยคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองเส้นทางของลำไอออนในระบบเลนส์ทรงกระบอก

Executive Summary

- Project Code : RGD3/11/2541 and RGD3/16/2544
- Project Title : Development of Focused Ion Beams for Groove-Cutting
"Club Sandwich" Solar Cell Phase 1
- Investigator : Asst. Prof. Dr. Warawoot Thowladda
Department of Applied Physics, Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Tel : 0-2737-3000 ext. 6197 Fax : 0-2326-4413
- E-mail Address : ktwarawo@kmitl.ac.th
- Project Period : August 1998 – May 2003
- Objective :
 1. To develop ion focusing and scanning systems for Groove-Cutting "Club Sandwich" solar cell.
 2. To study and develop high current density ion source for focused ion beam system.
- Methodology :
 1. Design and implementation of Hollow Cathode Magnetron Ion Sources.
 2. Design and implementation of computer controlled ion detector scanning system for ion beam characterization.
 3. Ion beam characterization : beam profile, beam width, beam divergence, energy spread, focal length and focal spot size.
 4. Design and implementation of unipotential coaxial aperture electrodes focusing lens system.
 5. Design and implementation of computer controlled ion scanning system
 6. Design and implementation of direct coupling waveguide-cavity plasma source.
 7. Development of lens system modeling program.
- Results : Hollow cathode magnetron ion source and ion beam formation system (extractor) were developed in phase 1A of the research project. The hollow cathode magnetron discharge is formed in a coaxial cylindrical diode in the presence of an axial magnetic field. The extractor system consists of a perforated acceleration electrode

and the applied high voltage. The ion source can produce ion current of greater than 1.5 mA (equivalent to 45 mA/cm²).

Computer controlled ion detector (Faraday cup) scanning system with 20x20 mm² scan area and 0.1 mm resolution was undertaken. The system was used as a tool for ion beam characterization. The ion detector was improved to eliminate the effect of secondary electrons. Beam profiles of LK Technology, model NGI 3000, ion source were measured. NGI 3000 ion beam has 10.12°(major) and 6.23°(minor) beam divergence with a beam width of 19.9 mm(major) and 12.3 mm(minor) at the distance of 103 mm from source. Energy spread of ion beam is approximately 20% of beam energy.

The focusing system is unipotential type consisting of three coaxial aperture electrodes. The focal length of the double focusing lens system, can be adjusted up to 85 mm with 1 mm diameter in focal spot as a limit of ion detector resolution.

The scanning system consists of two parallel plates and is mounted in front of the focusing lens. The scanning system can deflect ion beam with sensitivity of 2°/100 V.

Microwave induced plasma source was designed and utilized. Microwave from a 2.45 GHz magnetron source was coupled directly into a rectangular waveguide-cavity. The microwave power can be reduced to 4 W. The plasma of argon and neon can be produced at microwave power of approximately 145 W.

Lens system modeling program has been developed and was used to trace the beam for coaxial cylindrical electrode lens system.

Conclusions :

Hollow cathode magnetron ion source and ion beam formation system were developed. The ion source can produce ion current of greater than 1.5 mA. Computer controlled ion detector scanning system was designed and implemented for ion beam characterization. Ion detector was improved to eliminate the effect of secondary electrons. The focusing system was designed and implemented. The focal length of the double focusing lens system can be adjusted upto 85 mm with 1 mm diameter in focal spot. The

scanning system can deflect ion beam with a sensitivity of $2^\circ/100$ V. Microwave induced plasma source was designed and implemented and plasma of argon and neon can be generated. Lens system modeling program has been developed and was used to trace the beam for coaxial cylindrical electrode lens system.

Keywords : focused ion beam, focusing system, microwave induced plasma

คำนำ

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเทคนิคฟลักซ์ลำไอออนเพื่อการประยุกต์ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัมแซนวิช” Phase 1 ที่รับผิดชอบโดยภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้แบ่งการดำเนินงานเป็นสองระยะ คือ ระยะ 1A และ 1B ในระยะ 1A ได้มีการพัฒนาและศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดฮอลล์แคโทด แมกนีตรอนและระบบดึงไอออน ตลอดจนการศึกษาการเกิดพลาสมาในแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดฮอลล์แคโทดแมกนีตรอน รวมถึงระบบฟลักซ์ลำไอออนบางส่วน งานส่วนนี้ได้รายงานไว้แล้วในรายงานฉบับสมบูรณ์เมื่อจบการวิจัยระยะ 1A และได้้นำมารวมไว้ในภาคผนวก ข ของรายงานฉบับนี้

ในส่วนของการวิจัยระยะ 1B ได้เน้นไปที่การพัฒนาระบบฟลักซ์และระบบกวาดลำไอออน รวมทั้งการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองเส้นทางของลำไอออนในระบบฟลักซ์ลำไอออน ตลอดจนได้มีการพัฒนาระบบตรวจวัดลำไอออนควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ที่สามารถรองรับงานวิจัยในอนาคตได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาที่กระตุ้นคลื่นไมโครเวฟที่สามารถพัฒนาไปเป็นแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อไปได้ งานวิจัยในระยะ 1B นี้ได้นำเสนอเป็นเนื้อหาหลักของรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้

สารบัญ

หน้า

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์.....	II
Abstract.....	III
บทคัดย่อ.....	IV
Executive Summary.....	V
คำนำ.....	VIII
สารบัญ.....	IX
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ Phase 1B.....	1
1. Ion Detector Development.....	2
1.1 การปรับปรุงระบบขับเคลื่อน Ion Detector.....	2
1.2 การออกแบบและปรับปรุงระบบจับยึด Ion Detector.....	8
1.3 การปรับปรุงและพัฒนา Faraday Cup Configuration.....	10
1.4 การศึกษาขนาดของ Circular Aperture on Mask ที่มีต่อการวัดขนาดลำไอออน.....	22
2. Ion Source Characterizations.....	25
2.1 Beam Width Measurement.....	27
2.2 Beam Divergence Measurement.....	31
2.3 Energy Spread Measurement.....	37
2.4 Sleeve Effect to Ion Beam.....	41
2.5 Exit Hole Effect to Ion Beam.....	44
2.6 Emission Current Effect to Beam Width and Beam Energy Spread.....	48
3. Focusing System.....	52
3.1 Lens Potential Effect.....	52
3.2 The Space between Lens Electrodes and Lens System Length.....	65
3.3 Pressure Effect to Ion Beam Trajectory.....	70
3.4 Emission Current and Ion Current Density Effects.....	74
3.5 Effect to Beam Profile.....	77

สารบัญ

หน้า

4. Scanning System.....	80
4.1 การสร้างและพัฒนาชุดควบคุมการกวาดลำไอออน.....	80
4.2 การออกแบบและสร้างระบบเฟลทคู.....	87
4.3 การทดสอบระบบเฟลทคู.....	92
5. Focusing System Improvement.....	104
5.1 Small Hole Focusing System.....	104
5.2 Double Focusing System.....	106
6. Microwave Ion Source.....	110
สรุปผลการดำเนินงานวิจัยในช่วง Phase 1B.....	116
ภาคผนวก ก	
การศึกษาระบบโพกัสลำไอออนโดยการคำนวณ.....	124
1. The Simulation of Ion Beam Trajectory in Focusing System.....	124
2. Calculation of Axially Symmetric Potential.....	127
3. การทดสอบโปรแกรม.....	130
ภาคผนวก ข	
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ Phase 1A.....	141
คำนำ.....	142
บทคัดย่อ.....	143
Abstract.....	144
รายงานผลการวิจัยส่วนที่ 1.....	145
1. ระบบสุญญากาศ.....	146
1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ.....	146
1.2 Vacuum Chamber.....	148
1.3 Beam Profile Monitor.....	151
1.4 Faraday Cup.....	153

สารบัญ

	หน้า
2. Ion Source.....	154
2.1 การทดสอบระบบสุญญากาศ.....	164
2.2 การสอบสนามแม่เหล็กของ Ion Source.....	165
2.3 การทดสอบ Hollow Cathode Magnetron Ion Source.....	169
2.4 การจัดระบบการวัดด้วยคอมพิวเตอร์.....	169
2.5 การทดสอบการเกิด Plasma Discharge.....	170
2.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ Discharge Current.....	182
2.7 การศึกษาผลของความดันและสนามแม่เหล็ก.....	188
3. การศึกษาระบบ extraction.....	197
3.1 การทดลองวงจรที่ 1.....	197
3.2 การทดลองวงจรที่ 2.....	199
3.3 การทดลองวงจรที่ 3.....	202
3.4 การทดลองวงจรที่ 4.....	205
3.5 การทดลองวงจรที่ 5.....	206
3.6 การทดลองวงจรที่ 6.....	209
3.7 การทดลองวงจรที่ 7.....	210
4. การศึกษาระบบโฟกัสลำไอออน.....	213
5. การดำเนินงานวิจัยระยะที่ 5 (สิงหาคม 2543 – มกราคม 2544).....	217
5.1 ปรับปรุงข้อไฟฟ้า CMC และ CA ของ HOCAM.....	217
5.2 ตรวจสอบการทำงานของระบบ extraction.....	219
5.3 ทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสมา.....	221
5.4 ผลของ discharge current ต่อกระแสไอออน.....	223
5.5 ผลของ extraction voltage ต่อกระแสไอออน.....	223
5.6 ผลของสนามแม่เหล็กต่อกระแสไอออน.....	225
รายงานผลการวิจัยส่วนที่ 2.....	227
รายงานฉบับสิ้นสุดโครงการ Microwave Ion Source.....	228
แนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	229
เป้าหมายโดยรวมของโครงการ.....	229
ภาพรวมการดำเนินงานโครงการและผลของงาน.....	229
ผลงานในโครงการ.....	231

สารบัญ

หน้า

สรุปผลการดำเนินงานวิจัยในช่วง Phase 1A.....	251
ปัญหาและอุปสรรค.....	254

ภาคผนวก ค : สรุปรายงานความก้าวหน้า

ภาคผนวก ง : รายงานผลการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของนักวิจัย

ภาคผนวก จ : รายงานการเงิน

ภาคผนวก ฉ : สำเนาสมุดบัญชี

ภาคผนวก ช : ครุภัณฑ์โครงการวิจัยที่ได้รับทุกจาก สกว.

สัญญาเลขที่ RDG3/16/2544
โครงการวิจัย เรื่อง การพัฒนาเทคนิคฟกัสล้าไอออนเพื่อการประยุกต์ใช้
ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัปลแซนวิช” Phase 1B
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ระยะเวลาโครงการ	มิถุนายน 2544 – พฤษภาคม 2546
ชื่อหัวหน้าโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรวิมล เถลัดดา
หน่วยงาน	ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เสนอต่อ	โครงการพัฒนาเซลล์แสงแดดไทย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในโครงการ การพัฒนาเทคนิคฟกัสล้าไอออนเพื่อการประยุกต์ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัปลแซนวิช” ระยะที่ 1B มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบฟกัสล้าและระบบกวาดล้าไอออนรวมทั้งศึกษาและพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ให้มีคุณสมบัติในการเซาะร่องแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ให้มีขนาดความกว้าง 10 – 100 mm ลึกระหว่าง 10 – 20 mm ช่องห่างระหว่างช่อง 0.5 – 2 mm นั้น สำหรับการดำเนินงานวิจัยในระยะ 1B ที่สำคัญ ๆ มีดังนี้

1. Ion Detector Development
2. Ion Source Characterizations
3. Focusing System
4. Scanning System
5. Focusing System Improvement
6. Microwave Ion Source
7. Lens System Modeling

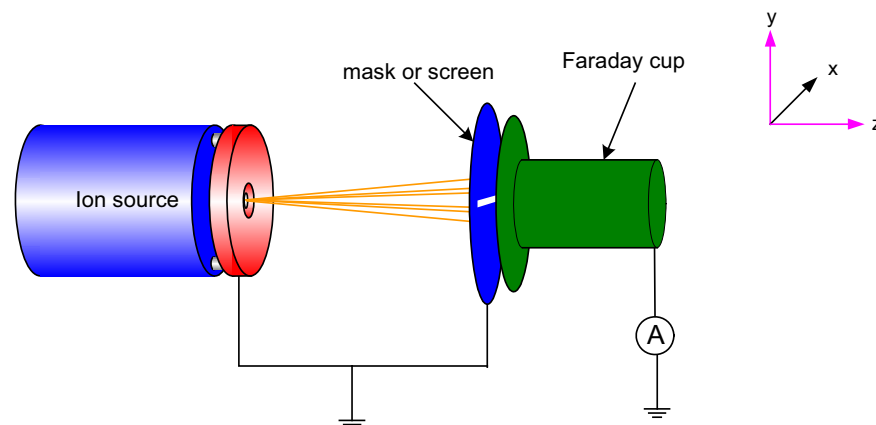
1. Ion Detector Development

ในการดำเนินงานวิจัยในช่วง Phase 1B ที่ผ่านมา ในส่วนที่เป็นการดำเนินงานในการพัฒนาระบบการวัดสมบัติของลำไอออน ได้ดำเนินการออกแบบสร้างรวมทั้งได้ทำการพัฒนารูปร่าง และ ระบบขับเคลื่อน ของ detector เพื่อให้การวัดมีความถูกต้องและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยงานที่สำคัญที่ได้ทำมีดังนี้

- 1.1 การปรับปรุงระบบขับเคลื่อน Ion detector
- 1.2 การออกแบบและปรับปรุงระบบจับยึด Ion detector
- 1.3 การปรับปรุงและพัฒนา Faraday cup configuration
- 1.4 การศึกษาขนาดของ circular aperture on mask ที่มีการวัดขนาดลำไอออน

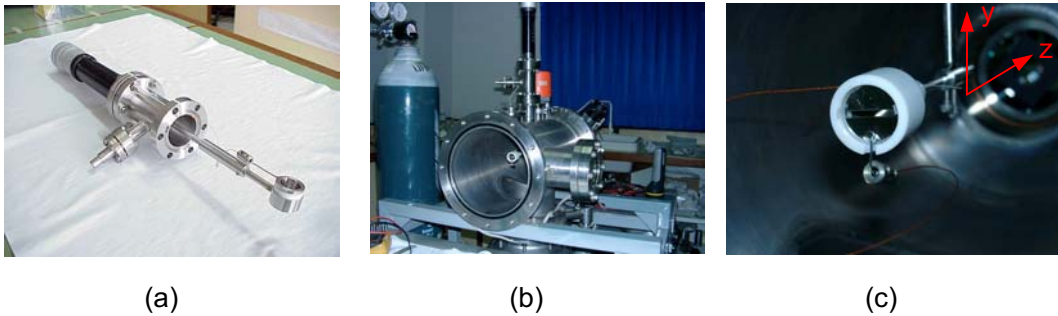
1.1 การปรับปรุงระบบขับเคลื่อน ion detector

สำหรับ detector ที่ใช้ในการวัดขนาดและ divergence ของลำไอออนนั้น จำเป็นจะต้องเคลื่อนที่ได้ทั้ง 3 มิติ เพื่อที่จะสามารถวัด profile ของลำไอออนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ สำหรับงานวิจัยในระยะแรกนั้น detector ที่ใช้ในการวัดสามารถเคลื่อนได้เพียง 2 มิติเท่านั้น คือ เคลื่อนที่ได้ในแนวแกน y และ z ดังรูปที่ 1



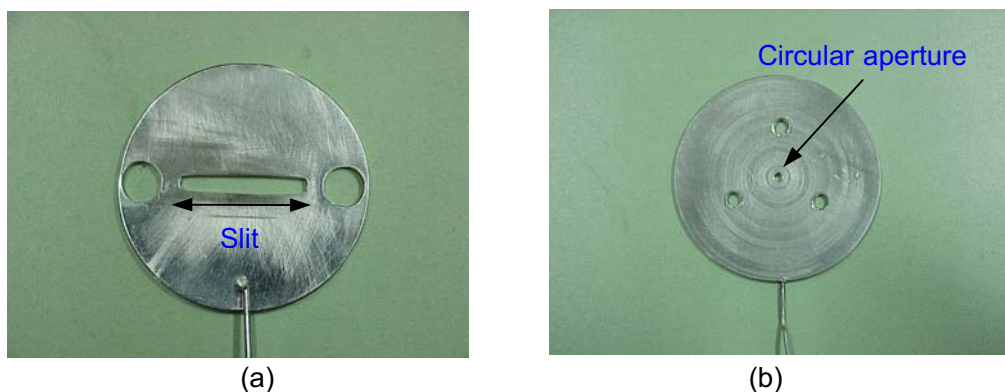
รูปที่ 1 ระบบการวัดลำไอออนด้วย detector ที่เคลื่อนได้เพียงในแนวแกน y และ z

detector ที่ใช้กับงานวิจัยในระยะแรกนั้น ถูกยึดติดกับ manipulator ซึ่งเคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวแกน y โดยการหมุน manipulator จากภายนอก chamber ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ทำได้โดยการเลื่อนแกนโลหะซึ่งติดอยู่ในแนวแกน z ดังรูปที่ 2 ซึ่งถ้าต้องการปรับเคลื่อนแกนในแนวนั้นจะต้องถอดหน้าแปลนด้านหลังของ chamber ออก ซึ่งทำให้เสียเวลามาก เพราะต้องหยุดทำการทดลองเป็นเวลานาน

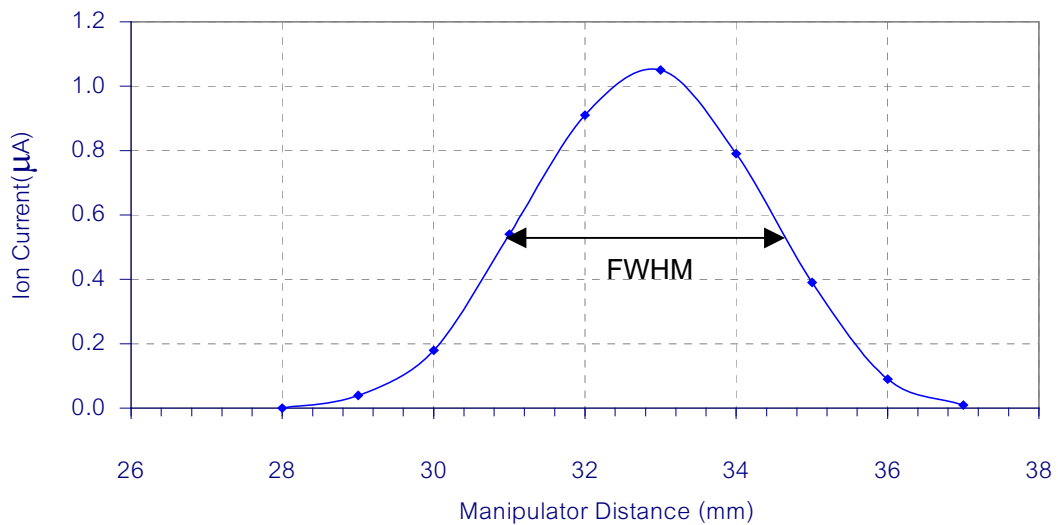


รูปที่ 2 (a) Faraday cup ติดตั้งเข้ากับ manipulator
 (b) Faraday cup กับ manipulator ติดตั้งเข้ากับ chamber vacuum
 (c) ทิศทางที่ Faraday cup สามารถเคลื่อนที่ได้

การวัดลำไอออนด้วย detector ที่เคลื่อนที่บนระนาบ xy ได้ในแนวแกน y เพียงแกนเดียวนั้น mask ที่อยู่ด้านหน้าของ Faraday cup จะเป็นแบบ mask with slit ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3 (a) ความยาวของ slit วางในแนวแกน x ซึ่งทำให้ข้อมูลของ beam profile ที่ได้นี้ จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อลำไอออนนั้นมีลักษณะเป็นวงกลม ในการวัด profile ด้วยวิธีนี้ จะได้ค่าของกระแสเทียบกับระยะที่ manipulator เคลื่อนในแนวแกน y ซึ่งต้องใช้มือหมุนตัว manipulator (จากภายนอก chamber) ซึ่งจะทำให้ detector ที่อยู่ภายใน chamber เคลื่อนที่ได้ เมื่อนำค่าของกระแสไอออนที่ตำแหน่งใด ๆ ตามแนวแกน y มาพล็อตกราฟกับระยะทางที่ทำการเลื่อน detector ตามแนวแกน y จะได้กราฟดังรูปที่ 4 จากนั้นหาค่า FWHM (Full Width at Half Maximum) การวัดด้วยวิธีนี้ ทำให้ได้ profile ของลำไอออนที่ไม่ถูกต้องนัก โดยเฉพาะถ้าลำไอออนนั้นไม่กลม และ ถ้าต้องการวัด beam divergence ด้วยแล้วจะต้องเสียเวลาในการถอดหน้าแปลนของ chamber เพื่อทำการเลื่อน detector ในแนวแกน z

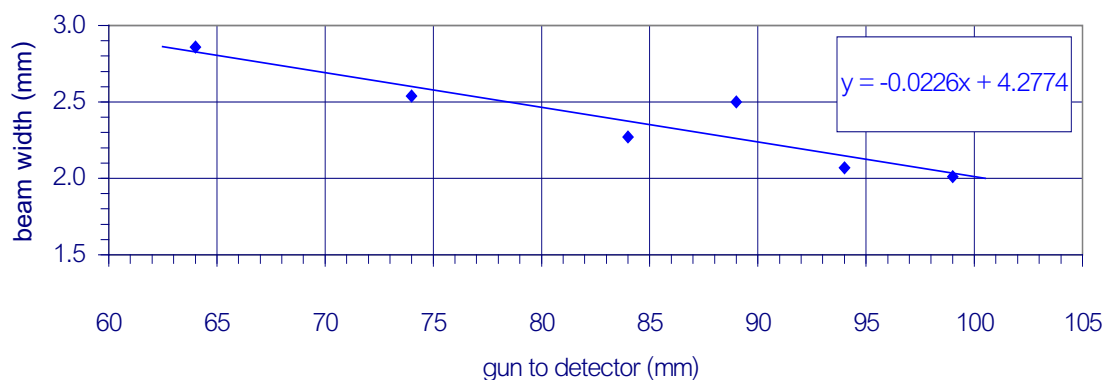


รูปที่ 3 (a) mask with slit for manual measurement
 (b) mask with circular aperture for motor measurement



รูปที่ 4 ลักษณะข้อมูลของ distribution of particle ที่ได้จากระบบการวัดแบบ 2 มิติ

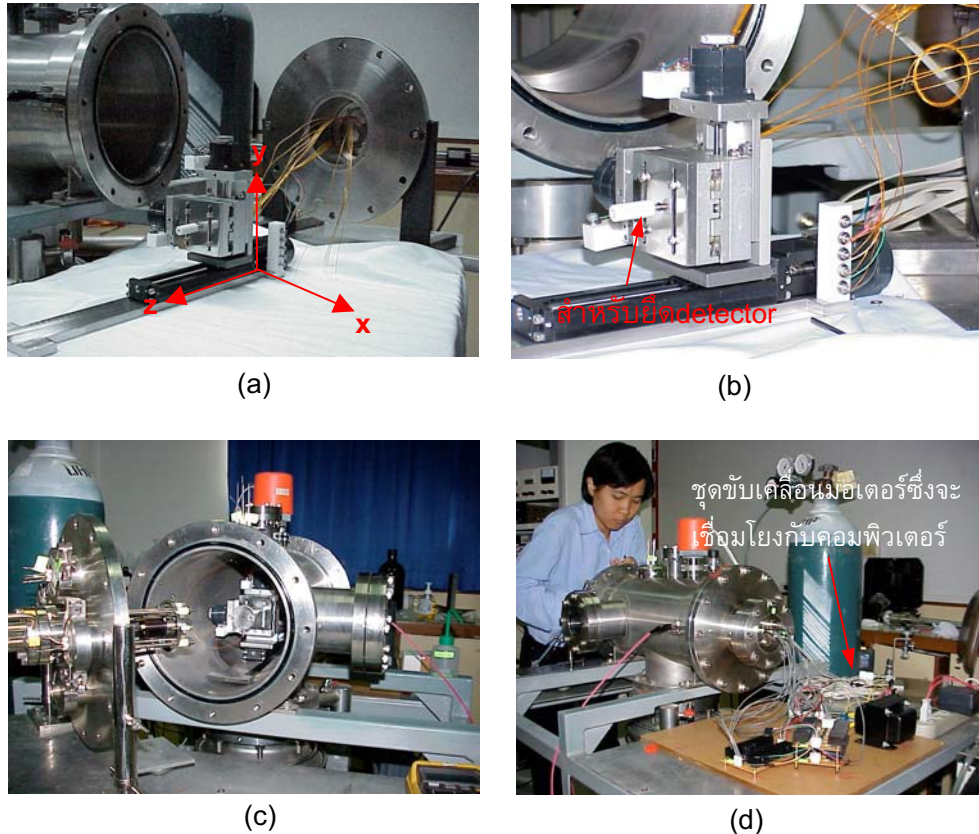
นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการขับเคลื่อน detector จะยังเป็นปัญหาสำคัญมากในการวัดลำไอออนที่เคลื่อนออกมาระบบโฟกัสลำไอออน โดยเมื่อทำการวัด focused ion beam trajectory ด้วยระบบการวัดดังรูปที่ 1 นั้น จะได้เส้นทางเดินของลำไอออนดังรูปที่ 5 ซึ่งไม่สามารถที่จะวิเคราะห์ข้อมูลที่วัดออกมาได้เลยว่า เส้นทางเดินของลำไอออน จุดโฟกัส ขนาดลำไอออน หรือแม้กระทั่งรูปร่างของลำไอออน จริง ๆ แล้ว มีลักษณะเป็นอย่างไร



รูปที่ 5 Focused Ion Beam Trajectory ที่ได้จากระบบการวัดแบบ 2 มิติ

ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยการพัฒนาระบบขับเคลื่อน detector เสียใหม่ โดยระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้เป็นระบบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้ง 3 มิติ ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถขับเคลื่อน detector ได้โดยไม่ต้องถอดหน้าแปลนของ chamber โดย

detector จะถูกยึดอยู่บนแท่น scan จำนวน 3 แท่น เคลื่อนที่ได้ด้วยการขับเคลื่อนของมอเตอร์ 5 เฟส จำนวน 3 ตัว ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6

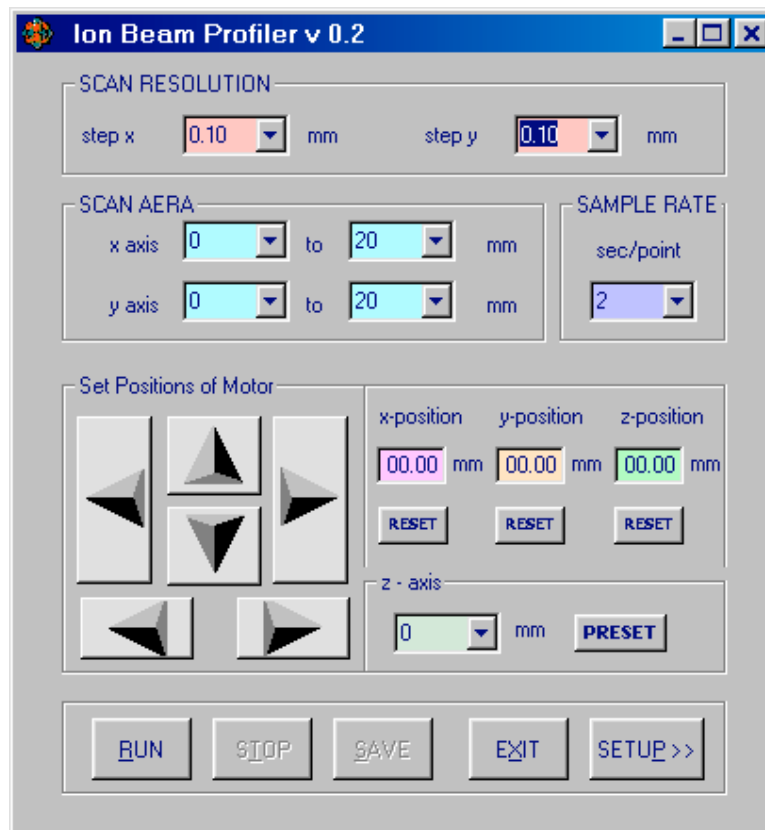


รูปที่ 6 ระบบการขับเคลื่อน ion detector

- (a) แท่น scan ทั้ง 3 แกน ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อน detector ในแต่ละแนวแกน
- (b) ตำแหน่งยึด detector บนชุด scan
- (c) ตำแหน่งวาง ชุด scan และ detector ภายใน chamber
- (d) ชุดวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ โดย detector เคลื่อนที่ได้โดยคำสั่งจากคอมพิวเตอร์

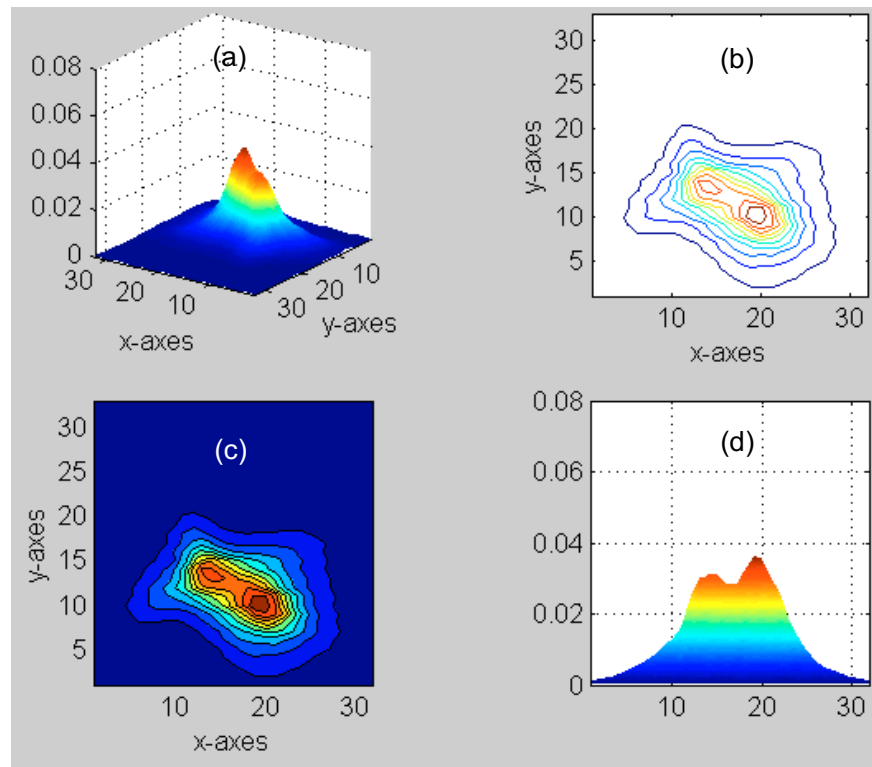
ระบบการขับเคลื่อน detector ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาสามารถ scan พื้นที่ได้ถึงขนาด $20 \times 20 \text{ mm}^2$ เคลื่อนที่ในแนวแกน z ได้ 90 mm มีความละเอียดในการ scan 0.1 mm โดยความละเอียด และ scan area สามารถกำหนดได้จากหน้าจอหลักของโปรแกรมที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ หน้าตาของหน้าจอหลักของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 7 สำหรับระบบการขับเคลื่อน detector ที่สามารถเคลื่อนที่บนระนาบ xy ได้ทั้งในแนวแกน x และ y นี้ mask ที่ใช้กับ Faraday cup จะเป็นแบบ mask with circular aperture มีลักษณะดังรูปที่ 3 (b) โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ circular aperture จะมีทั้งขนาด 1 , 2 และ 3 mm ขึ้นอยู่กับขนาดของลำ

ไอออนที่จะทำการวัดว่ามีขนาดเล็กหรือใหญ่ ซึ่งถ้าเป็นลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจากระบบโฟกัส ก็จะใช้ mask with circular aperture ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 mm



รูปที่ 7 หน้าจอหลักของโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

ข้อมูลของ beam profile ที่ได้จากระบบการวัดดังกล่าว เป็นค่าของกระแสไอออนแต่ละจุดบนระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z ค่า ๆ หนึ่ง ดังนั้นถ้าต้องการวัด beam divergence ก็ต้องทำการเปลี่ยนตำแหน่ง detector ในแนวแกน z ด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดยการสั่งให้มอเตอร์เคลื่อนที่ผ่านทางคอมพิวเตอร์โดยไม่ต้องหยุดทำการทดลองหรือถอดหน้าแปลนของ chamber ให้เสียเวลาแต่อย่างใด ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเก็บด้วยคอมพิวเตอร์และเมื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์ด้วย software ตัวหนึ่งที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น ทำให้เกิดเป็นภาพ profile ของลำไอออนดังรูปที่ 8 จากกราฟรูปที่ 8 (a) แสดงค่ากระแสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระนาบ xy (ขนาดพื้นที่ที่ทำการ scan) โดยค่าในแนวแกนตั้งจะต้องคูณด้วย 10 เสียก่อนจึงจะออกมาเป็นค่าของกระแสไอออนที่แท้จริง (หน่วย μA) สำหรับค่าในแนวแกน x และ y จะต้องคูณด้วย step ของมอเตอร์ที่ใช้ในการ scan (scan step) จึงจะได้พื้นที่ในการ scan ที่แท้จริงออกมา (หน่วย mm^2) ซึ่งจากการทดลองนี้ต้องคูณด้วย 0.5 รูปที่ 8 (b) และ 8 (c) เป็นมุมมองด้านบนของรูปที่ 8 (a) สำหรับรูป 8 (d) เป็นภาพแสดงขนาดของกระแสเทียบกับระยะ scan ด้านแกน x

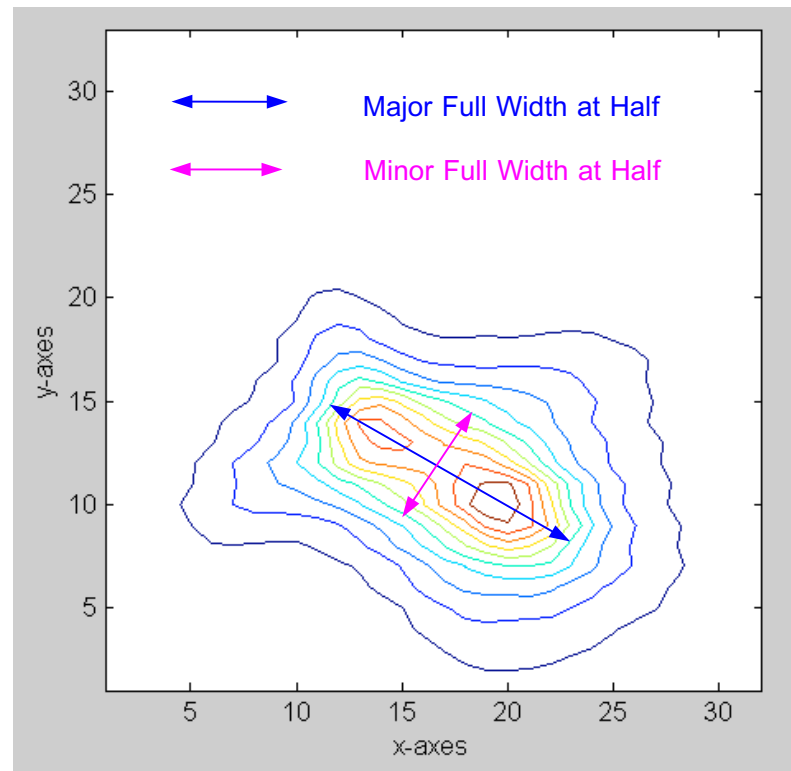


รูปที่ 8 ลักษณะข้อมูลที่ได้จากระบบการวัดแบบ 3 มิติ

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยระบบการวัดแบบ 3 มิติ พบว่าลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไม่กลม มีรูปร่างและลักษณะค่อนข้างเป็นวงรี ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้องวัดความกว้างของลำไอออนเป็น 2 ค่าด้วยกัน คือ

- Major Full Width at Half Maximum (Major FWHM)
- Minor Full Width at Half Maximum (Minor FWHM)

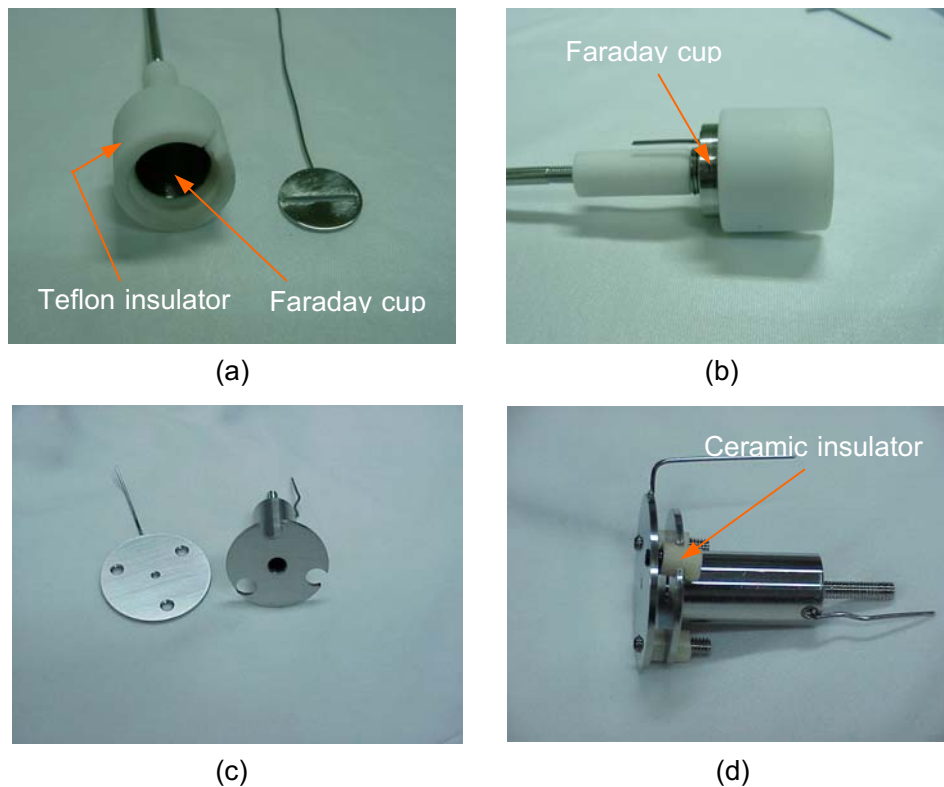
ตำแหน่งของการวัดค่า Major และ Minor FWHM แสดงดังรูปที่ 9 ในการวัดค่า FWHM ดังในรูปที่ 9 นั้น ทำได้โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา นอกจากนี้โปรแกรมหังกล่าวยังสามารถคำนวณค่าพื้นที่ใต้กราฟ (จำนวนไอออนทั้งหมดที่อยู่บนระนาบ xy) และ ตำแหน่งที่มีค่ากระแสสูงสุด ได้อีกด้วย



รูปที่ 9 ขนาดของลำไอออนทำการวัดเป็น 2 ค่าด้วยกัน คือ Major และ Minor Full Width at Half Maximum

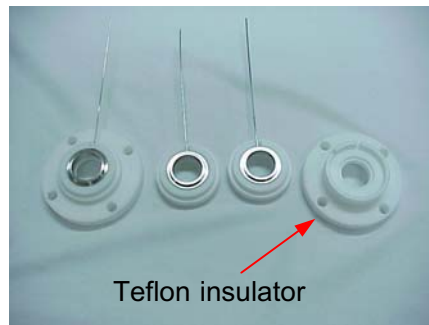
1.2 การออกแบบและปรับปรุงระบบจับยึด ion detector

เนื่องจากระบบจับยึด Faraday cup และ focusing system ที่ใช้ในตอนเริ่มต้นของการทำวิจัยนั้นได้มีการใช้ Teflon insulator เป็นส่วนประกอบหลักของระบบจับยึด จึงได้ทำการปรับปรุงและออกแบบชุดจับยึดให้กับ Faraday cup และ focusing system เสียใหม่ โดยพยายามหลีกเลี่ยงการใช้ Teflon insulator เพื่อหลีกเลี่ยงการสะสมประจุบนผิวของ Teflon (dielectric constant 1.90 – 1.93 ที่ ความถี่ 1 MHz , Outgassing rate 2.5×10^{-8} torr-L/sec-cm² ที่ชั่วโม่งที่ 10) จากเดิม Faraday cup และ mask จะถูกยึดติดเข้ากับ Teflon insulator ดังรูปที่ 10 (a) และ (b) ซึ่งได้เปลี่ยน insulator จาก Teflon มาเป็น Ceramic insulator (dielectric constant 5.1-5.9 ที่ ความถี่ 1 MHz , no outgassing) ลักษณะของ Faraday cup ที่ ceramic insulator เป็น support แสดงดังรูปที่ 10 (c) และ (d)

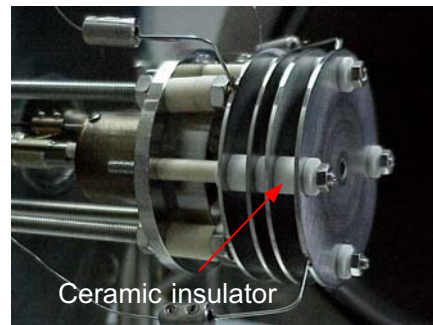


รูปที่ 10 (a) และ (b) mask ถูกยึดเข้ากับ Faraday cup ด้วย Teflon insulator
 (c) และ (d) mask ถูกยึดเข้ากับ Faraday cup ด้วย Ceramic insulator

สำหรับ Focusing system ได้มีการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยจากเดิมใช้ Teflon เป็น insulator ก็ได้เปลี่ยนมาเป็น Ceramic แทนเช่นเดียวกัน ลักษณะของการจับยึดชุดเลนส์แบบเดิมจะฝังชิ้นเลนส์แต่ละชิ้นไว้ภายใน Teflon insulator เพื่อทำให้เกิดระยะห่างของเลนส์แต่ละชิ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมประจุที่บริเวณ insulator ได้ง่าย ดังรูปที่ 11 (a) แต่สำหรับระบบเลนส์ชุดใหม่นี้ระยะห่างระหว่างเลนส์แต่ละชิ้นทำโดยใช้ Ceramic insulator เป็นตัวขึ้นทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชิ้นเลนส์แสดงดังรูปที่ 11 (b) สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับ Focusing system จะได้อธิบายต่อไป



(a)



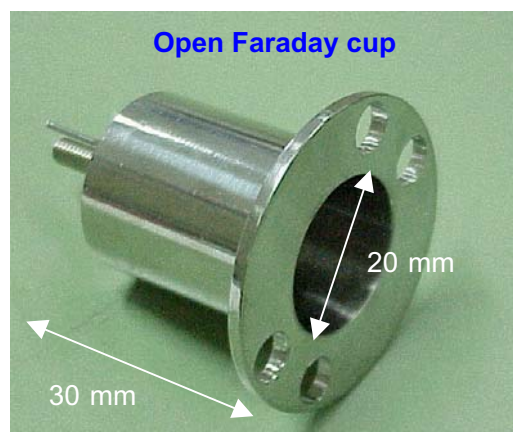
(b)

รูปที่ 11 (a) Focusing system แบบที่ใช้ Teflon support
(b) Focusing system แบบที่ใช้ Ceramic support

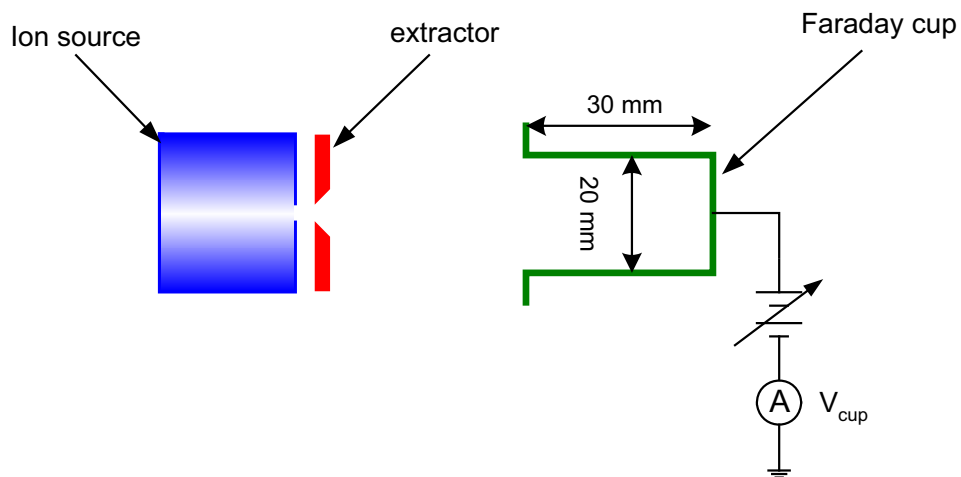
1.3 การปรับปรุงและพัฒนา Faraday cup configuration

การปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงลักษณะและรูปร่างของ Faraday cup หรือ ion detector นั้น มีจุดประสงค์หลักเพื่อลดหรือกำจัด electron secondary ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการ bombard ของไอออนบนผิวหน้าของ Faraday cup ซึ่งทำมาจาก stainless steel โดยจะส่งผลทำให้การวัดค่ากระแสไอออนมีค่าผิดพลาดเกินความเป็นจริง

การทดลองที่ทำให้คาดคิดว่ามี secondary electron หลุดออกมาจาก Faraday cup เกิดจากการทดลองเพื่อทำการวัด distribution of beam particles และ energy spread of ions โดยใช้ Faraday Cup ซึ่งมีลักษณะเป็นถ้วยทำจาก stainless steel โดยมีความลึกของถ้วย 30 mm ปากกว้างถึง 20 mm มีลักษณะและขนาดดังรูปที่ 12

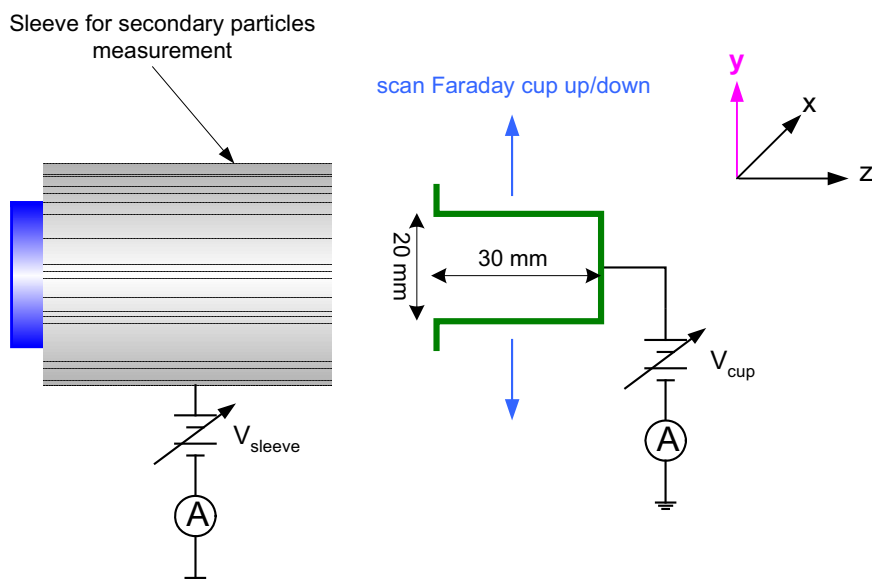


รูปที่ 12 Open Faraday cup ขนาดปากกว้าง 20 mm



รูปที่ 13 ไตอะแกรมการวัดไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดด้วย Open Faraday cup

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดโดยทำการทดลองด้วยระบบซึ่งมีไตอะแกรมแสดงดังรูปที่ 13 นั้น คาดว่าน่าจะเกิด secondary electron ขึ้น เนื่องจากการชนกันของไอออนกับ Faraday cup ที่มีปากที่เปิดกว้าง จากคำแนะนำของ ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ (ที่ปรึกษาโครงการ) ที่ว่าควรจะวัดจำนวนของ secondary electron ว่ามีออกมาเท่าไรเพื่อจะได้รู้ถึงจำนวนของไอออนที่ถูกตัด จึงได้ทำการออกแบบระบบที่จะทำการวัด secondary electron ระบบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 14



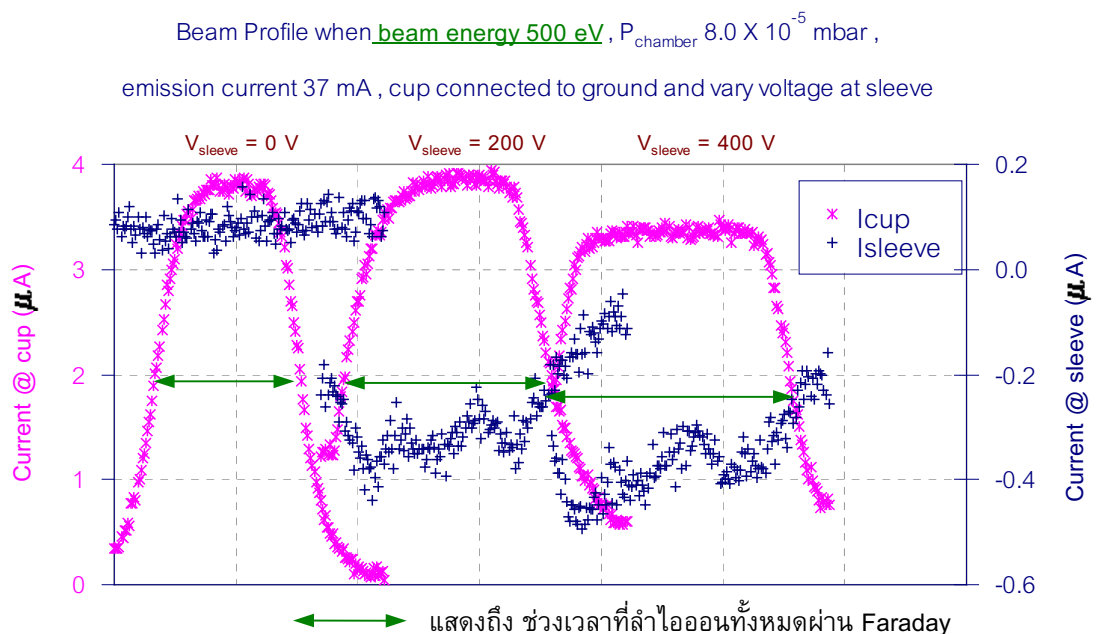
รูปที่ 14 Secondary electron measurement system with big sleeve

ระบบการวัด secondary electrons ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไอออน และ Open Faraday cup เช่นเดิม แต่จะมี กระบอกโลหะซึ่งทำจาก stainless metal สวมไว้กับตัวแหล่งกำเนิดดังรูปที่ 14 ซึ่งในที่นี้ขอเรียกว่า **sleeve** เมื่อไอออนวิ่งเข้าชน Faraday cup ถ้ามี secondary electrons หลุดออกมาจาก cup จริง secondary electrons ก็น่าจะวิ่งสวนทาง ไอออนออกมาซึ่ง secondary particles ส่วนใหญ่ก็น่าจะวิ่งไปชนกับ sleeve ดังนั้น sleeve ก็จะเป็นตัววัดจำนวน secondary electrons ที่หลุดออกมาจาก Faraday cup

ในการทดลองเพื่อศึกษาถึง secondary electrons ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชนของไอออน กับ Faraday cup นั้นได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอนด้วยกันคือ

- ทำการปรับโวลเตจที่ sleeve
- ทำการปรับโวลเตจที่ Faraday cup
- การปรับโวลเตจที่ sleeve

การทดลองทำโดยการต่อวงจรทางไฟฟ้าดังรูปที่ 14 สำหรับการทดลองนี้ทำที่ความดัน 8.0×10^{-5} mbar , emission current 37 mA , ion beam energy 500 eV โดยที่ $V_{\text{cup}} = 0$ V ปรับโวลเตจที่ sleeve เมื่อ V_{sleeve} มีค่าเป็น 0 , 200 และ 400 V แล้วทำการวัดกระแสที่ cup และ sleeve electrode ในขณะที่ทำการ scan cup ผ่าน beam ตามแนวแกน y ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 15

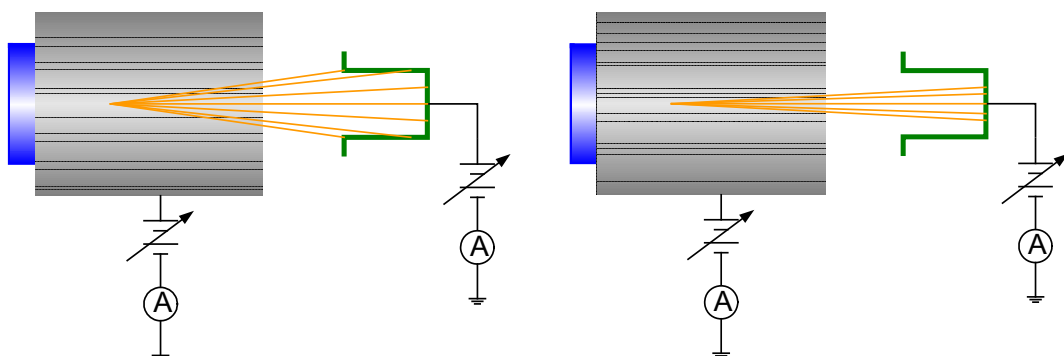


รูปที่ 15 ผลการวัดกระแสที่ Faraday cup และ sleeve electrode ของลำไอออนที่เคลื่อนออกมาจากแหล่งกำเนิดด้วยพลังงาน 500 eV โดย scan Faraday cup ตามแนวแกน y เมื่อ $V_{\text{sleeve}} = 0$, 200 และ 400 V

จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อ scan Faraday cup ผ่านลำไอออนจะมีอยู่ช่วงหนึ่งที่วัดค่ากระแสไอออนได้สูงสุด และ เมื่อ cup เริ่มพ้นลำไอออนกระแสที่ cup วัดได้ก็จะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังเห็นได้อีกว่า กระแสไอออนสูงสุดที่วัดได้ที่ cup (*) จะมีค่าน้อยลงเมื่อ V_{sleeve} มีค่ามากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม กระแสอิเล็กตรอนที่วัดได้ที่ sleeve (+) กลับมีค่ามากขึ้น และ ความกว้างของเส้นกราฟของค่ากระแสที่ cup จะมีความกว้างมากขึ้นเมื่อ V_{sleeve} มีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน

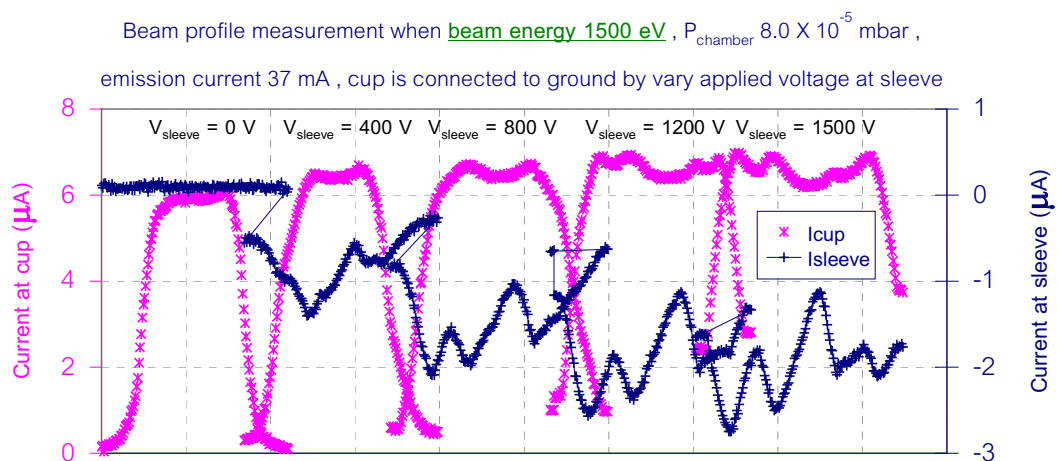
ทั้งนี้อธิบายได้ว่า เมื่อ V_{sleeve} มีค่าเป็นบวกมากขึ้น ส่งผลทำให้ ไอออนบางตัวภายในลำไอออน (อนุภาคที่อยู่ภายในลำไอออนลำเดียวกัน จะมีระดับพลังงานที่ไม่เท่ากันทุกตัว เนื่องจากผลของ energy spread) ไม่สามารถผ่านออกมาได้เนื่องจากมีพลังงานไม่พอที่จะวิ่งผ่านระดับโวลเตจที่มีค่าสูงเกินพลังงานที่มีอยู่ จึงทำให้กระแสไอออนที่วัดได้ที่ cup มีค่าน้อยลงเมื่อ V_{sleeve} มากขึ้น และ เมื่อ V_{sleeve} มีค่าเป็นบวกมากขึ้นยังทำให้มีอิเล็กตรอนวิ่งเข้าหา sleeve ได้ง่ายขึ้นด้วย จึงทำให้ กระแสอิเล็กตรอนที่ sleeve มีค่ามากขึ้น

นอกจากนี้ความกว้างของเส้นกราฟ (ขนาดความยาวของลูกศรสีเขียวในรูปที่ 15) ยังแสดงถึงขนาดของลำไอออนที่วิ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดและช่วงเวลาที่ลำไอออนวิ่งเข้าชน cup ซึ่งจากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าลำไอออนจะมีขนาดเล็กเมื่อ V_{sleeve} มีค่ามากขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเกิดเนื่องจาก ถ้าทำการ scan Faraday cup ตามแนวแกน y ผ่านลำไอออนที่มีขนาดใหญ่ แล้วเลื่อน cup ให้มาอยู่ตรงตำแหน่งที่สามารถวัดไอออนได้สูงสุด ถ้าเลื่อน cup ขึ้นหรือลงเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้มีลำไอออนบางส่วนพ้นออกจาก cup ได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้กระแสที่วัดได้มีค่าน้อยลงอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเป็นลำไอออนที่มีขนาดเล็ก ก็จะต้องใช้ช่วงเวลาในการเลื่อน cup มากขึ้น จึงจะทำให้ ลำไอออนบางส่วนนั้นพ้นออกจาก cup ได้ กระแสไอออนสูงสุดที่วัดได้ จึงมีช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าในกรณีของลำไอออนขนาดใหญ่ดังแสดงด้วยความยาวของเส้นลูกศรสีเขียว ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ง่ายด้วยรูป 2 รูปนี้



รูปที่ 16 (a) เมื่อ Faraday cup เคลื่อนที่ผ่านลำไอออนขนาดใหญ่
(b) เมื่อ Faraday cup เคลื่อนที่ผ่านลำไอออนขนาดเล็ก

เมื่อเพิ่ม beam energy จากเดิม 500 eV เป็น 1500 eV ได้ผลการวัดเป็นดังรูปที่ 17 และ เมื่อเปรียบเทียบกราฟรูปที่ 17 กับ รูปที่ 15 พบว่า เมื่อ beam energy มีค่าเพิ่มขึ้นกระแสไอออนที่ Faraday cup วัดได้ มีค่ามากขึ้นด้วย แต่ในขณะเดียวกันกระแสอิเล็กตรอนที่วัดได้ที่ sleeve ก็มีค่ามากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เมื่อไอออนที่มีระดับพลังงานสูงวิ่งเข้าชนกับ Faraday cup ส่งผลทำให้มี secondary electrons เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าในกรณีที่มีไอออนระดับพลังงานต่ำวิ่งเข้าชน



รูปที่ 17 ผลการวัดกระแสที่ Faraday cup และ sleeve electrode ของลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดด้วยพลังงาน 1500 eV โดย scan Faraday cup ตามแนวแกน y เมื่อ $V_{\text{sleeve}} = 0, 400, 800, 1200, 1800$ V

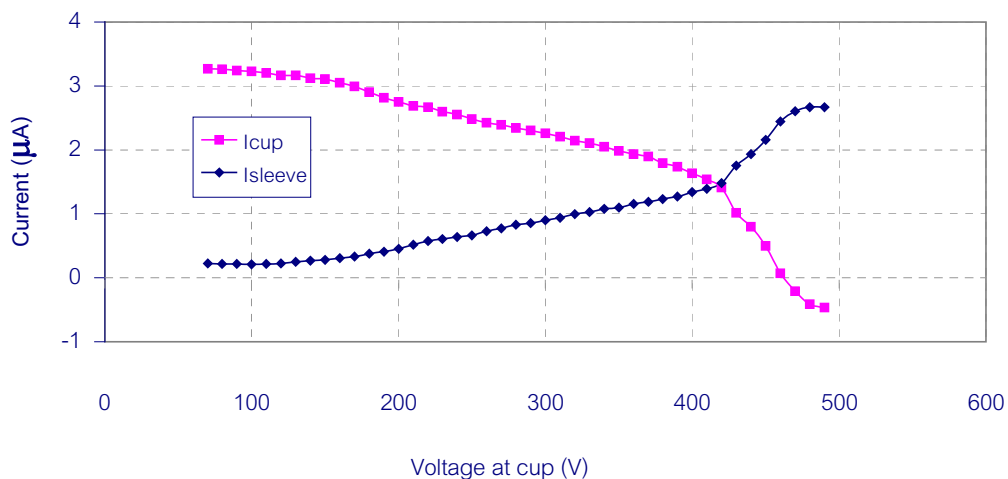
จากกราฟรูปที่ 17 เห็นได้อีกอย่างหนึ่งว่าค่ากระแสไอออนสูงสุดที่วัดได้ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ V_{sleeve} มีค่าเพิ่มขึ้นแทนที่จะลดลงอย่างผลการทดลองในกราฟรูปที่ 15 ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก เมื่อไอออนที่มีพลังงานสูงวิ่งเข้าชนกับ Open Faraday cup ซึ่งทำจากแผ่นโลหะ จะทำให้มี secondary electron เกิดขึ้นได้ง่ายและจำนวนมาก ตามที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น และ นอกจากนี้ยังที่ผลทำให้ electron บางตัวบนผิวโลหะได้รับพลังงานจากการวิ่งเข้าชนแล้วส่งผลทำให้ electron เกือบจะหลุดแต่ยังไม่หลุดออกมาจากผิวโลหะ แต่ถ้ามีการกระตุ้นเพียงเล็กน้อย electron เหล่านั้นก็จะหลุดออกมาได้ แรงกระตุ้นดังกล่าวที่มีอยู่ในระบบ คือ สนามไฟฟ้าระหว่าง sleeve electrode กับ cup ดังนั้น เมื่อ V_{sleeve} มีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดแรงกระทำทางไฟฟ้าต่อ secondary electrons มากขึ้น secondary electrons ที่เกือบจะหลุดออกมาจากผิวโลหะอยู่แล้วสามารถหลุดออกมาจากผิวโลหะด้วยแรงดึงจากสนามไฟฟ้าของ sleeve electrode ได้ ผลคือทำให้มี secondary electron หลุดออกมามากขึ้น ส่งผลทำให้กระแสที่ Faraday cup (ion current + secondary electron current) มีค่ามากขึ้นแทนที่จะลดลงอย่างในกราฟรูปที่ 15

จากกราฟรูปที่ 15 และ รูปที่ 17 จะสังเกตเห็นได้ว่ากระแสที่วัดได้ที่ Faraday cup เมื่อ beam energy มีค่าเพิ่มขึ้นมี fluctuation เกิดขึ้น และกระแสที่วัดได้ที่ sleeve จะมี fluctuation ของ I_{sleeve} เพิ่มมากขึ้นเมื่อ beam energy เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นกราฟที่เกิด fluctuation มีลักษณะที่เหมือนกัน ทั้งนี้เกิดเนื่องจากผิวของ Faraday cup ที่ไม่เรียบจึงทำให้เกิด secondary electron ได้ไม่เท่ากันทุกตำแหน่ง

- การปรับโวลเตจที่ Faraday cup

การทดลองการปรับโวลเตจที่ Faraday cup มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาว่า เมื่อโวลเตจที่ Faraday cup เปลี่ยนไป จำนวนอนุภาคที่วัดได้ที่ Faraday cup และ sleeve จะเปลี่ยนไปอย่างไร การทดลองดังกล่าวทำโดยการต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 14 ทำการทดลองที่ความดัน 8.0×10^{-5} mbar , emission current 37 mA , beam energy 500 eV , $V_{\text{sleeve}} = 0$ V และ ทำการปรับโวลเตจที่ Faraday cup โดยที่ Faraday cup จะอยู่ในตำแหน่งที่สามารถวัดค่ากระแสไอออนได้สูงสุด โดยไม่ได้ทำการ scan Faraday cup ผลการทดลองเป็นดังกราฟรูปที่ 18

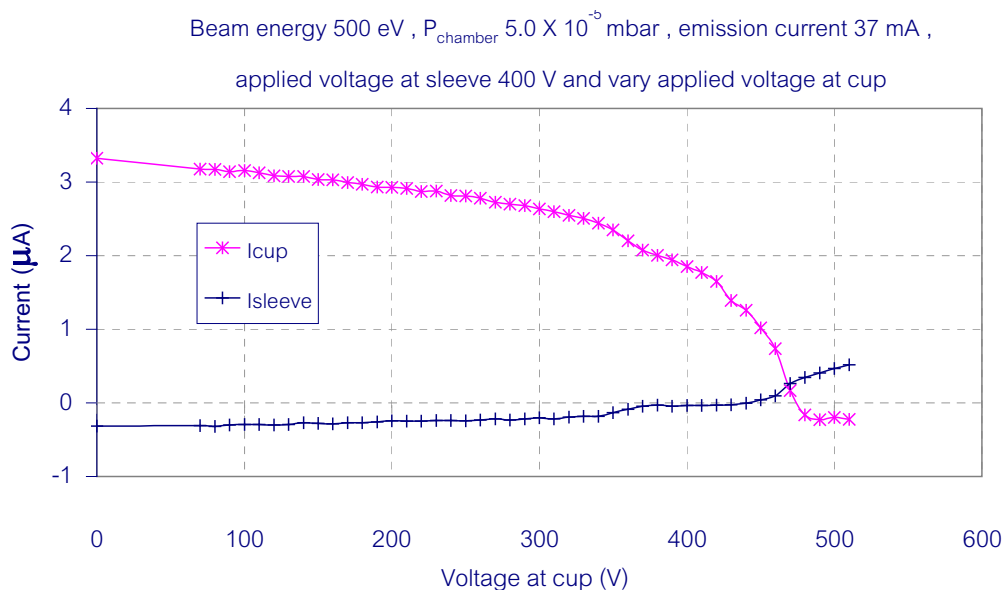
Beam energy 500 eV , $P_{\text{chamber}} 5.0 \times 10^{-5}$ mbar , emission current 37 mA and sleeve connected to ground and vary applied voltage at cup



รูปที่ 18 ผลการวัดกระแสที่ Faraday cup และ sleeve electrode ของลำไอออนที่เคลื่อนออกมาจากแหล่งกำเนิดด้วยระดับพลังงาน 500 eV โดยทำการปรับโวลเตจที่ป้อนให้กับ Faraday cup เมื่อ $V_{\text{sleeve}} = 0$ V

จากกราฟเห็นได้ว่า เมื่อ V_{cup} มีค่าเพิ่มมากขึ้น จำนวนไอออนที่เคลื่อนที่ไปถึง Faraday cup มีค่าน้อยลง ไอออนจะเคลื่อนที่ชนกับ sleeve มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโวลเตจที่ Faraday cup สูงกว่าที่ sleeve มากขึ้น จึงทำให้ไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าถึง cup ได้ กระแสที่วัดได้

ที่ cup จึงมีค่าลดลง แต่ไอออนจะเคลื่อนที่เข้าไปชนกับ sleeve แทน จึงทำให้ I_{sleeve} มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อมีไอออนชนที่ sleeve มากขึ้น ส่งผลทำให้โอกาสการเกิด secondary electrons จากการที่มีไอออนเข้าชน sleeve electrode ประกอบกับ V_{cup} มีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ Faraday cup มีความสามารถในการเก็บ electrons ได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่ม V_{cup} มากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง กระแสที่ Faraday cup จึงมีค่าติดลบขึ้นมา (electron current) และถ้าให้ $V_{\text{sleeve}} = 400 \text{ V}$ จะได้ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 19



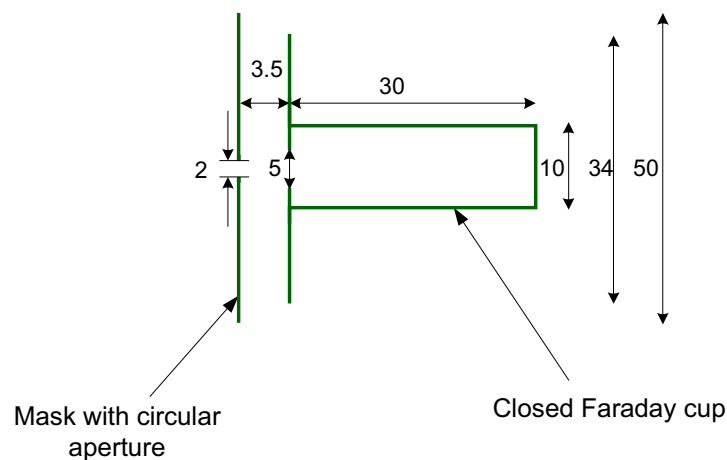
รูปที่ 19 ผลการวัดกระแสที่ Faraday cup และ sleeve electrode ของลำไอออนที่เคลื่อนออกมาจากแหล่งกำเนิดด้วยระดับพลังงาน 500 eV โดยทำการปรับโวลเตจที่ป้อนให้กับ Faraday cup เมื่อ $V_{\text{sleeve}} = 400 \text{ V}$

เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 18 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่ม V_{sleeve} มีค่า 400 V จะทำให้ไอออนวิ่งเข้าชนกับ sleeve มีค่าน้อยลงกระแสที่วัดได้ sleeve จึงมีค่าเป็นบวกน้อยกว่าในกรณีที่ $V_{\text{sleeve}} = 0 \text{ V}$ เมื่อ V_{cup} มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากไอออนต้องสูญเสียพลังงานบางส่วนไปกับการที่ต้องวิ่งผ่าน sleeve ที่มีระดับโวลเตจที่สูงขึ้นจากเดิม ซึ่งส่งผลทำให้มี secondary electrons ที่เกิดจากการชนของไอออนกับ sleeve น้อยลง ประกอบกับ ความสามารถในการเก็บอิเล็กตรอนของ Faraday cup ที่น้อยลงด้วยเนื่องจากระดับโวลเตจของ V_{sleeve} ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กระแสที่วัดได้ที่ Faraday cup ติดลบน้อยกว่าในกรณีที่ $V_{\text{sleeve}} = 0 \text{ V}$ เมื่อ V_{cup} มีค่าเกิน beam energy

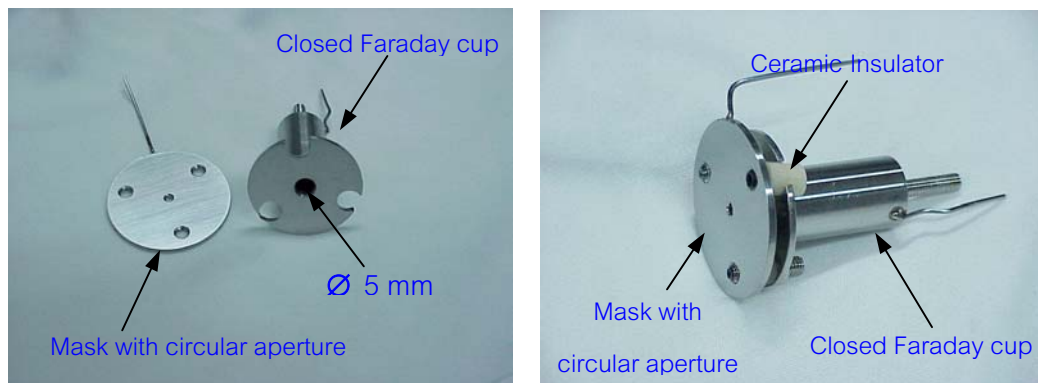
จากผลการทดลองทั้งกรณีที่ทำกรการปรับโวลเตจที่ *sleeve* และ ที่ *Faraday cup* สรุปได้ว่า *secondary electrons* เกิดขึ้นจากไอออนวิ่งชนกับแผ่นโลหะใด ๆ ซึ่งมีค่า *work function* $\cong 5$ eV ที่อยู่ภายในระบบ (ซึ่งอาจเป็น *sleeve* หรือ *Faraday cup* หรือ แผ่นโลหะอื่น ๆ ที่มีอยู่ในระบบ) จะเกิดมากหรือน้อยขึ้นกับ *beam energy* อัตราการชน และ จำนวนของไอออนที่วิ่งเข้าชนกับวัสดุ

เนื่องจาก *Faraday cup* ที่ใช้ในการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่ามีขนาดปากที่เปิดกว้าง เป็นผลทำให้เมื่อไอออนวิ่งเข้าชนจะทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาและวิ่งออกจาก *cup* ได้ง่าย เมื่อมีอิเล็กตรอนหลุดออกจาก *Faraday cup* จะทำให้ผลการวัดค่ากระแสไอออนมีความผิดพลาด ซึ่งทำให้ค่ากระแสไอออนที่วัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง จากคำแนะนำของ ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ (ที่ปรึกษาโครงการ) รวมทั้งจากผลการทดลองที่ผ่านมา เราสามารถลดจำนวน *secondary electron* ดังกล่าว ได้โดยการลดขนาดความกว้างของปาก *Faraday cup* ให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งขอเรียก *Faraday cup* แบบนี้ว่า *Closed Faraday cup* เพื่อป้องกันไม่ให้ *electron* ที่หลุดออกจาก *Faraday cup* วิ่งออกมาได้หรือถ้าออกมาได้ก็จะมีจำนวนที่น้อยลง ระบบการวัดและ *Faraday cup* ที่ทำการออกแบบใหม่แสดงดังรูปที่ 20 และ 21

Unit in mm.



รูปที่ 20 ลักษณะของ Ion detector แบบใหม่ที่คาดว่าจะลดจำนวนของ *secondary electrons* ที่เคลื่อนออกจาก *Faraday cup* ได้ ซึ่งประกอบด้วย *mask with circular aperture* และ *closed Faraday cup*

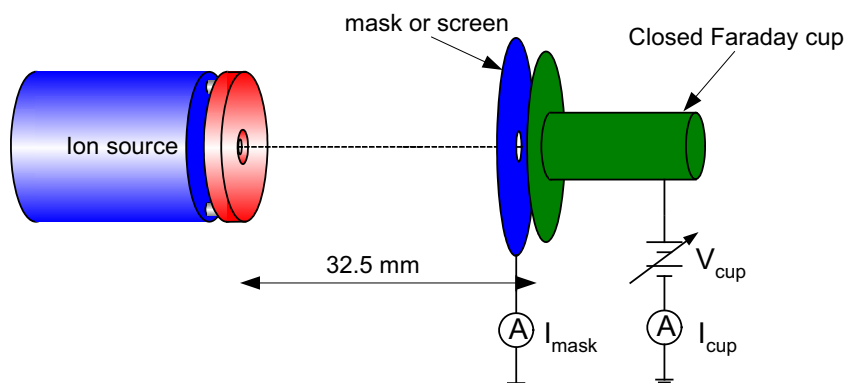


รูปที่ 21 (a) mask with circular aperture กับ closed Faraday cup

(b) เมื่อนำ mask with circular aperture กับ closed Faraday cup มาประกอบเข้าด้วยกัน

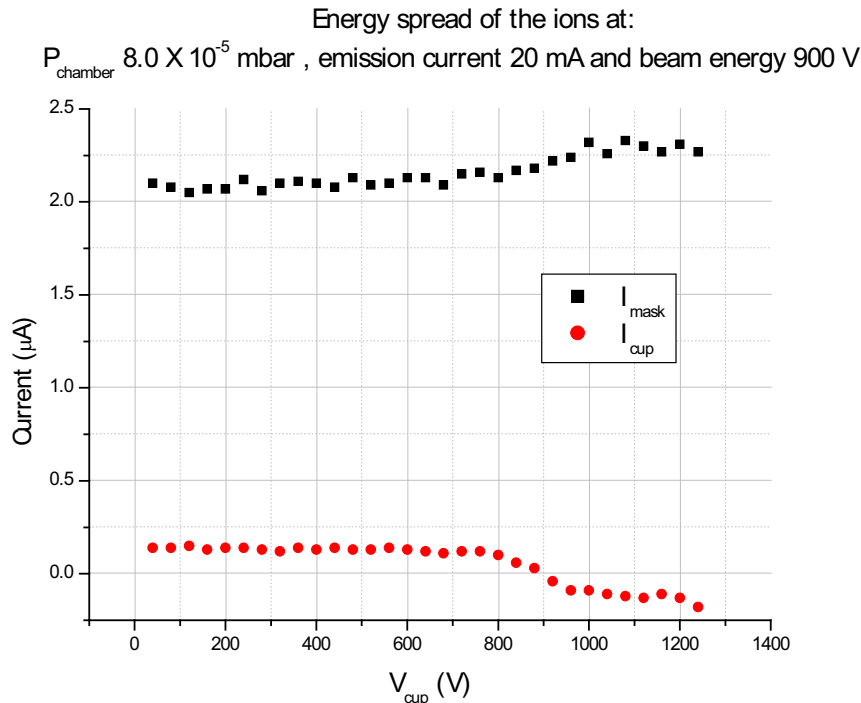
จากระบบการวัดไอออนที่ออกแบบใหม่เห็นได้ว่า ปากทางเข้าของไอออนไปสู่ Faraday cup มีความกว้างเหลือเพียง 5 mm ซึ่งจากเดิมปากของ Faraday cup กว้างถึง 20 mm โดยการลดขนาดปากทางเข้าของ Faraday cup ลง จะส่งผลทำให้ secondary electrons ที่หลุดออกมาจาก cup เคลื่อนที่ออกจาก cup ได้น้อยลง นอกจากนี้ระบบการวัดยังมีชิ้นงานที่เรียกว่า mask with circular aperture ด้วย mask with circular aperture นี้ circular aperture มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 2 mm มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ไอออนที่วิ่งเข้ามาระบบการวัดวิ่งชนบริเวณส่วนหน้าของ Faraday cup โดยขนาดของ mask จะต้องมีความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะมากกว่าความกว้างของส่วนโลหะที่เชื่อมอยู่กับ Faraday cup

การทดสอบการวัดไอออนโดยใช้ระบบการวัดแบบ closed Faraday cup ทดลองที่ความดัน $P_{\text{chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar , emission current 20 mA และ beam energy 900 eV ปรับโวลเตจที่ cup ให้มีค่ามากขึ้น Faraday cup อยู่ในตำแหน่งที่สามารถวัดไอออนได้สูงสุด การต่อวงจรทางไฟฟ้าแสดงดังไดอะแกรมรูปที่ 22



รูปที่ 22 การต่อวงจรทางไฟฟ้าให้กับ Closed Faraday cup เพื่อทำการวัดขนาดลำไอออน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่วัดได้จาก mask และ Faraday cup กับ การเปลี่ยนแปลงโวลเตจที่ Faraday cup (V_{cup}) แสดงดังกราฟรูปที่ 23



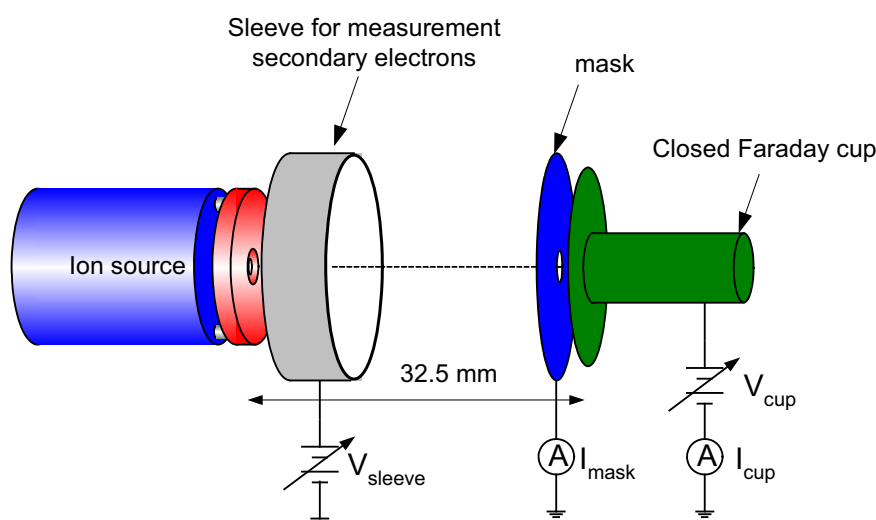
รูปที่ 23 ผลการวัดกระแสของลำไอออนด้วย closed Faraday cup ในรูปที่ 22

จากกราฟรูปที่ 23 พบว่า เมื่อ V_{cup} มีค่าเพิ่มจนใกล้เคียงกับ beam energy จำนวนไอออนที่จะเคลื่อนเข้าไปถึง Faraday cup เริ่มมีค่าน้อยลง แต่ในทางตรงกันข้ามกลับมีไอออนชนที่ mask มากขึ้นและเมื่อ V_{cup} มีค่าเกิน beam energy พบว่ากระแสที่ mask จะมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น แต่ กระแสที่ Faraday cup จะมีค่าติดลบมากขึ้น และ เมื่อเพิ่ม V_{cup} ขึ้นอีก กระแสที่วัดได้ที่ mask ก็จะมีค่าคงที่ แต่ กระแสที่ Faraday cup ยังคงมีแนวโน้มที่ยังคงติดลบมากขึ้น

ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ในขณะที่โวลเตจที่ Faraday cup ยังคงมีค่าต่ำกว่า beam energy มาก ๆ ไอออนทั้งหมดก็ยังคงวิ่งผ่านเข้าไปถึง Faraday cup ได้ โดยยังคงมีจำนวนไอออนวิ่งเข้าชน mask ในปริมาณเท่าเดิม แต่เมื่อ V_{cup} เพิ่มขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้ beam energy ของ ไอออน ก็จะมีเพียงไอออนที่มีพลังงานสูงกว่าค่า V_{cup} เท่านั้นที่สามารถวิ่งผ่านมาถึง Faraday cup ได้ จึงทำให้วัดค่าของกระแสไอออนได้น้อยลง (อนุภาคในลำไอออนเดียวกันไม่จำเป็นต้องมีค่าพลังงานเท่ากันทุกตัว ค่าที่ระบุถึง beam energy นั้น เป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น) สำหรับไอออนที่มีพลังงานน้อยจะถูกผลักให้เบี่ยงเบน จึงทำให้เข้าชนกับ mask ทำให้ค่ากระแสไอออนที่ mask สูงขึ้น แต่ถ้า V_{cup} ยังคงสูงขึ้นจนมีค่ามากกว่า beam energy ของไอออนทุกตัวแล้ว ก็จะไม่มีการวัดค่าไอออนตัวใดวิ่งเข้าชน Faraday cup ได้เลย แต่ในขณะเดียวกัน ไอออนที่เคยวิ่งเข้าหา Faraday cup ได้ ก็จะวิ่งเข้าไปที่ mask แทน จึงทำให้วัดกระแสที่ mask

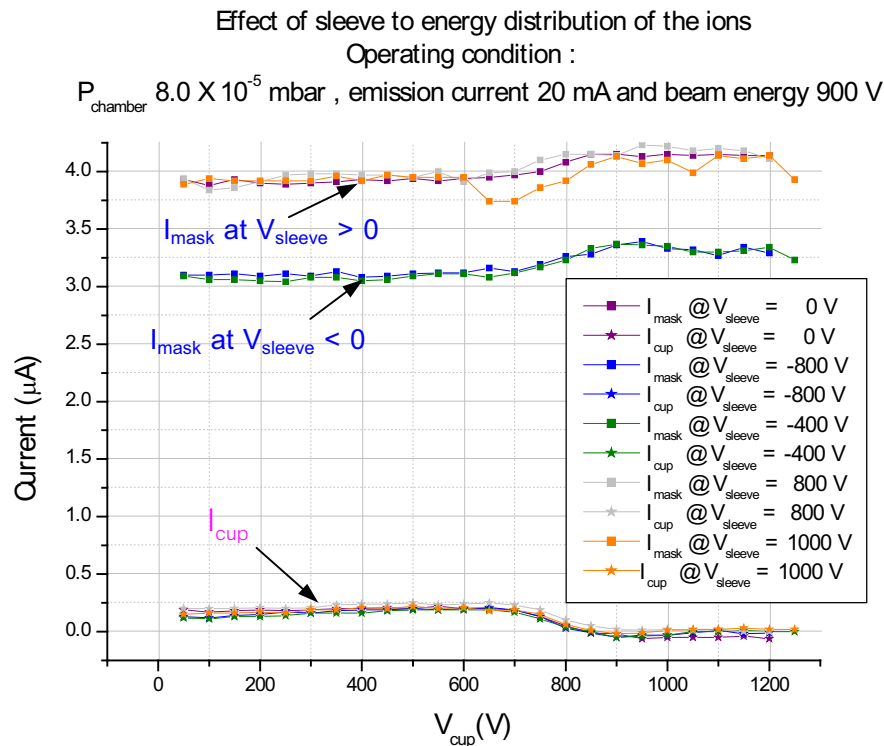
ได้สูงขึ้นอีก แต่ถ้าเพิ่ม V_{cup} ขึ้นอีก ค่ากระแสของ mask ก็จะไม่คงที่เนื่องจากปริมาณไอออนที่วิ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออนทั้งหมดวิ่งเข้าชน mask ทั้งหมดแล้ว แต่ในขณะที่กระแสที่ cup กลับมีค่าลดลงมากขึ้น (วัดจำนวนอิเล็กตรอนได้มากขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่ไอออนวิ่งเข้าชน mask ส่งผลทำให้เกิด secondary electron ด้วย เมื่อโวลเตจที่ Faraday cup มีค่าเป็นบวกมากขึ้นก็จะสามารถดึงอิเล็กตรอนเข้าชนกับผิวของ cup ได้มากขึ้นด้วย จึงทำให้กระแสที่ Faraday cup ลดลงมากขึ้นเมื่อ V_{cup} มีค่าสูงขึ้น

เพื่อเป็นการยืนยันว่าอิเล็กตรอนที่ Faraday cup วัดได้นั้นเกิดขึ้นจากการชนของไอออนที่ mask จริง จึงได้ทำการออกแบบระบบการวัด secondary electron ดังไดอะแกรมรูปที่ 24 จากรูปจะเห็นว่ามีเพียง sleeve ที่เพิ่มเข้าไปจากเดิม (ดังรูปที่ 22) โดย sleeve จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 55 mm มีความยาวเพียง 10 mm วางห่างจากปาก ion source 2 mm ทำจาก stainless steel มีหน้าที่ในการเก็บ secondary electron ที่เกิดจากไอออนวิ่งเข้าชนกับ mask



รูปที่ 24 Secondary electron measurement with small sleeve

การทดลองนี้ทดลองที่ความดัน 8.0×10^{-5} mbar , emission current 20 mA , beam energy 900 eV ต่อวงจรไฟฟ้างดรูปที่ 24 และทำการปรับโวลเตจที่ Faraday cup ที่ค่า V_{sleeve} ค่าต่าง ๆ ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 ผลการวัดกระแสของลำไอออนที่ได้จากไดอะแกรมในรูปที่ 24

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ถ้า $V_{\text{sleeve}} = 0$ V พบว่า เมื่อ V_{cup} มีค่ามากกว่า beam energy I_{cup} จะมีค่าติดลบมากกว่าในกรณีอื่น ๆ แต่ถ้า V_{sleeve} มีค่าเป็นบวก เมื่อ V_{cup} มีค่ามากกว่า beam energy แล้ว I_{cup} จะมีค่าเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับ กรณีที่ V_{sleeve} มีค่าติดลบ จะได้ I_{mask} มีค่าน้อยกว่า I_{mask} เมื่อ V_{sleeve} มีค่าเป็นศูนย์และบวก สาเหตุดังกล่าวสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา โดยถ้า V_{sleeve} มีค่าเป็นศูนย์และบวกนั้น ไอออนที่วิ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดจะวิ่งผ่านออกมายัง detector ซึ่งจะชนกับ mask และบางส่วนก็จะเข้าไปยังใน cup ได้ แต่เมื่อ V_{cup} มีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ จนเกิน beam energy มากแล้ว ก็จะไม่ไอออนตัวใดที่สามารถวิ่งเข้าไปยัง cup ได้ ไอออนทั้งหมดก็น่าจะชนกับ mask ทั้งหมด จึงทำให้เมื่อ V_{cup} มีค่ามากกว่า beam energy I_{mask} จึงมีค่าสูงขึ้น สำหรับสาเหตุที่ I_{cup} ไม่มีค่าติดลบ เหมือนกับกรณีของกราฟในรูปที่ 23 เกิดจาก electron ที่เกิดขึ้นจากการชนของไอออนบริเวณผิวหน้าของ mask วิ่งเข้าหา sleeve แทนที่จะวิ่งเข้า cup เหมือนดังกรณีที่ผ่านมา เนื่องจากเมื่อ electron หลุดออกมาจาก mask มีทิศทางที่จะเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน $-z$ ประกอบกับ $V_{\text{sleeve}} > 0$ จึงง่ายต่อการที่ electron ดังกล่าวจะวิ่งเข้าไปสะสมที่ sleeve

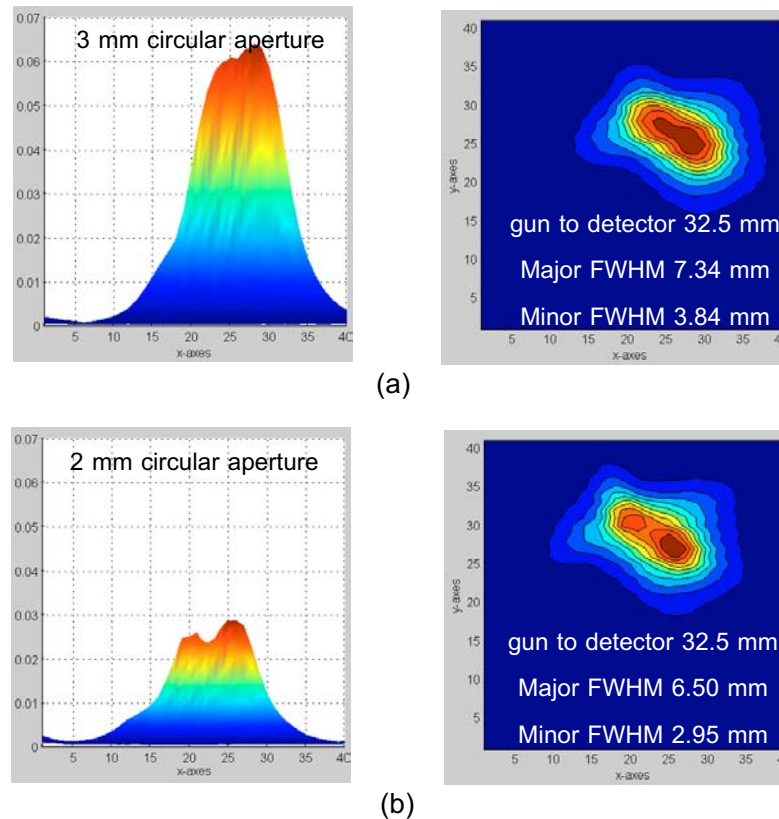
สำหรับกรณีที่ V_{sleeve} มีค่าติดลบพบว่า I_{mask} จะมีค่าต่ำกว่ากรณีอื่น ๆ นั้น เกิดจากเมื่อ sleeve มีค่าติดลบก็จะทำให้ไอออนบางส่วนที่วิ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดวิ่งเข้าหา sleeve ส่วนหนึ่งจึงทำให้ไอออนวิ่งไปถึง detector ได้น้อยลง จะเห็นได้ว่าไอออนที่ cup มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเมื่อ V_{sleeve} ที่มีค่าเป็นบวก

จากการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อมีการชนของไอออนกับแผ่นโลหะ จะทำให้เกิด secondary electron ขึ้นเนื่องจากการชนนั้น สำหรับระบบที่ ion detector เป็น แบบ closed Faraday cup อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นเนื่องจากการชนกับ mask และเชื่อได้ว่า secondary electron ที่เกิดจากไอออนชนผนังภายในของ closed Faraday cup จะไม่สามารถหลุดออกจาก cup ได้ ทำให้ระบบการวัดปริมาณไอออนได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

1.4 การศึกษาขนาดของ circular aperture on mask ที่มีต่อการวัดขนาดลำไอออน

เนื่องจากการลด secondary electron ที่เกิดขึ้นเนื่องจากลำไอออนวิ่งเข้าชน Faraday cup จึงจำเป็นต้องมี mask หรือ screen มาปิดหน้า Faraday cup ไว้ ดังแสดงดังรูปที่ 20 และเพื่อที่จะทำให้ไอออนวิ่งผ่านเข้าไปยัง Faraday cup ได้ จึงต้องทำการเจาะรูไว้บนแผ่น mask โดยขนาดรูที่การเจาะนี้จะเป็นตัวกำหนด resolution ของ Faraday cup

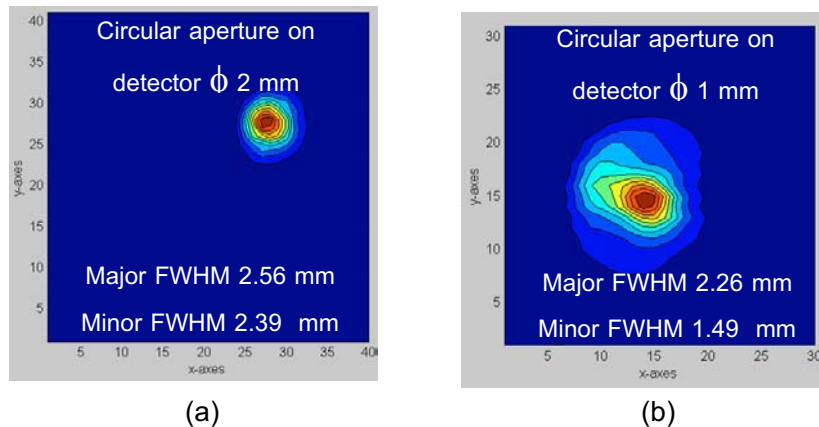
จากการทดลองพบว่าขนาดของ circular aperture บน mask มีผลต่อการวัดขนาดไอออนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะถ้าเกิดกรณีที่ลำไอออนนั้นมีขนาดเล็กกว่า circular aperture มากๆ อย่างในกรณีที่ทำการวัดขนาดลำไอออนที่มี beam energy 1000 eV ด้วยเงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด เพียงแต่ circular aperture บน mask มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm และ 2 mm จะได้ผลการวัดเป็นไปดังรูปที่ 26 (a) และ (b)



รูปที่ 26 (a) ผลการวัดลำไอออนด้วย circular aperture $\varnothing$ 3 mm
 (b) ผลการวัดลำไอออนด้วย circular aperture $\varnothing$ 2 mm

จากผลการทดลองในรูปที่ 26 เห็นได้ว่าผลการวัดลำไอออนด้วย circular aperture ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน จะทำให้ได้ขนาดและความละเอียดของลำไอออนที่แตกต่างกัน โดยถ้าใช้ circular aperture $\varnothing$ 2 mm จะได้รายละเอียดของลำไอออนที่ดีกว่า และขนาดลำไอออนที่วัดได้มีขนาดเล็กลงด้วย (ระบบวัดมี Resolution สูงขึ้น)

ในการเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ aperture บนแผ่น mask นั้น มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะเมื่อทำการวัดขนาด และ profile ของลำไอออนที่เคลื่อนผ่านระบบการโฟกัส โดยถ้าเราเลือกใช้ ขนาด ϕ ของ aperture ที่ใหญ่เกินขนาดของลำไอออน จะได้ผลเป็นดังรูปที่ 27 (a) แต่เมื่อลดขนาด ϕ ของ aperture ที่ใช้ลงเหลือ 1 mm ดังรูป 27 (b) ก็จะพบว่า ขนาดและรูปร่างของลำไอออนนั้นไม่ใหญ่และไม่กลมเท่ากับที่วัดได้จากรูป 27 (a)

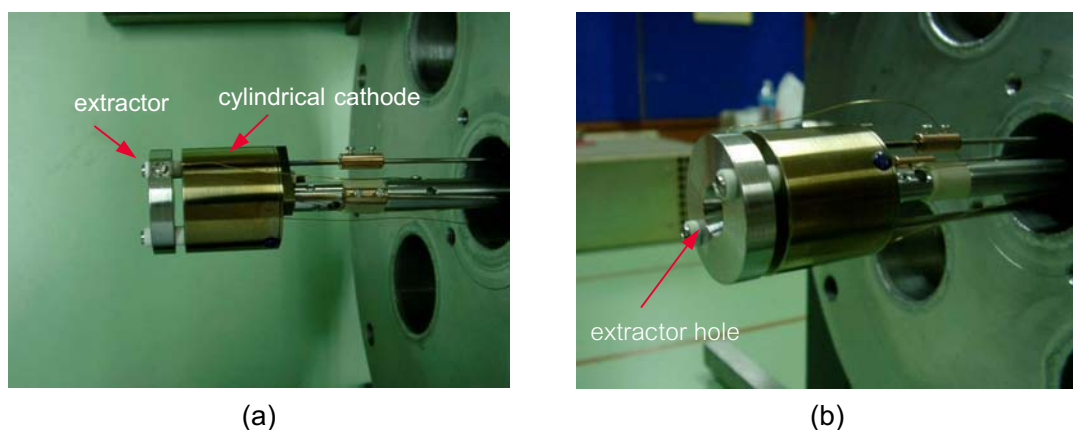


รูปที่ 27 ผลของการวัดขนาดของลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านออกมาจากระบบการโฟกัส เมื่อเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ circular aperture on mask ต่างกัน
 (a) circular aperture on mask ϕ 2 mm
 (b) circular aperture on mask ϕ 1 mm

2. Ion Source Characterizations

การดำเนินงานวิจัยในระยะ Phase 1B ที่ผ่านมา ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดไอออนนี้ ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติเบื้องต้นของลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออน เนื่องจากคุณสมบัติเบื้องต้น อย่างเช่น beam profile , beam width , beam divergence และ energy spread ของลำไอออนที่อยู่ภายในลำนั้นเป็นข้อมูลสำคัญต่อการพัฒนาและออกแบบ focusing system จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาและวัดก่อนที่จะนำลำไอออนไปใช้งานต่อไป นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบของโวลเตจที่ป้อนให้กับ sleeve , exit hole และ emission current ว่ามีผลต่ออนุภาคภายในลำไอออนอย่างไร

แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้ในงานวิจัยในช่วง Phase 1B เป็นแหล่งกำเนิดไอออนของบริษัท LK Technology Model NGI3000 ออกแบบไว้เพื่อการทำความสะดวกผิวหน้าของพื้นผิวด้วยวิธี ion sputtering ลักษณะของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 28

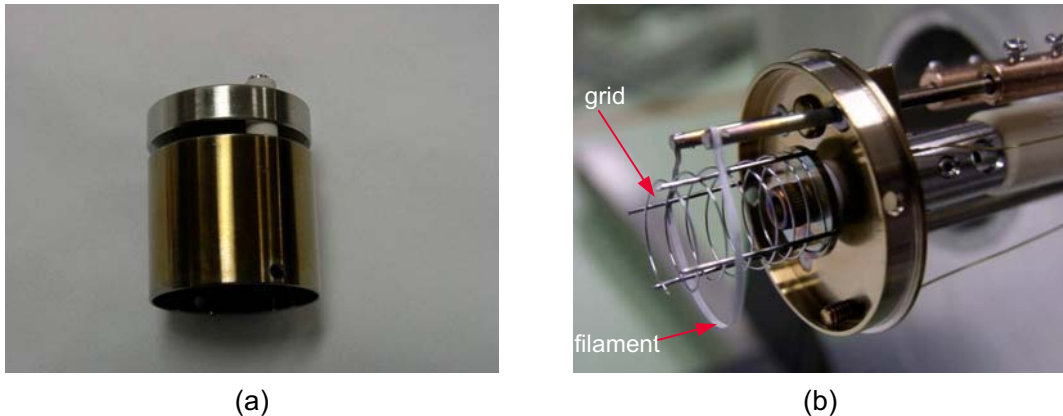


รูปที่ 28 โครงสร้างภายนอกของ NGI 3000 ion gun

(a) รูปร่างของ ion gun ทางด้านข้าง

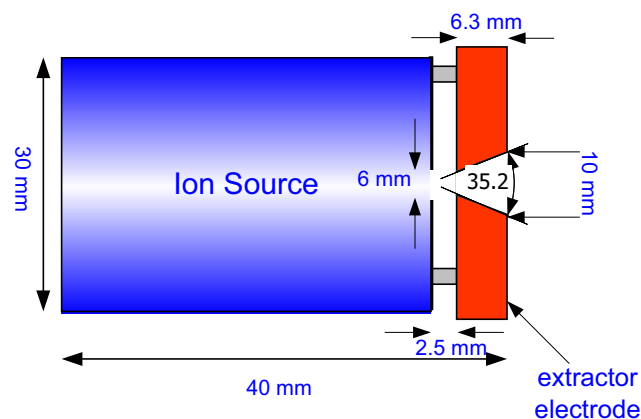
(b) รูปร่างของ ion gun ทางด้านหน้า

เมื่อทำการถอดส่วนที่เป็น extractor กับ cylindrical cathode ออก จะเห็นว่าภายในของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้มี filament ซึ่งทำจาก thoriated iridium มีความต้านทาน 0.3Ω สามารถถอดเปลี่ยนได้ และ grid ซึ่งมีลักษณะเป็นเกลียว ทำหน้าที่คอยกักเก็บอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น ลักษณะของ filament และ grid แสดงดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 ส่วนประกอบภายในของ NGI 3000 ion gun
 (a) ส่วนของ cylindrical cathode และ extractor ซึ่งถอดออกมาจากรูปที่ 28
 (b) ส่วนประกอบภายในของ ion gun ซึ่งประกอบด้วย thoriated iridium filament และ grid โดยกระแสที่ป้อนให้กับ filament มีขนาด 5 A

ส่วนที่เป็น extractor เป็นแผ่นโลหะวงกลมความหนา 6.3 mm และเจาะรูตรงกลางเป็นรูปกรวยมีขนาดดังแสดงดังรูปที่ 30



รูปที่ 30 ลักษณะและขนาดของ extractor electrode ของ NGI300 ion source

NGI 3000 ion gun จะทำงานเมื่อมีการป้อนก๊าซ (argon gas) เข้าสู่ chamber โดยจะทำงานในช่วงความดัน 5.0×10^{-5} ถึง 5.0×10^{-4} mbar อัตราการเกิดพลาสมาภายใน chamber ของแหล่งกำเนิดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่า emission current สำหรับจำนวนไอออนที่ดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่าง cylindrical cathode electrode กับ extractor electrode (ground electrode) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดระดับพลังงานของอนุภาคที่ดึงออกมาจากแหล่งกำเนิดด้วย

งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติของไอออนที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดไอออน (NGI 3000 ion source) ที่ได้ทำการศึกษาและวัดในช่วง Phase 1B มีดังนี้

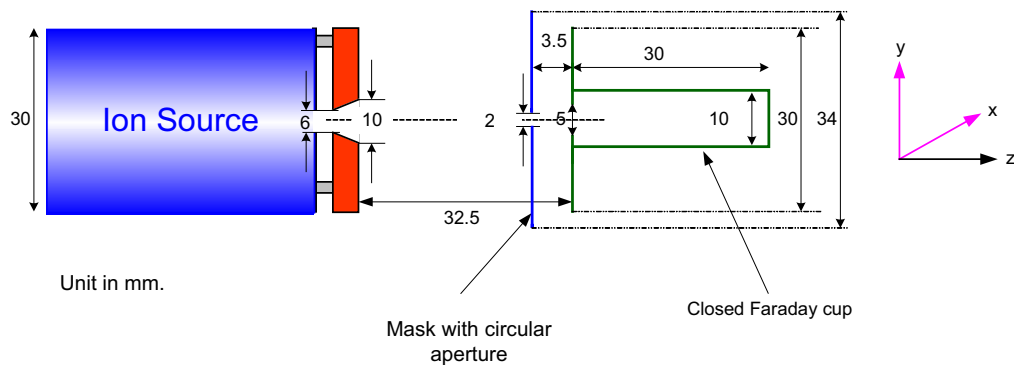
- 2.1 Beam Width Measurement
- 2.2 Beam Divergence Measurement
- 2.3 Energy Spread Measurement
- 2.4 Sleeve Effect to Ion Beam
- 2.5 Exit Hole Effect to Ion Beam
- 2.6 Emission Current Effect to Beam width and Beam Energy Spread

2.1 Beam Width Measurement

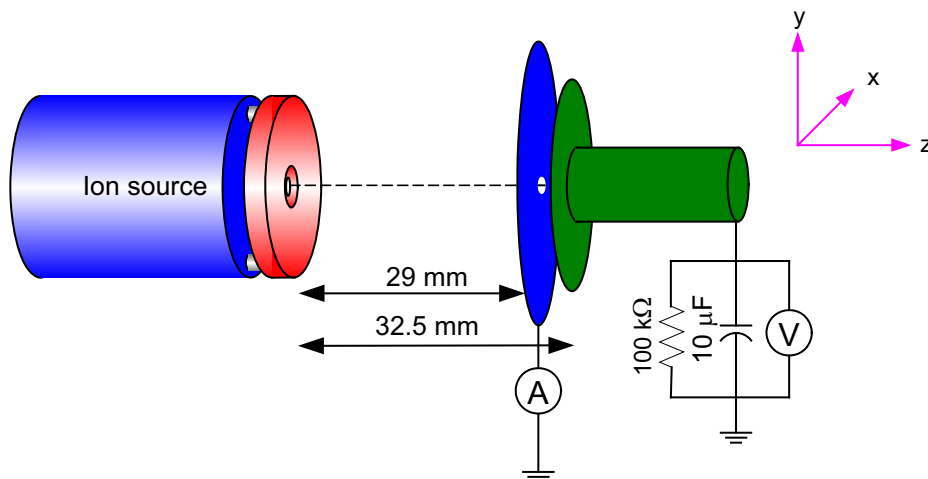
การวัด beam width ของลำไอออนมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาว่าเมื่อ beam energy (extraction voltage) ของแหล่งกำเนิดไอออนเปลี่ยนไปจะมีผลอย่างไรต่อ beam profile และขนาดของลำไอออน

การวัด beam width ของลำไอออนทำโดยจัดระบบดังไดอะแกรมรูปที่ 31 และต่อวงจรทางไฟฟ้าให้กับระบบการวัดแสดงดังรูปที่ 32 mask ที่ใช้ในการทดลองนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ circular aperture 2 mm ตำแหน่งของ Faraday cup จะอยู่ห่างจากปาก extractor 32.5 mm ($z = 32.5$) โดยทำการ scan ลำไอออนบนระนาบ xy (mask และ Faraday cup จะเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน x และ y) แล้ว ค่ากระแสไอออนที่วัดได้โดย Faraday cup จะถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาใช้ในการวัด beam width เป็นดังนี้

- circular aperture บน mask $\varnothing$ 2 mm
- $P_{\text{main chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar (ความดันภายใน ion source สูงกว่านี้ประมาณ 10 เท่า)
- emission current of ion gun 20 mA
- scan step 0.5 mm (มอเตอร์เคลื่อนที่ครั้งละ 0.5 mm ซึ่งกำหนดได้จากโปรแกรมที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์)
- scan area : $x = 0 - 20$ mm , $y = 0 - 20$ mm
- detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไอออน 32.5 mm
- beam energy 650 , 900 , 1000 , 1200 , 1400 และ 1700 eV



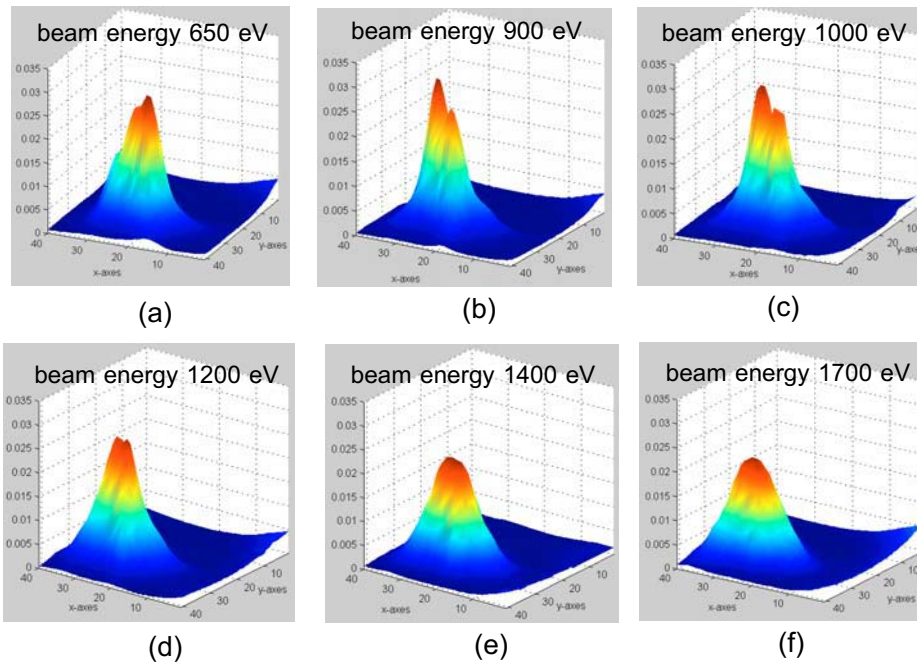
รูปที่ 31 ไดอะแกรมของระบบในการวัด beam width ของลำไอออนจากแหล่งกำเนิด



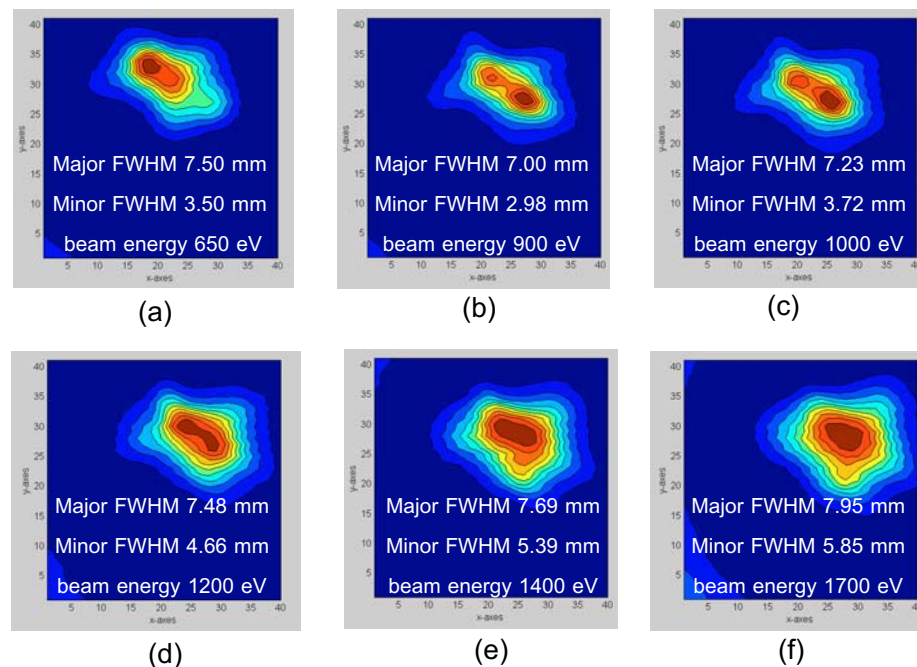
รูปที่ 32 การต่อวงจรทางไฟฟ้าให้กับระบบการวัด beam width ของลำไอออน

จากรูปที่ 32 เห็นได้ว่าการวัดค่ากระแสไอออน ทำโดยการวัดโวลเตจที่ตกคร่อมตัวต้านทานแทน สาเหตุที่ต้องทำการวัดด้วยวิธีนี้ เนื่องจากการวัดไอออนด้วย current meter โดยตรงนั้นพบว่าค่าของกระแสไอออนที่วัดนั้นมี fluctuation มาก เนื่องจากกระแสไอออนมีค่าต่ำมาก จึงต้องทำการวัดกระแสผ่านวงจร RC เพื่อลดอัตราการแกว่งของสัญญาณที่ได้

ผลการวัด beam width ที่ตำแหน่ง detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 mm ที่ค่า beam energy ต่าง ๆ มีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 33 และ 34



รูปที่ 33 Ion Current Profile เมื่อทำการวัด beam width ของลำไอออนที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 mm โดย scan detector เฉพาะบนระนาบ xy เมื่อ beam energy มีค่าเป็น 650 , 900 , 1000 , 1200 , 1400 และ 1700 eV ตามลำดับ



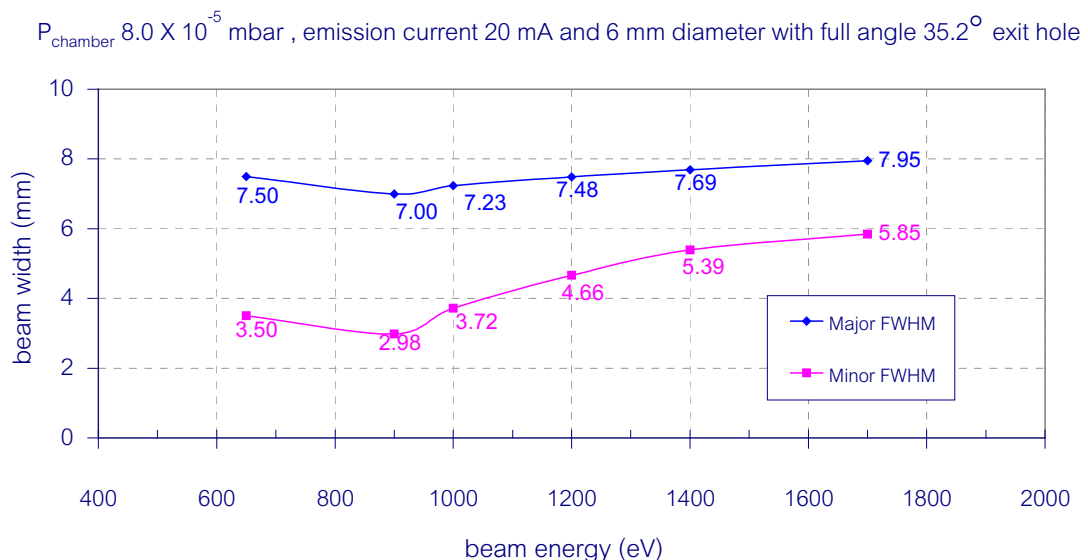
รูปที่ 34 Ion Current Contour เมื่อทำการวัด beam width ของลำไอออนที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 mm โดย scan detector เฉพาะบนระนาบ xy เมื่อ beam energy มีค่าเป็น 650 , 900 , 1000 , 1200 , 1400 และ 1700 eV ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 33 ระนาบ xy คือ scan area ซึ่งมีขนาด $20 \times 20 \text{ mm}^2$ ($40 \times 0.5 : \text{scale} \times \text{scan step}$) ส่วนแกนตั้งแสดงถึงขนาดของกระแส (unit in μA) โดยค่าของกระแสที่แท้จริงได้จากค่าที่แสดงบนแกนคูณด้วย 10 ($\text{Current } [\mu\text{A}] = \text{Voltage } [\text{V}] \times 10^6 \div 100 \text{ k}\Omega$) จากรูป พบว่า ค่ากระแสสูงสุดและรูปร่างของลำไอออนเปลี่ยนเมื่อ beam energy มีค่าเปลี่ยนไป โดยลำไอออนที่มีค่า beam energy ต่ำ ที่ยอดของลำจะแยกออกเป็นสองแฉก แต่เมื่อ beam energy มีค่าสูงขึ้นความเป็นแฉกนั้นก็จะหายไปแต่กลับได้ค่ากระแสไอออนสูงสุดน้อยลง และ beam มีขนาดใหญ่ขึ้น จากการหาพื้นที่ใต้กราฟ (จำนวนอนุภาคทั้งหมดบน scan area) เมื่อ beam energy มีค่ามากขึ้นจำนวนอนุภาคทั้งหมดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อมองภาพในรูปที่ 33 จากด้านบน ก็จะเห็นเป็นภาพดังรูปที่ 34 จากรูปนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าขนาดและรูปร่างของลำไอออนเปลี่ยนไปเมื่อ beam energy เปลี่ยนไป และถ้าสังเกตตามมุมขอบของภาพจะเห็นว่ามีการสูงขึ้นมาเล็กน้อย เกิดเนื่องจาก detector อยู่ในตำแหน่งที่ลำไอออนวิ่งเลย mask ไปแล้ววิ่งเข้าชนกับภายนอกทางด้านข้างของ Faraday cup ทำให้เกิดกระแสขึ้น ปรากฏการณ์นี้สามารถแก้ไขได้โดยขยายขนาดของ mask ให้ใหญ่ขึ้น

เมื่อนำขนาดของลำไอออนกับ beam energy มาพล็อตกราฟ จะได้กราฟดังรูปที่ 35

Beam width depend on beam energy at gun to detector 32.5 mm :



รูปที่ 35 ขนาดของลำไอออนขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของไอออน

สาเหตุที่ทำให้ลำไอออนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อ beam energy มีค่าเพิ่มขึ้น เกิดเนื่องจาก profile ของสนามไฟฟ้าระหว่าง cylindrical cathode กับ extractor electrode โดย equipotential line จะทำมุมกับ optical axis ในลักษณะที่เป็น diverging angle มากขึ้น จากโครงสร้างของ extractor electrode ที่แสดงดังรูปที่ 28 และ 30 จะเห็นได้ว่าทางออกของไอออน

มีรูปร่างเป็นกรวยซึ่งมี full angle 35.2° ประกอบกับผลจากการเพิ่ม beam energy ซึ่งทำให้ระดับโวลเตจ ระหว่าง cylindrical cathode กับ extractor แตกต่างกันมากขึ้น เมื่อระดับโวลเตจที่ cylindrical cathode สูงขึ้น จะส่งผลทำให้ equipotential line ระหว่าง cylindrical cathode กับ extractor electrode ทำมุมกับ optical axis ในลักษณะที่เป็น diverging angle มากขึ้น ทำให้ทิศของแรงที่กระทำต่อไอออนมีทิศพุ่งออกจาก optical axis มากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เมื่อ beam energy เพิ่มขึ้น ลำไอออนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นรวมทั้งยังส่งผลต่อ divergence angle ของลำไอออนด้วย (ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป) และ เมื่อขนาดของลำไอออนใหญ่ขึ้น อนุภาคที่อยู่ภายในลำไอออนก็จะมีจำนวนอนุภาคต่อหน่วยพื้นที่ลดลงจึงทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าสู่ cup ลดลงเช่นเดียวกัน จึงทำให้วัดกระแสสูงสุดได้น้อยลงเมื่อ beam energy สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่ม beam energy สูงถึงระดับหนึ่งค่ากระแสไอออน และ ขนาด ก็มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลง ทั้งนี้เกิดจากปริมาณไอออนที่อยู่ภายในแหล่งกำเนิดมีค่าคงเดิมไม่เปลี่ยนตามระดับ beam energy

สำหรับสาเหตุที่ทำให้ลำไอออนมีความกลมมากขึ้นเมื่อ beam energy มีค่ามากขึ้น เกิดเนื่องจากโครงสร้างของแหล่งกำเนิดไอออนอีกเช่นกันแต่เกิดขึ้นจากรูปร่างของ filament แสดงดังในรูปที่ 29 (b) จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปร่างของ filament นั้นไม่สมมาตรจึงทำให้ equipotential line ระหว่าง cylindrical cathode กับ filament มีความบิดเบี้ยวไปจากที่ควรจะเป็น ความบิดเบี้ยวของ equipotential line นี้จึงทำให้ไอออนที่วิ่งมายัง cylindrical cathode มีรูปร่างที่บิดเบี้ยวไปจากรูปทรงกลม แต่ถ้ามีความแตกต่างของระดับโวลเตจระหว่าง cylindrical cathode กับ extractor มากขึ้น (beam energy สูงขึ้น) ก็จะทำให้ผลกระทบของ electric field ระหว่าง cylindrical cathode กับ filament ที่มีต่อเส้นทางการเดินทางของอนุภาคที่วิ่งออกมาใน free space ลดลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ลำไอออนมีความกลมมากขึ้นเมื่อ beam energy มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่ม beam energy ขึ้นจนทำให้อิทธิพลของ electric field ระหว่าง cylindrical cathode กับ filament ลดลงอีกจนอยู่ในระดับที่ถือว่าแทบไม่มีอิทธิพลต่อการจัดเรียงตัวของไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเลย ดังนั้นจึงมีเฉพาะอิทธิพลของ electric field ที่เกิดขึ้นจาก cylindrical cathode กับ extractor เท่านั้นที่มีผลการจัดเรียงตัวของอนุภาค ซึ่งส่งผลทำให้ความกลมของลำไอออนเริ่มคงที่เมื่อ beam energy มีค่ามาก ๆ

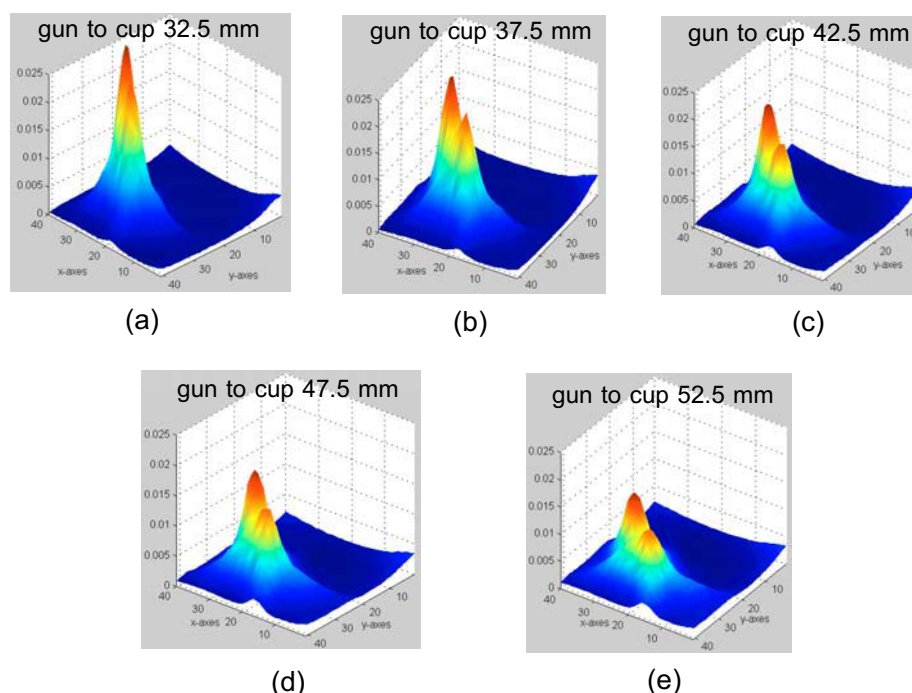
2.2 Beam Divergence Measurement

การวัด beam divergence ของลำไอออน มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา beam profile และ beam width ของลำไอออน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่อนุภาคเคลื่อนที่ใน free space เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับผลของระบบโพกัสต่อลำไอออน การวัด beam divergence ทำเช่นเดียวกับการวัด beam width เพียงแต่การวัด beam divergence นั้น จะต้องทำการเลื่อน detector ในแนวแกน z ด้วย สำหรับเงื่อนไขในการทดลองเป็นกรณีเช่นเดียวกับการวัด beam width เพียง

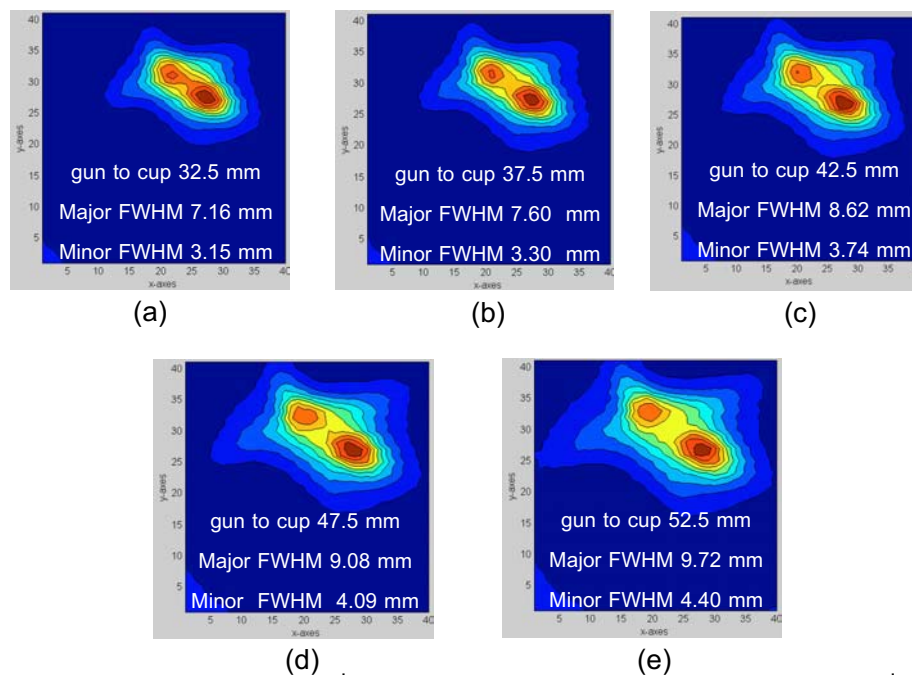
แต่จะทำการวัดที่ z - position หลาย ๆ ค่า (ซึ่งทำได้โดยการเลื่อน detector ให้ห่างออกจากแหล่งกำเนิดมากขึ้น) โดย z - position มีค่าเท่ากับ **32.5 , 37.5 , 42.5 , 47.5 , 52.5 และ 57.5 mm** โดยที่ $z = 0$ หมายถึง ปากของ Faraday cup จะอยู่ติดกับ extractor electrode ของแหล่งกำเนิด ในที่นี้ขอแสดงเพียงผลการวัด beam divergence ที่ beam energy 900 , 1000 และ 1200 eV ดังรูปที่ 36 - 41 เนื่องจากที่ระดับพลังงานเหล่านี้ได้มีการนำไปใช้งานใน focusing system

จากกราฟรูปที่ 36 และ 37 แสดง ion current profile และ ion current contour ซึ่งเป็นผลการวัด beam divergence ที่ beam energy 900 eV ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดมากขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อถอย detector ห่างออกจากแหล่งกำเนิดมากขึ้น กระแสสูงสุดที่วัดได้จะมีค่าน้อยลงในขณะที่ขนาดของลำไอออนใหญ่ขึ้น แต่จากการหาผลรวมของอนุภาคทั้งหมด (พื้นที่ใต้กราฟ ion current profile) พบว่าบน scan area ที่ตำแหน่งของ detector ต่าง ๆ กันยังคงมีจำนวนอนุภาคทั้งหมดเท่ากัน

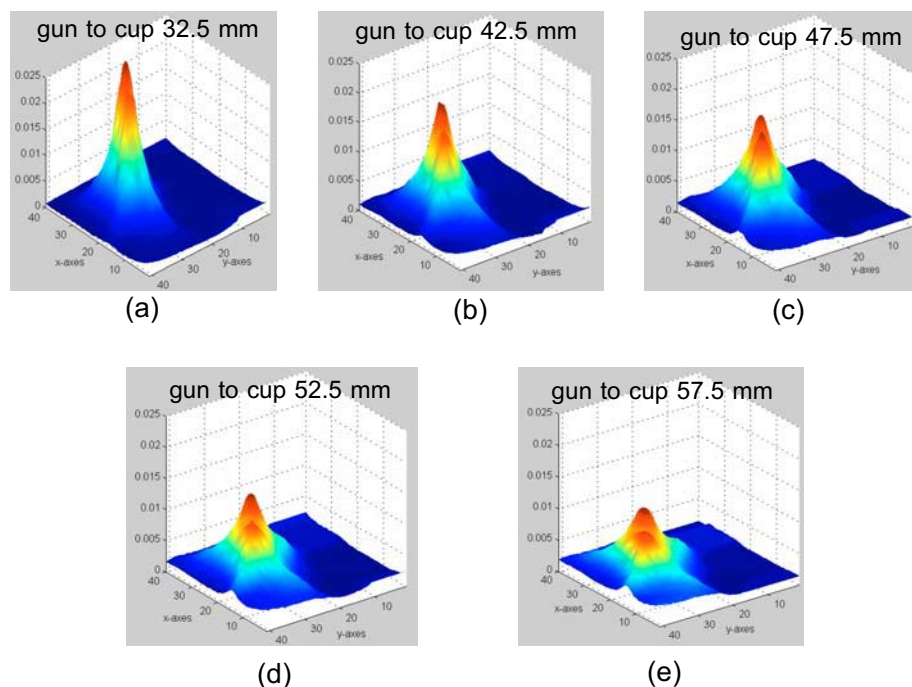
สำหรับกราฟรูปที่ 38 – 41 แสดง ion current profile และ ion current contour ซึ่งทำการวัด beam divergence ที่ beam energy 1000 และ 1200 eV



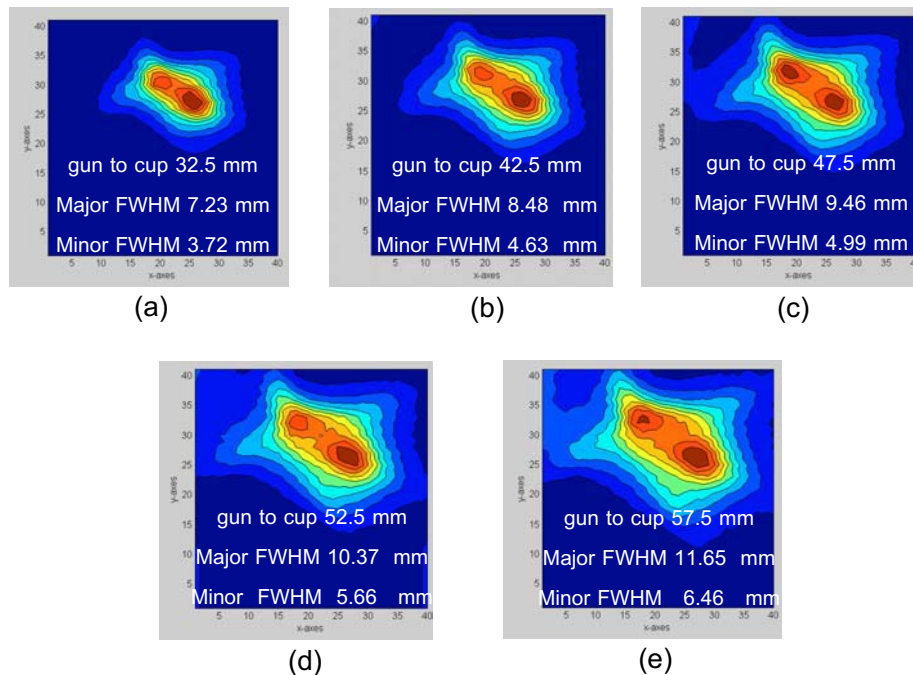
รูปที่ 36 Ion Current Profile เมื่อทำการวัด beam divergence ของลำไอออนที่มีพลังงาน **900 eV** เมื่อ detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 , 37.5 , 42.5 , 47.5 และ 52.5 mm



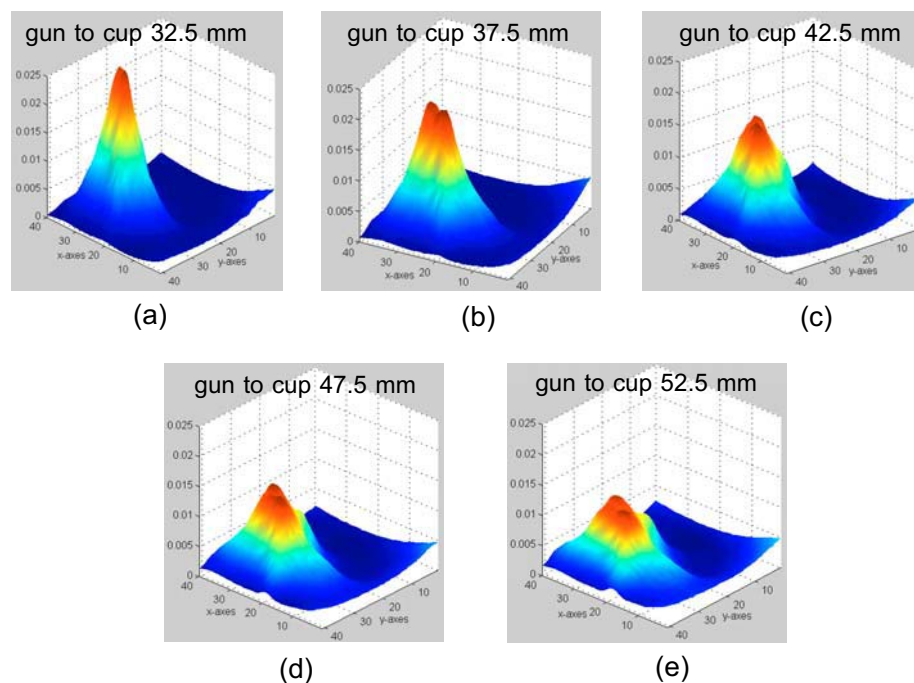
รูปที่ 37 Ion Current Contour เมื่อทำการวัด beam divergence ของลำไอออนที่มีพลังงาน **900 eV** เมื่อ detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 , 37.5 , 42.5 , 47.5 และ 52.5 mm



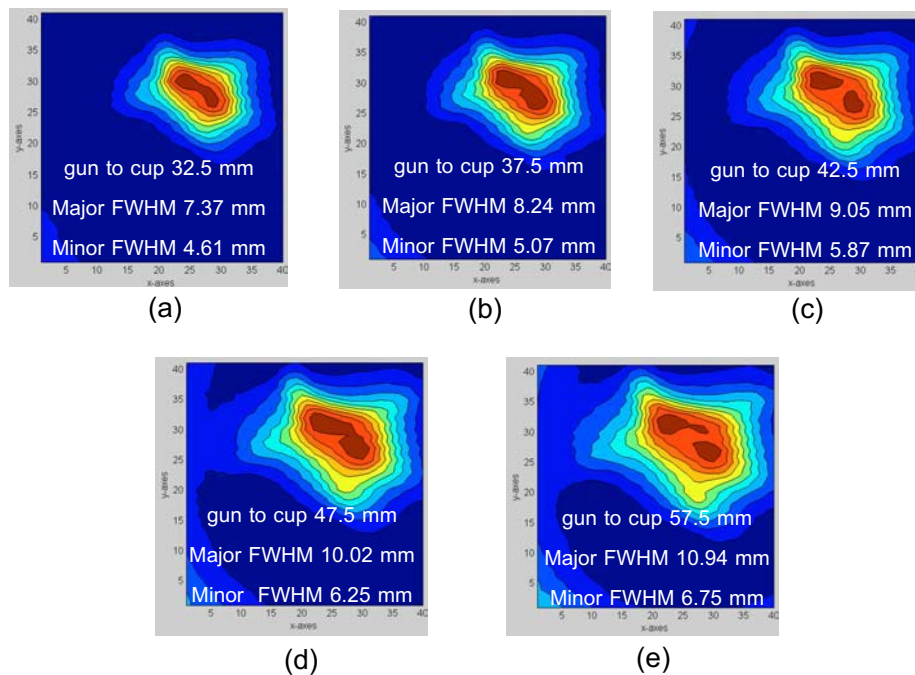
รูปที่ 38 Ion Current Profile เมื่อทำการวัด beam divergence ของลำไอออนระดับพลังงาน **1000 eV** เมื่อ detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 , 37.5 , 42.5 , 47.5 และ 52.5 mm



รูปที่ 39 Ion Current Contour เมื่อทำการวัด beam divergence ของลำไอออนที่มีพลังงาน **1000 eV** เมื่อ detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 , 37.5 , 42.5 , 47.5 และ 52.5 mm

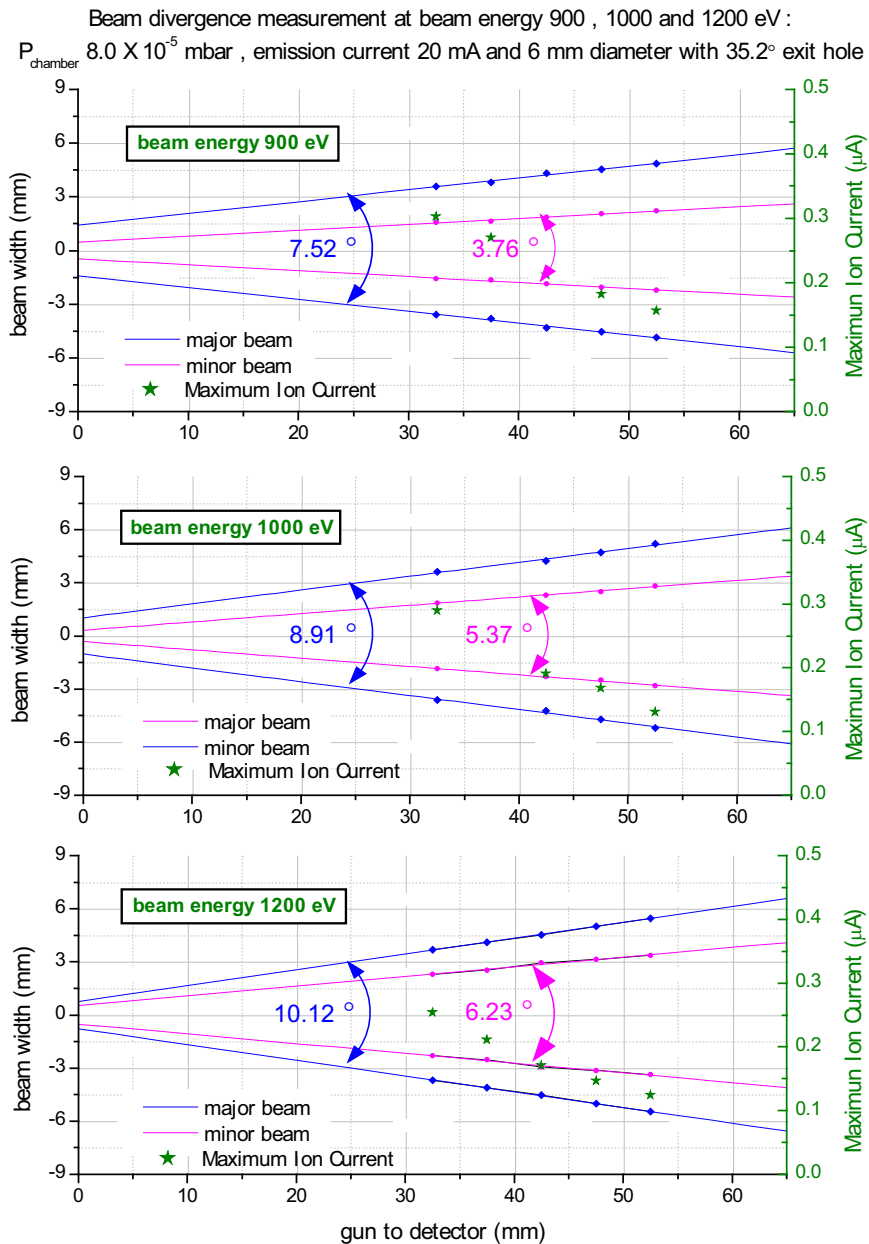


รูปที่ 40 Ion Current Profile เมื่อทำการวัด beam divergence ของลำไอออนที่มีพลังงาน **1200 eV** เมื่อ detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 , 37.5 , 42.5 , 47.5 และ 52.5 mm



รูปที่ 41 Ion Current Contour เมื่อทำการวัด beam divergence ของลำไอออนที่มีพลังงาน **1200 eV** เมื่อ detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 , 37.5 , 42.5 , 47.5 และ 52.5 mm

เมื่อนำ beam width กับ ระยะที่ detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด (gun to detector) มาพล็อตกราฟ จะได้กราฟดังรูปที่ 42 จากกราฟเห็นได้อย่างชัดเจนว่าลำไอออนที่วิ่งออกจากแหล่งกำเนิดมาสู่ free space จะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดย divergence angle ของลำไอออนจะมีค่าขึ้นอยู่กับ beam energy ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ divergence angle เปลี่ยนไปตาม beam energy ได้กล่าวไว้ในข้างต้น



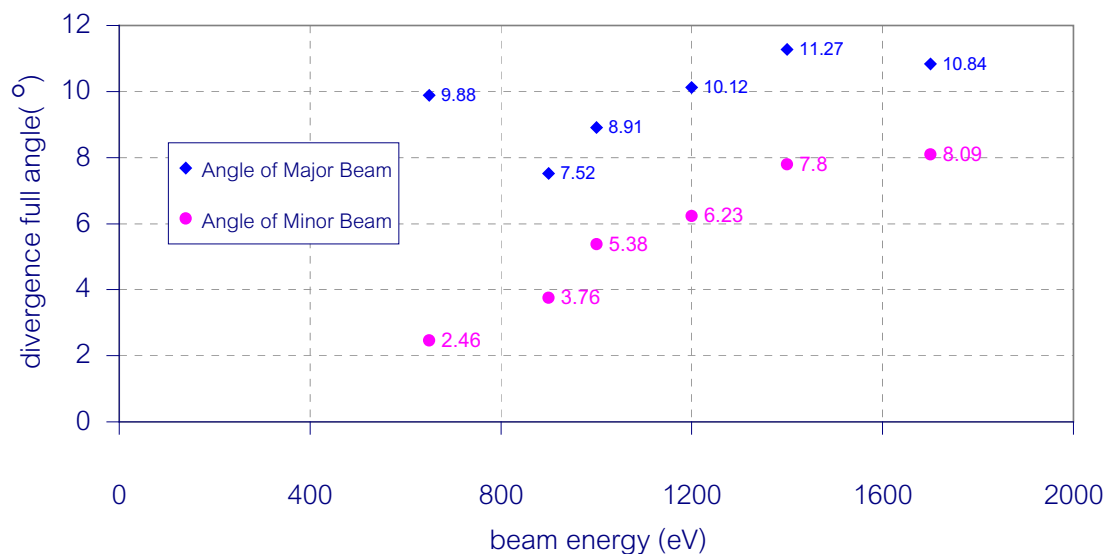
รูปที่ 42 ขนาดลำไอออนที่เปลี่ยนไป เมื่อเลื่อนระยะ detector ให้ออกห่างจากแหล่งกำเนิดมากขึ้น เมื่อ beam energy มีค่าเป็น 900 , 1000 และ 1200 eV

จากกราฟรูปที่ 42 เห็นได้ว่าขนาดของลำไอออนเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับระยะทางที่ห่างแหล่งกำเนิด ซึ่งขนาดของลำไอออนที่ใหญ่ขึ้นโดยเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับระยะทางนี้ อิทธิพลของ Coulomb force ไม่น่าจะใช่ปัจจัยสำคัญ สาเหตุสำคัญที่ทำให้ขนาดของลำไอออนเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับระยะทางน่าเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าของ extractor electrode ที่เมื่อ beam energy สูงขึ้น ส่งผลทำให้ equipotential line ทำมุมกับ optical axis ในลักษณะที่เป็น divergence มากขึ้น ประกอบกับลักษณะของ exit hole ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงทำให้ลำไอออน

ที่ออกมามีทิศทางการเคลื่อนไปตามทิศของแรงกระทำทางไฟฟ้าของ equipotential line ของ extractor electrode

เมื่อนำ divergence angle ที่แต่ละ beam energy มาพล็อตจะได้กราฟดังรูปที่ 43 จากกราฟรูปนี้เห็นได้ว่า เมื่อ beam energy มีค่าเพิ่มขึ้น divergence angle จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (ยกเว้น major beam ที่ beam energy 650 eV) สำหรับสาเหตุที่ทำให้เป็นเช่นนี้ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น

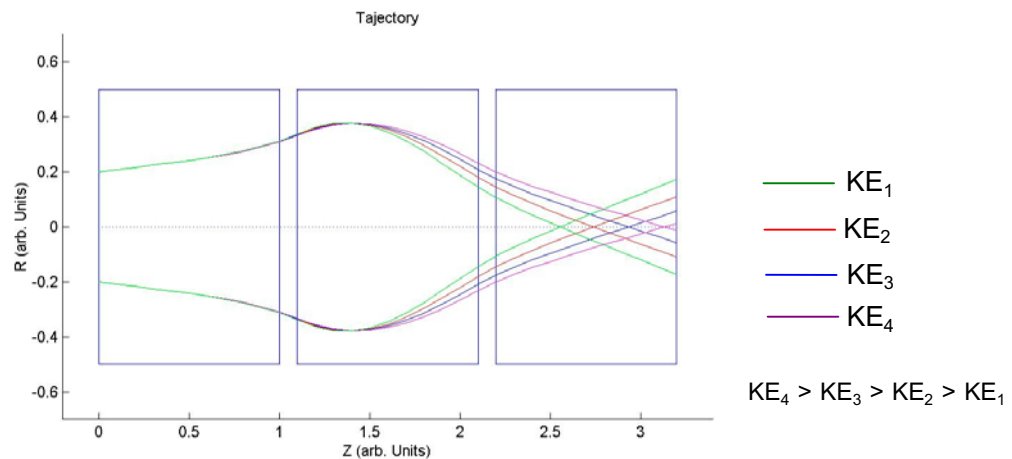
Beam divergence angle depend on beam energy : $P_{\text{chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar ,
emission current 20 mA and 6 mm diameter with full angle 35.2° exit hole



รูปที่ 43 Divergence angle ที่ beam energy ต่าง ๆ

2.3 Energy Spread Measurement

ในกรณีที่จะนำลำไอออนไปใช้งานกับ Focusing system ต่อไปนั้น นอกเหนือจาก beam profile และ beam width แล้ว ยังมีพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ควรศึกษาและทำการวัด นั่นคือ energy spread ของไอออนที่อยู่ภายในลำเดียวกัน โดยทั่วไปไอออนภายในลำที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดด้วยเงื่อนไขเดียวกันไม่จำเป็นว่าอนุภาคทุกตัวจะต้องมีระดับพลังงาน (ion energy) เท่ากันทุกตัว ผลของการที่ลำไอออนมีระดับพลังงานไม่เท่ากันทุกตัวทำให้ เมื่อลำไอออนเหล่านั้นเคลื่อนที่เข้าสู่ focusing system จะเกิด focal point ขึ้นหลายตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 44

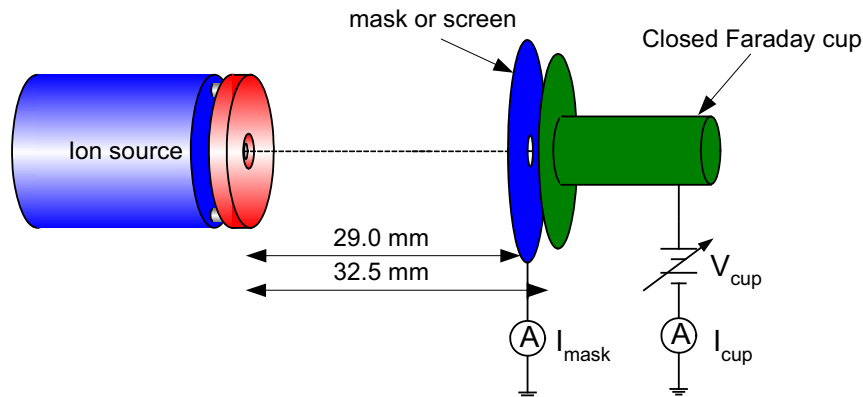


รูปที่ 43 ผลของ energy spread ที่มีต่อการโพกัสลำไอออนภายในชุดเลนส์

สำหรับ NGI3000 ion source ที่ใช้ในงานวิจัยในระยะนี้ สาเหตุที่ไอออนทุกตัวมีพลังงานไม่เท่ากันทุกตัวอาจเกิดเนื่องจากอิเล็กตรอนที่เกิดจาก filament ของแหล่งกำเนิดมีระดับพลังงานเริ่มต้นไม่เท่ากัน ผลคือเมื่อแก๊สถูก ionized ด้วยอิเล็กตรอนเหล่านั้นจึงทำให้ไอออนที่เกิดขึ้นมีระดับพลังงานตั้งต้นไม่เท่ากัน ส่งผลทำให้อนุภาคภายในลำเดียวกันมีระดับพลังงานไม่เท่ากันด้วย ผลของอุณหภูมิจากการชนกันระหว่างอนุภาคภายในระบบก็เป็นสาเหตุที่ทำให้ไอออนมีพลังงานที่แตกกันได้ด้วย

การวัด energy spread ของไอออนภายในลำที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดทำโดยจัดระบบดังไดอะแกรมรูปที่ 31 แต่ไม่ต้องทำการ scan Faraday cup แต่อย่างใด โดยตำแหน่งของ Faraday cup อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 mm ($z = 32.5$ mm) สำหรับตำแหน่งบนระนาบ xy เป็นตำแหน่งที่ไอออนสามารถวิ่งเข้า Faraday cup ได้มากที่สุด การทดลองทำโดยการต่อวงจรทางไฟฟ้าดังรูปที่ 45 เงื่อนไขในการทดลองเป็นดังนี้

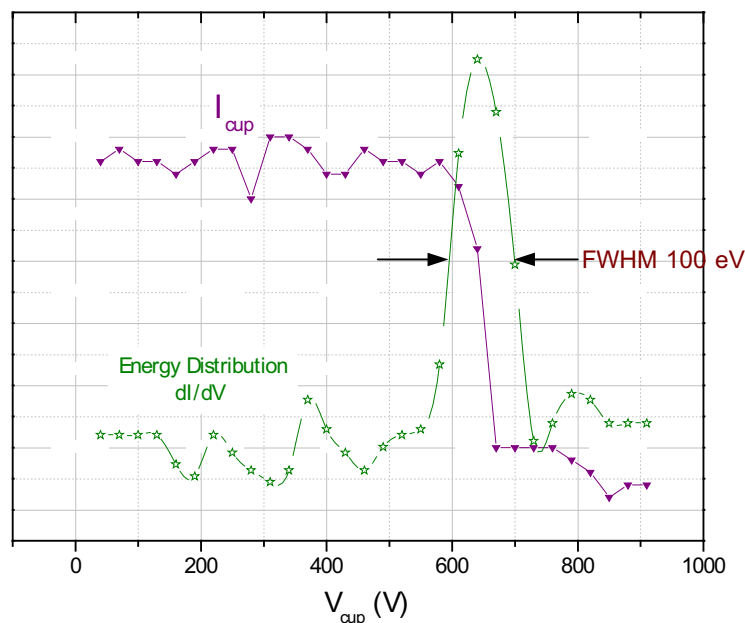
- circular aperture on mask $\varnothing$ 2 mm
- $P_{\text{main chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar
- emission current of ion gun 20 mA
- beam energy 650 , 900 , 1000 , 1200 และ 1400 eV



รูปที่ 45 การต่อวงจรไฟฟ้าให้กับระบบ เพื่อทำการวัด energy spread ของไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด

การทดลองทำโดยการวัดค่ากระแสที่ Faraday cup เมื่อโวลเตจที่ Faraday cup มีค่าเปลี่ยนไป โดยค่าของ V_{cup} จะมีค่าตั้งแต่ 0 V จนถึงค่าสูงกว่า beam energy ของลำไอออน สำหรับการวัดกระแสที่ mask นั้นทำเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของไอออนที่วิ่งเข้าชน mask เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโวลเตจที่ Faraday cup หลังจากที่ได้ค่าของกระแสที่ Faraday cup ที่เปลี่ยนแปลงตามโวลเตจที่ cup และ นำค่าทั้งสองมาพล็อตกราฟ หลังจากนั้นทำการหาค่า dI_{cup}/dV_{cup} เมื่อได้ dI_{cup}/dV_{cup} แล้วให้นำมาพล็อตกราฟเทียบกับ V_{cup} อีกครั้งหนึ่ง ผลการวัด energy spread ที่ beam energy 650 และ 900 eV แสดงดังรูปที่ 46 และ 47

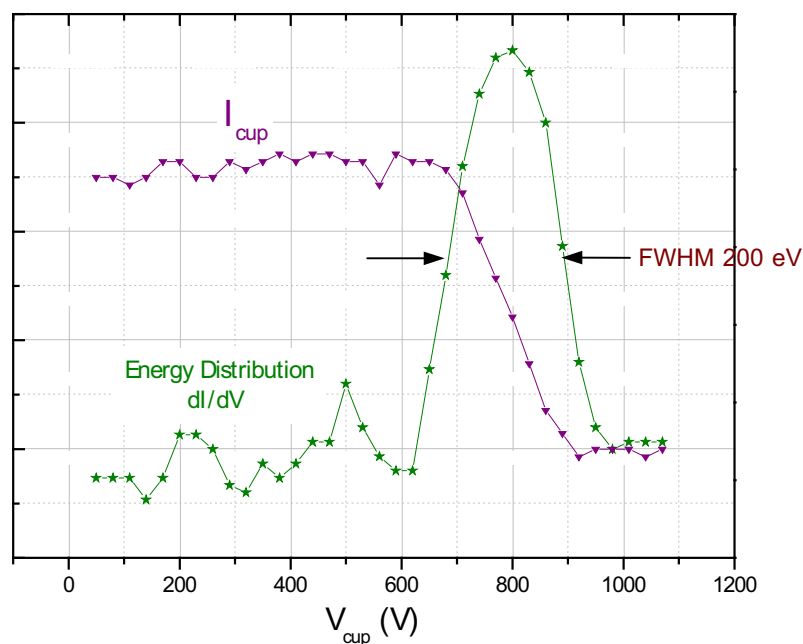
Energy spread measurement of the ions at beam energy 650 eV
 $P_{chamber} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar , emission current 20 mA and 6 mm diameter with 35.2° exit hole



รูปที่ 46 ผลการวัด energy spread ของลำไอออนที่ระดับพลังงาน 650 eV

จากกราฟทั้งสองเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่ม retarding voltage (V_{cup}) มากขึ้น กระแสไอออนที่ผ่านมาถึง cup ได้จะมีค่าน้อยลงและจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ retarding voltage มีค่ามากกว่า beam energy มาก ๆ สำหรับสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้อธิบายไว้แล้วในข้างต้น จากกราฟยังเห็นได้อีกว่าค่ากระแสไอออนที่ cup จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ retarding voltage มีค่าใกล้เคียงกับ beam energy สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า retarding voltage มีค่าใกล้เคียงกับ beam energy จึงทำให้ไอออนส่วนใหญ่ไม่สามารถวิ่งเข้าไปถึง cup ได้

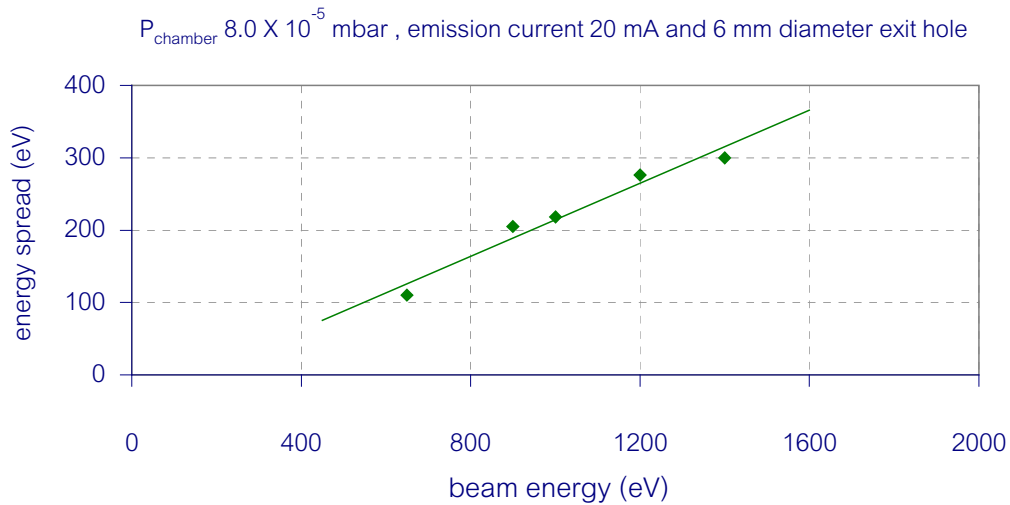
Energy spread measurement of the ions at beam energy 900 eV
 $P_{chamber} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar , emission current 20 mA and 6 mm diameter with 35.2° exit hole



รูปที่ 47 ผลการวัด energy spread ของลำไอออนที่ระดับพลังงาน 900 eV

ในการทดลองได้ทำการหาค่า energy spread ของลำไอออนที่ระดับพลังงานต่าง ๆ จากนั้นนำค่า energy spread กับ beam energy มาพล็อตกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 48

The energy spread of the ions in NGI3000 ion source that depend on beam energy :



รูปที่ 48 ผลของ beam energy ที่มีต่อ energy spread ของลำไอออน

จากกราฟ เมื่อ beam energy มีค่าเพิ่มขึ้น เห็นได้ว่า energy spread ของลำไอออนจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ส่วนหนึ่งเกิดจากอนุภาคภายในแหล่งกำเนิดมีพลังงานเริ่มต้นไม่เท่ากันตั้งแต่ต้นดังได้กล่าวมาข้างต้น สำหรับอีกสาเหตุหนึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าของ extractor electrode เมื่อ extraction voltage สูงขึ้น ส่งผลทำให้อนุภาคบางตัวเคลื่อนที่ด้วย divergence angle มากขึ้น จึงทำให้อนุภาคมีความเร็วในแนวแกน y สูงขึ้น แต่ความเร็วในแนวแกน z กลับมีค่าลดลง ส่งผลทำให้พลังงานในแนวแกน z ลดลง (ซึ่งในการวัด energy spread ของลำไอออนนี้จะทำการ retarding ด้วยสนามไฟฟ้าในแนวแกน z เท่านั้น) จึงทำให้ในการ retarding ลำไอออนที่มีพลังงานสูงมีค่า energy spread สูงตามไปด้วย

2.4 Sleeve Effect to Ion Beam

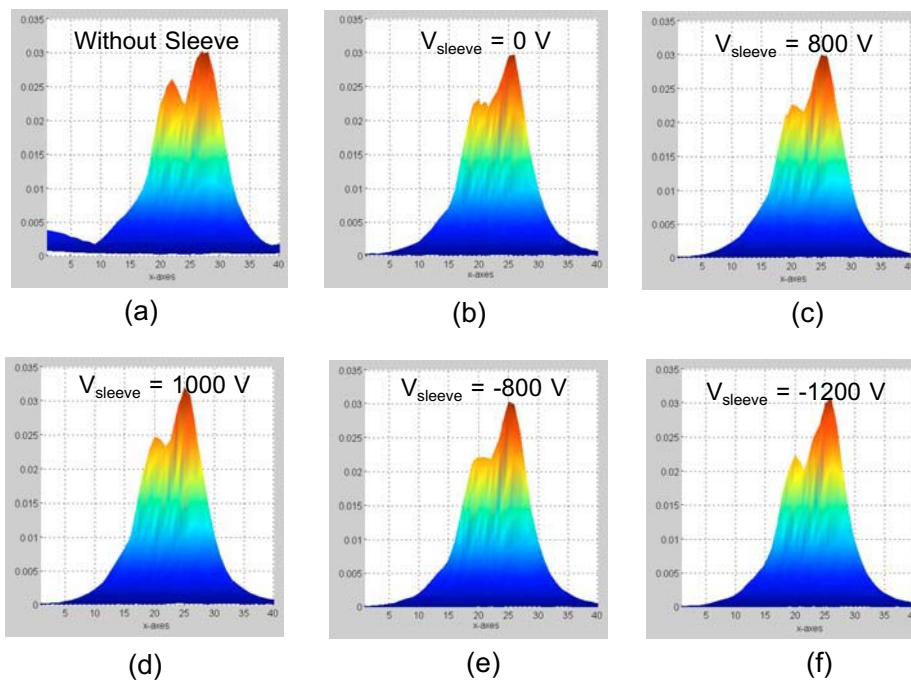
จากระบบ secondary electron measurement ในรูปที่ 24 โดยมี sleeve electrode เป็นตัวคอยกักเก็บอิเล็กตรอนที่หลุดจาก mask นั้น นอกจากนี้แล้วยังพบว่า การที่มีประจุไปสะสมอยู่ที่ sleeve ยังส่งผลทำให้ลำไอออนจากแหล่งกำเนิดจะมีขนาดที่เล็กลงจากเดิม

การทดลองเพื่อศึกษา sleeve effect ทำได้โดยการจัดระบบดังไดอะแกรมและต่อวงจรไฟฟ้าง่ายรูปที่ 24 โดยมีเงื่อนไขในการทดลองดังนี้

- circular aperture บน mask $\varnothing$ 2 mm
- $P_{\text{main chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar
- emission current of ion gun 20 mA
- scan step 0.5 mm

- scan area : $x = 0 - 20 \text{ mm}$, $y = 0 - 20 \text{ mm}$
- detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไอออน 32.5 mm
- beam energy 900 eV
- $V_{\text{sleeve}} = 0 , 800 , 1000 , -800 \text{ และ } -1200 \text{ V}$

ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 49 และ 50

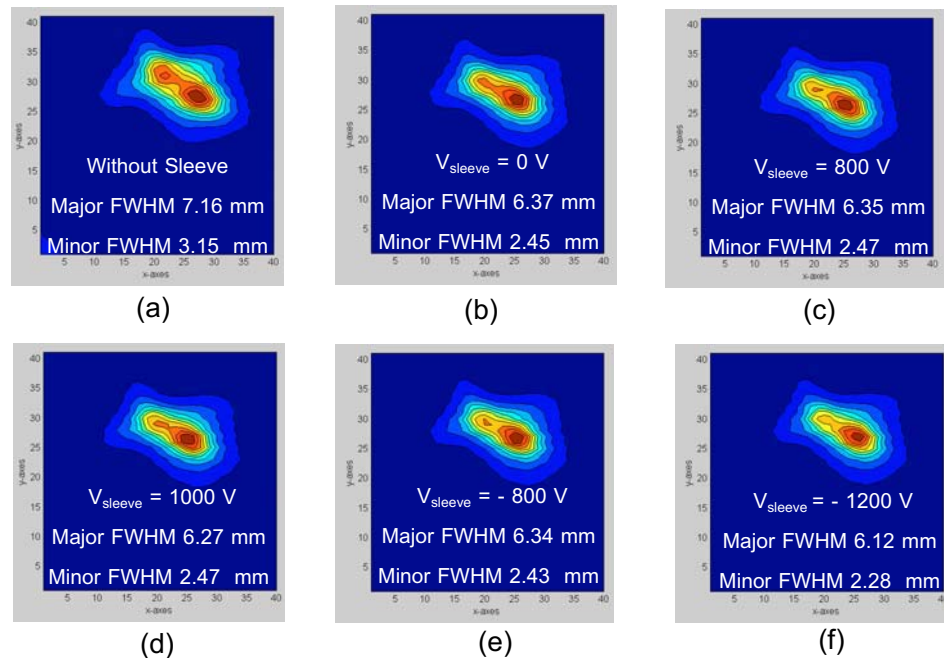


รูปที่ 49 ผลกระทบของ sleeve electrode ที่มีต่อ Ion current Profile โดยทำการวัด beam width ของลำไอออนที่มีค่า beam energy 900 eV ที่ตำแหน่งห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 mm

- (a) เมื่อไม่ได้ติดตั้ง sleeve electrode
- (b) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = 0 \text{ V}$
- (c) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = 800 \text{ V}$
- (d) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = 1000 \text{ V}$
- (e) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = -800 \text{ V}$
- (f) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = -1200 \text{ V}$

จากรูปที่ 49 (b) และ 50 (b) เพียงแค่ใส่ sleeve electrode โดยทำการต่อขั้วไฟฟ้าลงกราวด์ Ion current profile ของลำไอออนก็เปลี่ยนไปทันที เมื่อเทียบกับรูปที่ 49 (a) และ 50 (a)

ซึ่งไม่ได้ทำการติดตั้ง sleeve electrode อยู่ในระบบ แต่เมื่อเปลี่ยนโวลเตจที่ป้อนให้กับ sleeve electrode ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อ Ion current profile ของลำไอออนจนเห็นได้ชัด



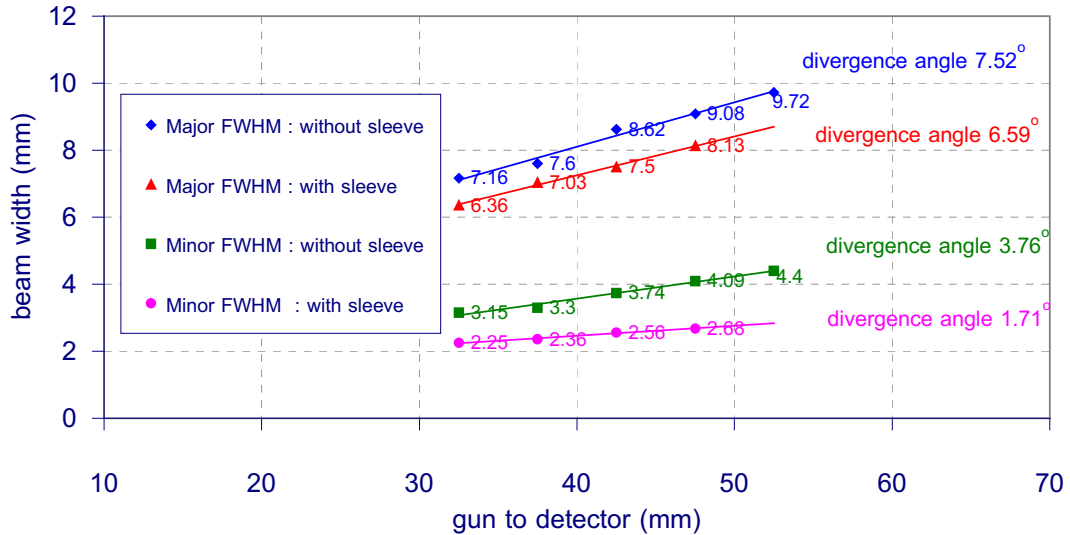
รูปที่ 50 ผลกระทบของ sleeve electrode ที่มีต่อ Ion current contour โดยทำการวัด beam width ของลำไอออนที่มีค่า beam energy 900 eV ที่ตำแหน่งห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 mm

- (a) เมื่อไม่ได้ติดตั้ง sleeve electrode
- (b) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = 0 \text{ V}$
- (c) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = 800 \text{ V}$
- (d) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = 1000 \text{ V}$
- (e) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = -800 \text{ V}$
- (f) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode : $V_{\text{sleeve}} = -1200 \text{ V}$

สาเหตุที่ทำให้ขนาดของลำไอออนเล็กลงเมื่อทำการติดตั้ง sleeve electrode ให้กับระบบ นั้นน่าจะเกิดขึ้นจาก มี image charge เกิดขึ้นกับ sleeve electrode จึงทำให้ sleeve electrode สามารถแสดงพฤติกรรมเป็น lens electrode ได้ สำหรับในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{sleeve} แล้วไม่เกิดผลกระทบน่าเกิดจากขนาดของ sleeve electrode ที่มีขนาด $\varnothing$ ใหญ่ถึง 55 mm และ การติดตั้ง sleeve electrode ส่งผลกระทบต่อ beam divergence ของลำไอออนแสดงดังรูปที่ 51 โดย divergence angle จะมีขนาดที่ลดลงจากเดิมที่ไม่ได้ทำการติดตั้ง sleeve electrode

Effect of sleeve to beam divergence of the ions at beam energy 900 eV :

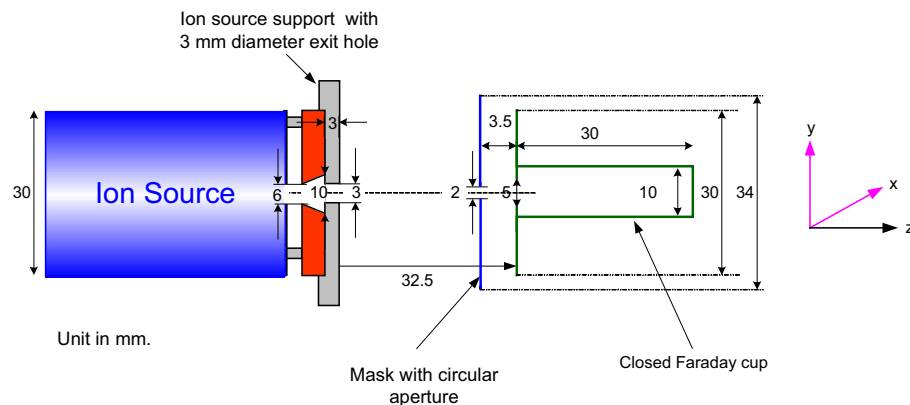
$P_{\text{chamber}} = 8.0 \times 10^{-5}$ mbar , emission current 20 mA and 6 mm diameter with full angle 35.2° exit hole



รูปที่ 51 ผลกระทบของ sleeve electrode ที่มีต่อ divergence angle ของลำไอออนที่มีค่า beam energy 900 eV

2.5 Exit Hole Effect to Ion Beam

เนื่องจากขนาดความกว้างของ extractor ตรงบริเวณทางออกของลำไอออน (exit hole) มีขนาดความกว้างถึง 6 mm และ ยังมีลักษณะเป็นกรวย (conical exit hole) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 30 และ กราฟรูปที่ 42 นั้นพบว่าสาเหตุสำคัญที่ทำให้ขนาดของลำไอออนเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับระยะทางนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าของ exit hole มากกว่าที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของ Coulomb force เพื่อให้ขนาดของลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดมีขนาดเล็กลงจากเดิม จึงได้ทำการเปลี่ยนขนาดของ exit hole โดยลักษณะของ exit hole ใหม่นี้แสดงดังรูปที่ 52 จากรูปเห็นได้ว่า exit hole ขึ้นใหม่มีช่องทางออกเป็นทรงกระบอก (cylindrical exit hole) ซึ่งมีความยาวของกระบอก 3 mm และ ความกว้างของปากกระบอก 3 mm เช่นกัน

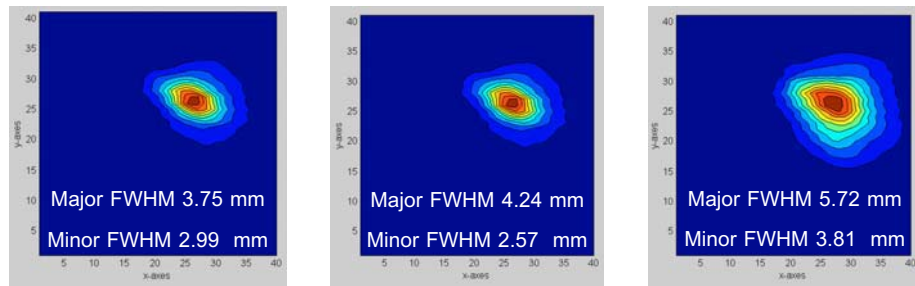


รูปที่ 52 ลักษณะของ cylindrical exit hole (exit hole ขึ้นใหม่) และ ระบบการวัดผลกระทบของ cylindrical exit hole ที่มีต่อ beam width ของลำไอออน

จากการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของขนาดของ exit hole ที่มีต่อ beam width นั้นทำได้โดยการจัดระบบดังรูปที่ 52 ในการเปลี่ยนขนาดของ exit hole ทำได้โดยการนำ exit hole ขึ้นใหม่ (ภาพสีเทาในรูปที่ 52) มาสวมทับเข้ากับ exit hole อันเดิม (ภาพสีแดงในรูปที่ 52) ในการต่อวงจรไฟฟ้าให้กับระบบการวัดยังคงทำเช่นเดิมดังรูปที่ 32 เงื่อนไขการทดลองเป็นดังนี้

- circular aperture บน mask $\varnothing$ 2 mm
- $P_{\text{main chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar
- emission current of ion gun 20 mA
- scan step 0.5 mm
- scan area : x = 0 – 20 mm , y = 0 – 20 mm
- detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไอออน 32.5 mm
- beam energy 650 , 900 และ 1200 eV

ผลการวัดขนาดของลำไอออนที่ออกมาจาก cylindrical exit hole แสดงดังรูปที่ 53 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของลำไอออนที่ออกมาจาก conical exit hole ที่แสดงดังรูปที่ 54 จะเห็นได้ว่ารูปร่างของลำไอออนที่ได้จาก exit hole ทั้งสองแบบมีความแตกต่างกัน โดยลำไอออนที่ออกมาจาก cylindrical exit hole จะมีความกลมมากขึ้นและขนาดของลำเล็กกว่าลำไอออนที่ออกมาจาก conical exit hole ทั้งนี้เกิดขึ้นจากขนาดทางออกของ cylindrical exit hole ที่มีขนาด $\varnothing$ ของทางออกเพียง 3 mm จึงทำให้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าของ cylindrical exit hole ที่มีต่อไอออนมีความแรงมากกว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดจาก conical exit hole ซึ่งมีขนาด $\varnothing$ ของทางออกถึง 6 mm



(a)

(b)

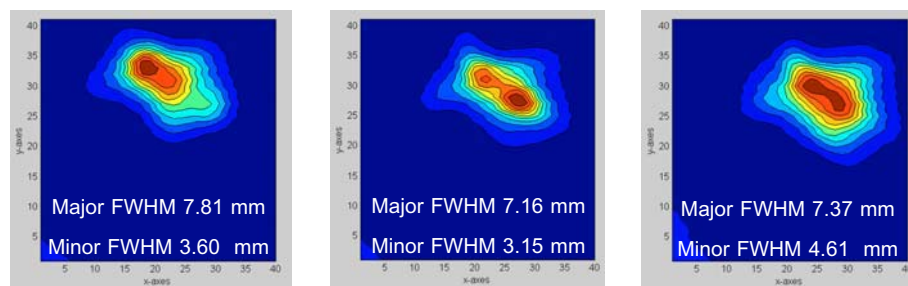
(c)

รูปที่ 53 ขนาดของลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกจาก *cylindrical exit hole* ที่มีขนาด $\varnothing$ ช่องทางออก และ ความยาวของกระบอก 3 mm ที่ตำแหน่งห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 mm

(a) beam energy 650 eV

(b) beam energy 900 eV

(c) beam energy 1200 eV



(a)

(b)

(c)

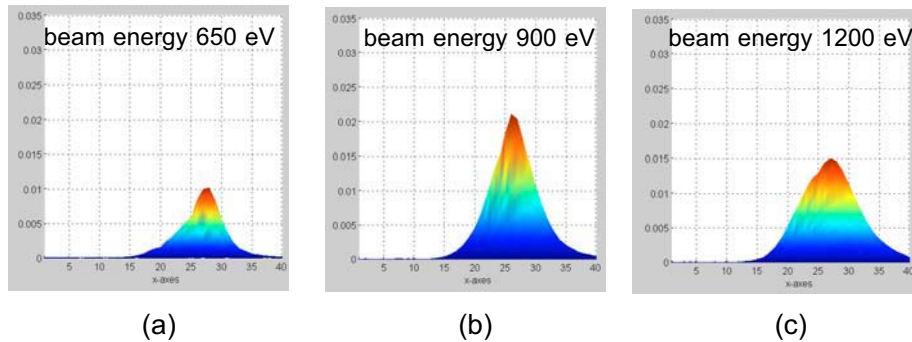
รูปที่ 54 ขนาดของลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกจาก *conical exit hole* ที่มีขนาด $\varnothing$ ช่องทางออก 6 mm และ มี divergence angle 35.2° ที่ตำแหน่งห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 mm

(a) beam energy 650 eV

(b) beam energy 900 eV

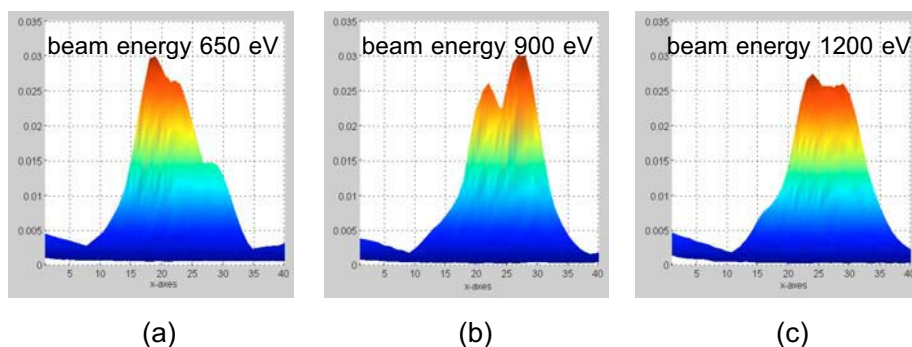
(c) beam energy 1200 eV

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อขนาดของ exit hole เปลี่ยนไปยังส่งผลต่อจำนวนของไอออนที่ออกมาด้วยโดยจำนวนไอออนที่ออกมาจาก cylindrical exit hole ซึ่งมีขนาด $\varnothing$ ของทางออกเพียง 3 mm จะมีจำนวนน้อยกว่าไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจาก conical exit hole ซึ่งมีขนาด $\varnothing$ ของทางออกถึง 6 mm ผลการวัดจำนวนไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจาก exit hole ทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 55 และ รูปที่ 56



รูปที่ 55 Ion current profile ของลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกจาก *cylindrical exit hole* ที่มีขนาด $\varnothing$ ของช่องทางออก และ ความยาวของกระบอก 3 mm ที่ตำแหน่งห่างจาก แหล่งกำเนิด 32.5 mm

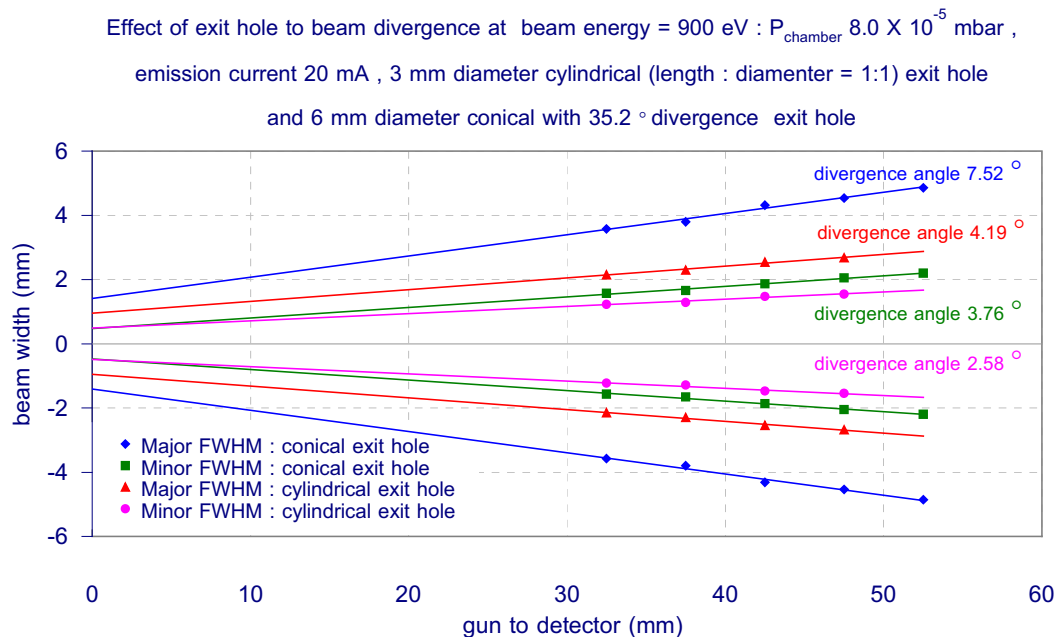
- (a) beam energy 650 eV
- (b) beam energy 900 eV
- (c) beam energy 1200 eV



รูปที่ 56 Ion current profile ของลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกจาก *conical exit hole* ที่มีขนาด $\varnothing$ ของช่องทางออก 6 mm และ มี divergence angle 35.2° ที่ตำแหน่งห่างจาก แหล่งกำเนิด 32.5 mm

- (a) beam energy 650 eV
- (b) beam energy 900 eV
- (c) beam energy 1200 eV

นอกจากนี้เมื่อทำการวัด beam divergence ของลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดโดยผ่านทาง cylindrical exit hole พบว่า divergence angle ของลำไอออนทั้ง major beam และ minor beam มีขนาดลดลงจากกรณีลำไอออนเคลื่อนที่ออกมาจาก conical exit hole ผลการวัดแสดงดังกราฟรูปที่ 57



รูปที่ 57 ผลกระทบของรูปร่างและขนาดของ exit hole ที่มีต่อ beam divergence ของลำไอออนที่มีค่าพลังงาน 900 eV

สาเหตุที่ทำให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจาก cylindrical exit hole มี divergence angle ลดลง เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าของ cylindrical exit hole มี equipotential line ที่ตั้งฉากกับ optical axis มากกว่าในกรณีของ conical exit hole จึงส่งผลทำให้ทิศของแรงสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคมีทิศขนานกับ optical axis ดังนั้นเมื่ออนุภาคที่เคลื่อนที่พ้นออกจาก cylindrical exit hole จะทำมุมกับ optical axis น้อยกว่าในกรณีที่อนุภาคเคลื่อนที่พ้นจาก conical exit hole ซึ่ง exit hole แบบนี้จะมี equipotential line ที่ทำมุมกับ optical axis เป็น divergence angle

2.6 Emission current effect to beam width and beam energy spread

ไอออนภายในลำที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออน NGI3000 นี้จะมี energy spread ประมาณ 20 % ของพลังงานของลำไอออน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด energy spread ของลำไอออนได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.3 Energy Spread Measurement ซึ่งจะพบว่าสาเหตุหนึ่งที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิด energy spread ขึ้น เกิดจากตัวแหล่งกำเนิดไอออนนั่นเอง สำหรับการศึกษาถึงผลกระทบของ emission current นั้นได้ทำการศึกษาผลของ emission current ที่มีต่อ energy spread , beam width และ ion density ของลำไอออน

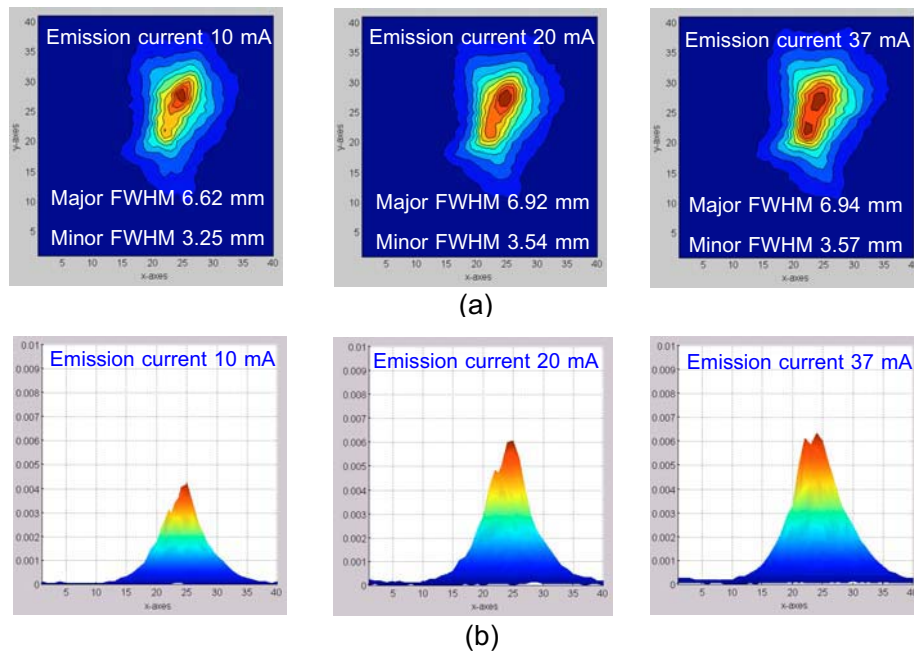
หลักการของการเกิดพลาสมาของ NGI3000 ion source นั้น เกิดขึ้นเนื่องจาก เมื่อมีการป้อนกระแสขนาด 5 A ให้กับ filament แล้วทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาและอิเล็กตรอนเหล่านั้นวิ่งเข้าชนกับอะตอมของแก๊สภายในระบบ โดยมี emission current เป็นค่าที่บ่งบอกว่ามีจำนวนอิเล็กตรอนหลุดออกมาจาก filament มากหรือน้อย ถ้ามีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจาก filament เป็นจำนวนมาก โอกาสที่จะทำให้แก๊สถูก ionized ก็จะมีมากขึ้น ส่งผลให้มีความหนาแน่นของไอออนภายในแหล่งกำเนิดพลาสมาเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ถ้า emission current มีค่าสูงขึ้นก็จะส่งผลทำให้อุณหภูมิของระบบสูงขึ้นด้วย ผลของอุณหภูมิภายในระบบก็เป็นสาเหตุที่ทำให้ไอออนมีพลังงานที่แตกกันได้ด้วย

- *Emission Current Effect to Beam Width*

การวัดผลของ emission current ที่มีต่อ beam width และ ion current density ภายในลำที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดโดยตรงทำได้โดยการจัดระบบดังรูปที่ 31 แต่ใช้ circular aperture on mask $\varnothing$ 1 mm โดยทำการต่อวงจรไฟฟ้าดังไดอะแกรมรูปที่ 32 และทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- circular aperture บน mask $\varnothing$ 1 mm
- $P_{\text{main chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar
- scan step 0.5 mm
- scan area : $x = 0 - 20$ mm , $y = 0 - 20$ mm
- detector อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไอออน 32.5 mm
- beam energy 1000 eV
- emission current 10 , 20 และ 37 mA

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 58



รูปที่ 58 ผลของ emission current ที่มี beam width , ion current density ของลำไอออนที่ beam energy 1000 eV

(a) emission current ที่มีผลต่อ beam width

(b) emission current ที่มีผลต่อ ion current density

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อ emission current มีค่าเพิ่มขึ้น ion current density จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ beam width ของลำไอออนที่มีค่า emission current ต่างกันยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน

- Emission Current Effect to Energy Spread

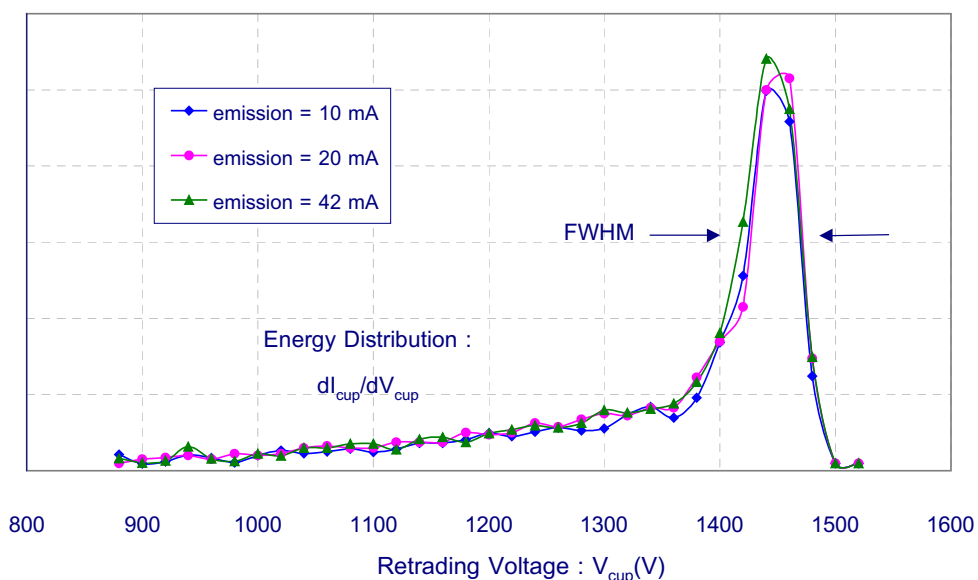
การวัดผลของ emission current ที่มีต่อ energy spread ของไอออนภายในลำที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดทำโดยจัดระบบการทดลองดังไดอะแกรมรูปที่ 31 โดยที่ไม่มี ion source support แต่ไม่ต้องทำการ scan Faraday cup แต่อย่างใด โดยตำแหน่งของ Faraday cup อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 32.5 mm สำหรับตำแหน่งบนระนาบ xy เป็นตำแหน่งที่ไอออนสามารถวิ่งเข้า Faraday cup ได้มากที่สุด การทดลองทำโดยการต่อวงจรทางไฟฟ้าดังรูปที่ 45 เงื่อนไขในการทดลองเป็นดังนี้

- circular aperture on mask $\varnothing 2$ mm
- $P_{\text{chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar
- beam energy 1500 eV
- emission current 10 , 20 , 42 mA

การทดลองทำโดยการวัดค่ากระแสที่ Faraday cup เมื่อโวลเตจที่ Faraday cup มีค่าเปลี่ยนไป โดยค่าของ V_{cup} จะมีค่าตั้งแต่ 0 V จนมีค่าสูงกว่า beam energy ของลำไอออน สำหรับการวัดกระแสที่ mask นั้นทำเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของไอออนที่วิ่งเข้าชน mask ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงโวลเตจที่ Faraday cup หลังจากที่ได้ค่าของกระแสที่ Faraday cup ที่เปลี่ยนแปลงตามโวลเตจที่ cup และ นำค่าทั้งสองมาพล็อตกราฟ หลังจากนั้นทำการหาค่า dI_{cup}/dV_{cup} เมื่อได้ dI_{cup}/dV_{cup} แล้วให้นำมาพล็อตกราฟเทียบกับ V_{cup} อีกครั้งหนึ่ง ผลของ emission current ที่มีต่อ energy spread แสดงดังรูปที่ 59

The FWHM energy spread of the ions depend on emission current when

$P_{chamber} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar and beam energy 1500 eV



รูปที่ 59 ผลของ emission current ที่มีต่อ energy spread ของลำไอออนระดับพลังงาน 1500 eV

จากกราฟเห็นว่า emission current ในช่วง 10 - 42 mA ซึ่งเป็นช่วงที่คาดว่าจะใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ไม่ส่งผลกระทบต่อ energy spread ของลำไอออน

จากการทดลองที่ผ่านมา สรุปได้ว่า emission current ในช่วง 10 - 42 mA จะส่งผลกระทบต่อ ion current density ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเท่านั้น โดยไม่มีผลต่อขนาดและ energy spread ของลำไอออนแต่อย่างใด ซึ่งจากการค้นคว้า พบว่า จะมี emission current ในช่วงหนึ่งเท่านั้นที่ไม่ส่งผลกระทบต่อ energy spread ของลำไอออน

3. Focusing System

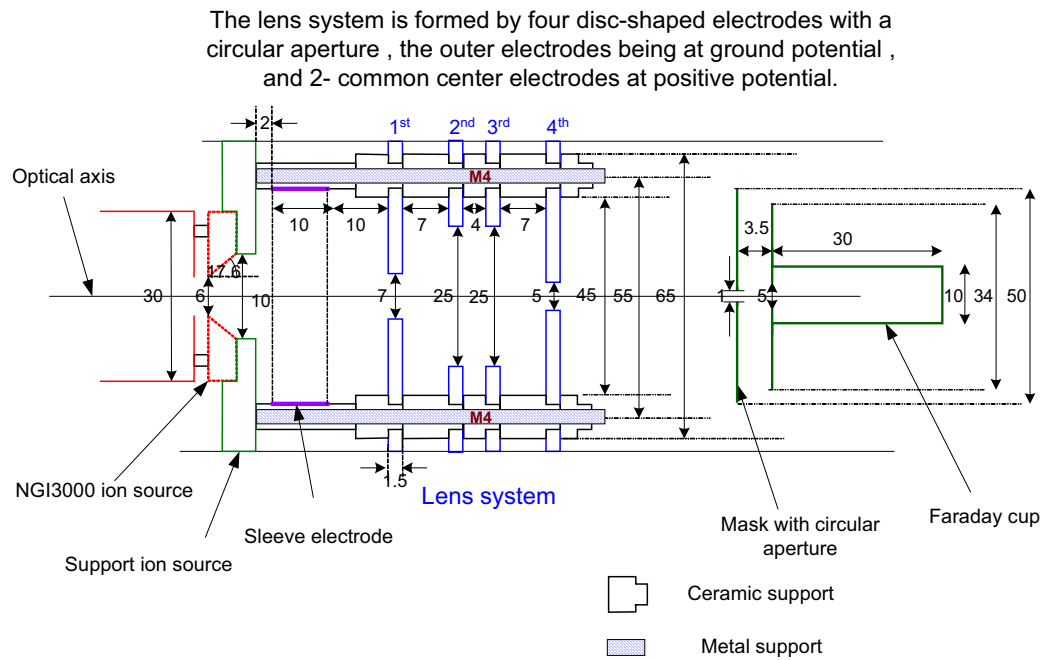
หลังจากที่ลำไอออนวิ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดสู่ free space ซึ่งไม่มีแรงกระทำใด ๆ จากภายนอกกระทำต่อลำไอออน จึงทำให้อิทธิพลของ Coulomb force interaction ภายในลำไอออนมีอย่างเด่นชัดขึ้น ผลคือทำให้ลำไอออนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อวิ่งผ่านอิทธิพลสนามไฟฟ้าของ extraction electrode ดังนั้นถ้าต้องการให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่อยู่ใน free space นั้นมีขนาดของลำที่คงเดิมหรือเล็กลง จำเป็นต้องหาแรงกระทำใด ๆ มากระทำต่อลำอนุภาคนั้นในทิศทางตรงข้ามและมีขนาดแรงที่มากกว่า Coulomb force สำหรับในงานวิจัยนี้ แรงกระทำดังกล่าว นั้น เป็นแรงกระทำทางไฟฟ้าเกิดขึ้นจาก focusing system ซึ่งเป็น electrostatic lens แบบ unipotential lens

งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา focusing system ที่ได้ทำการศึกษาในช่วง Phase 1B นั้นมีดังนี้

- 3.1 Lens potential effect
- 3.2 The space between lens electrodes and lens system length
- 3.3 Pressure effect to ion beam trajectory
- 3.4 Emission current and ion current density effects
- 3.5 Effect to beam profile

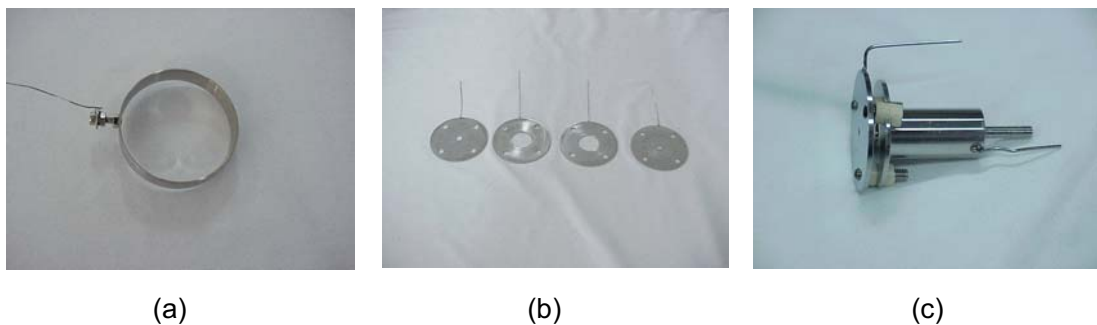
3.1 Lens potential effect

Focusing system ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีต้นแบบมาจาก CRT tube มีลักษณะเป็น disc-shaped electrode with circular aperture ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว แต่ละขั้วทำมาจาก stain steel โลหะแต่ละชิ้นจะมีความหนา 1.5 mm ขนาด รูปร่าง และ ระยะห่างระหว่าง lens แต่ละชิ้นแสดงดังไดอะแกรมรูปที่ 60 ซึ่งในระยะเริ่มต้นของงานวิจัยนั้นได้ทำการวางระยะห่างระหว่างชิ้นเลนส์เป็น 7 , 4 , 7 mm (เลนส์ชิ้นแรกซึ่งเริ่มนับจากแหล่งกำเนิดไอออนห่างจากเลนส์ชิ้นที่สอง 7 mm , เลนส์ชิ้นสองห่างจากเลนส์ชิ้นที่สาม 4 mm และ เลนส์ชิ้นที่สามห่างจากเลนส์ชิ้นที่สี่ 7 mm ตามลำดับ) โดย circular aperture ที่ใช้สำหรับวัดขนาดของลำไอออนที่ออกมาจาก lens system มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ aperture 1 mm

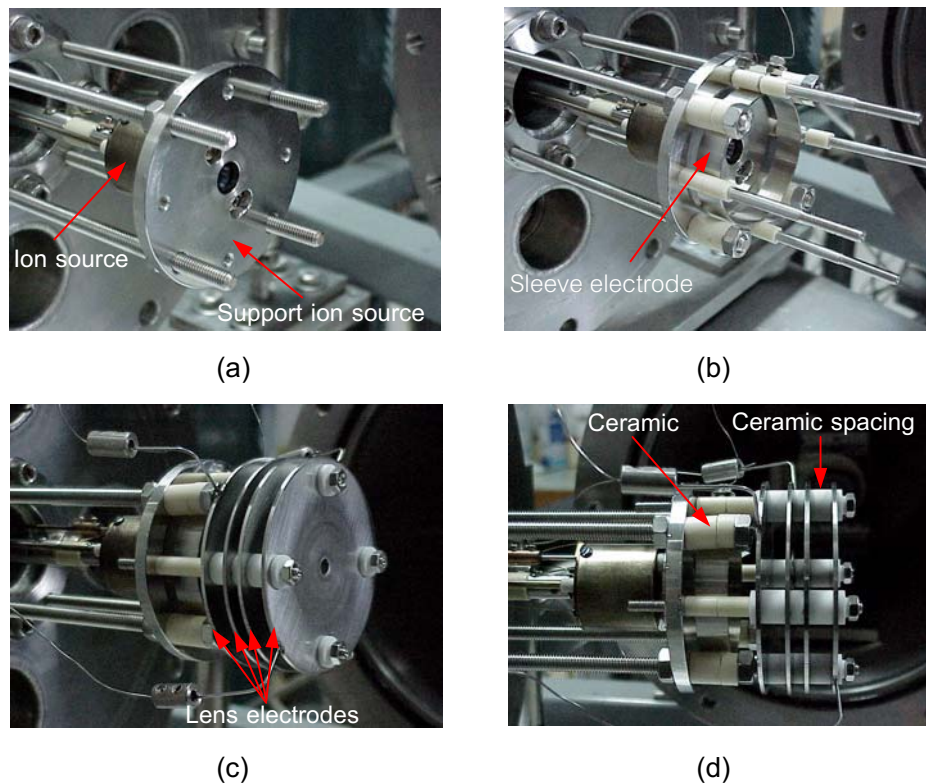


รูปที่ 60 ไดอะแกรมแสดงขนาดและการจัดวาง ion source , lens system และ Faraday cup

ลักษณะรูปร่างของ sleeve electrode , lens electrodes และ Faraday cup แสดงดังรูปที่ 61



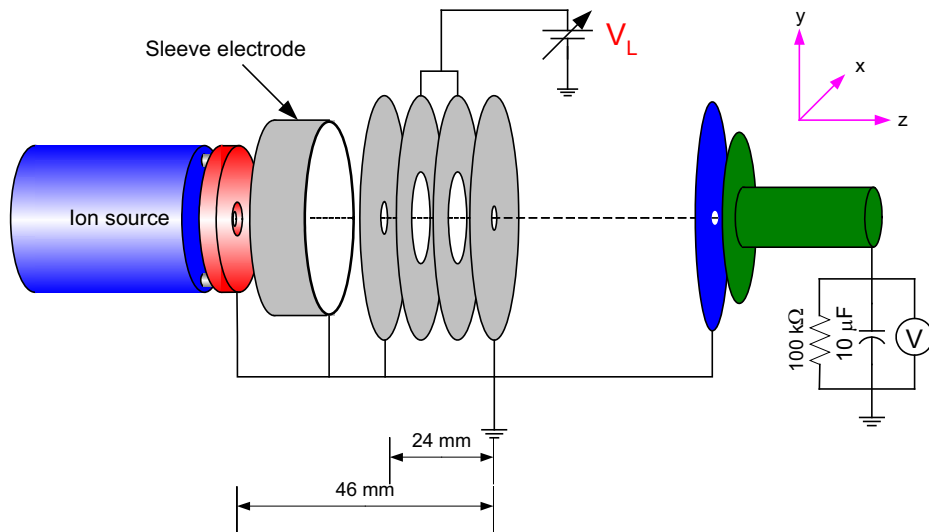
รูปที่ 61 (a) sleeve electrode
(b) lens electrodes
(c) mask and closed Faraday cup



รูปที่ 62 (a) ion source เมื่อติดตั้ง support ion source
 (b) เมื่อติดตั้ง sleeve electrode เข้ากับ ion source
 (c) เมื่อทำการติดตั้ง lens system (ภาพด้านหน้า)
 (d) เมื่อทำการติดตั้ง lens system (ภาพด้านข้าง)

การวัด beam width และ beam divergence ของลำไอออนที่ผ่าน focusing system ทำการวัดได้โดยการจัดระบบดังรูปที่ 60 ซึ่งเมื่อทำการติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้วจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 62 (c) และ (d) ตำแหน่งแรกที่ทำกรวัด beam width ปาก Faraday cup (detector) อยู่ห่างจาก lens ตัวนอกสุด 14.5 mm และ mask (screen) จะอยู่ห่างจากเลนส์ 11 mm โดยจะทำการเลื่อน detector ในแนวแกน x และ y เพื่อวัด beam width ที่ตำแหน่ง z ค่าหนึ่ง และ จะทำการเลื่อน detector ในแนวแกน z (optical axis) เพื่อทำการวัด beam divergence ของลำไอออนด้วย

การทดลองทำโดยการป้อนโวลเตจให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ของชุดเลนส์แสดงดังรูปที่ 63 โดยขั้วที่ 1 และ 4 จะต่ออยู่กับ ground potential เช่นเดียวกับ sleeve electrode ส่วนขั้วที่ 2 และ 3 จะถูกต่อเชื่อมเข้าด้วยกันที่ระดับ positive potential เดียวกัน ที่สามารถปรับระดับโวลเตจได้



รูปที่ 63 ระบบการต่อวงจรไฟฟ้าของ Focusing system

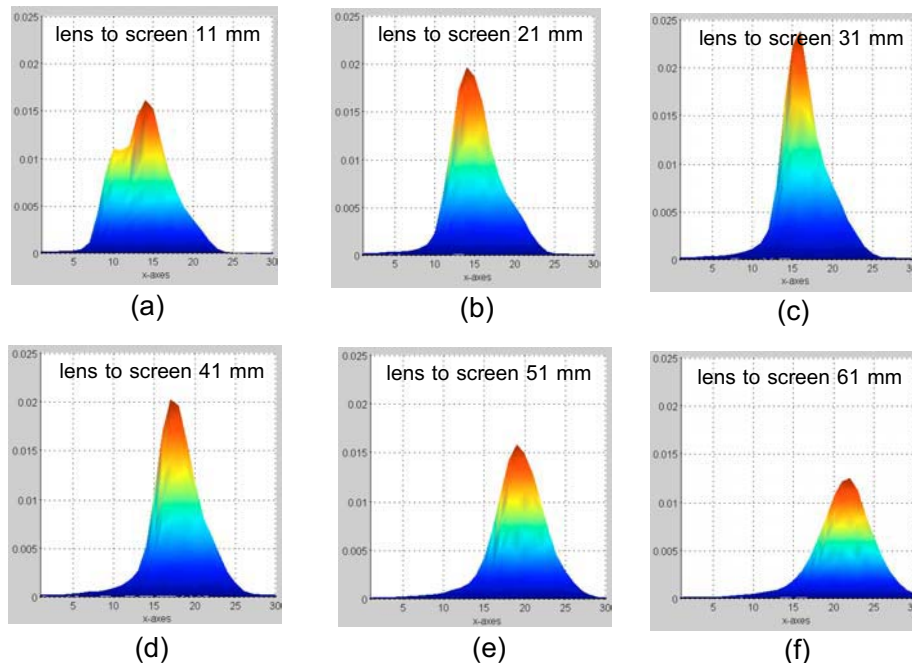
การทดลองทำภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- Circular aperture on mask $\varnothing 1^*$ mm
- $P_{\text{main chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar (ความดันภายใน ion source สูงกว่านี้ประมาณ 10 เท่า)
- emission current of ion gun 20 mA
- scan step 0.3 mm (มอเตอร์เคลื่อนที่ครั้งละ 0.3 mm กำหนดได้จากโปรแกรมที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์)
- scan area : $x = 9 - 18$ mm , $y = 9 - 18$ mm
- screen อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 11 mm ที่ระยะแรกของการวัดขนาด
- beam energy 1200 , 1000 และ 900 eV
- ปรับ V_L เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อ beam width และ focal length

* หมายเหตุ ตัวอักษร สีน้ำเงินเข้ม คือ เงื่อนไขที่เปลี่ยนจากกรณีที่ทำการวัด beam width ของลำไอออน ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดโดยตรง

- ผลการวัด beam divergence ของ focused ion beam เมื่อ beam energy = 1200 eV

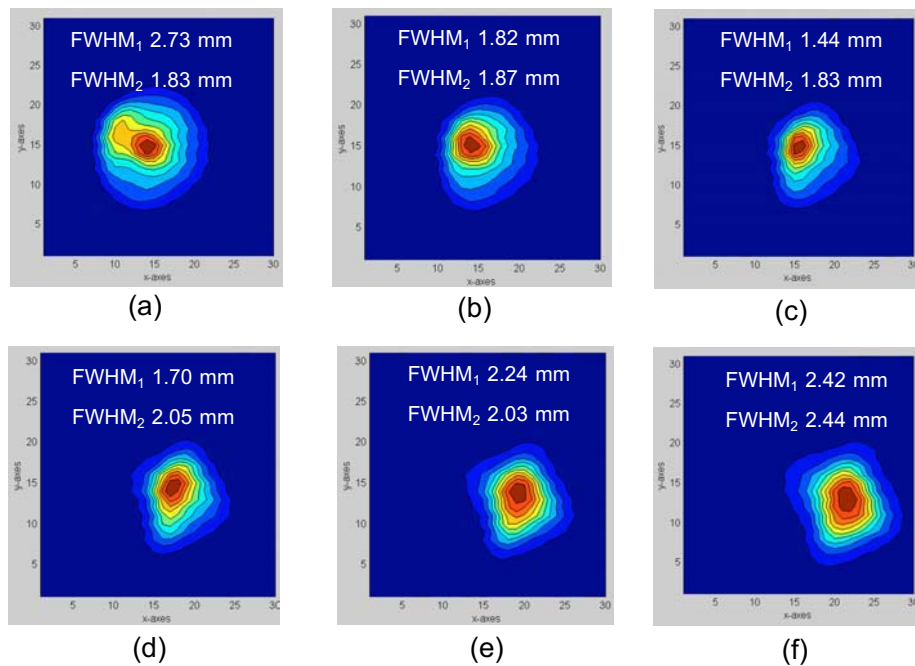
ผลการวัดขนาดลำไอออนซึ่งผ่าน focusing system ที่ระยะต่าง ๆ โดยที่ beam energy มีค่า 1200 eV และ $V_L = 1600$ V แสดงดังรูปที่ 64 และ 65 โดยขนาดของกระแสที่แท้จริงให้นำค่าในแนวแกนตั้งของกราฟในรูปที่ มาคูณด้วย 10 ส่วนในแนวแกนนอนนั้นเป็นระยะทางที่มอเตอร์ทำการ scan ค่าที่แท้จริงได้จากการนำค่าที่แสดงบนแกนมาคูณด้วย 0.3 (scan step)



รูปที่ 64 Ion Current Profile ของลำไอออนพลังงาน 1200 eV และ lens potential (V_L) 1600 V เมื่อ screen ห่างจากเลนส์ตัวสุดท้าย 11 , 21, 31, 41, 51 และ 61 mm ตามลำดับ

จากรูปที่ 64 และ 65 จะเห็นว่าเมื่อไอออนเคลื่อนที่ผ่านออกจากเลนส์ระยะใกล้สุดที่ทำการวัดลำไอออน พบว่าขนาดของลำไอออนที่วัดได้มีขนาดเล็กกว่าในกรณีที่ไม่ได้ทำการโฟกัสลำไอออนดังแสดงไว้ในรูปที่ 33 และ 34 เมื่อถอย screen ห่างจากแหล่งกำเนิดมากขึ้น ขนาดของลำไอออนจะมีขนาดเล็กลงในขณะที่ค่ากระแสไอออนสูงสุด (Maximum Ion current) มีค่ามากขึ้นด้วย แต่ถ้าถอยห่างออกไปอีกจนพ้นระยะโฟกัส จะพบว่าขนาดของลำไอออนมีขนาดใหญ่ขึ้นและกระแสที่จุดสูงสุดมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว

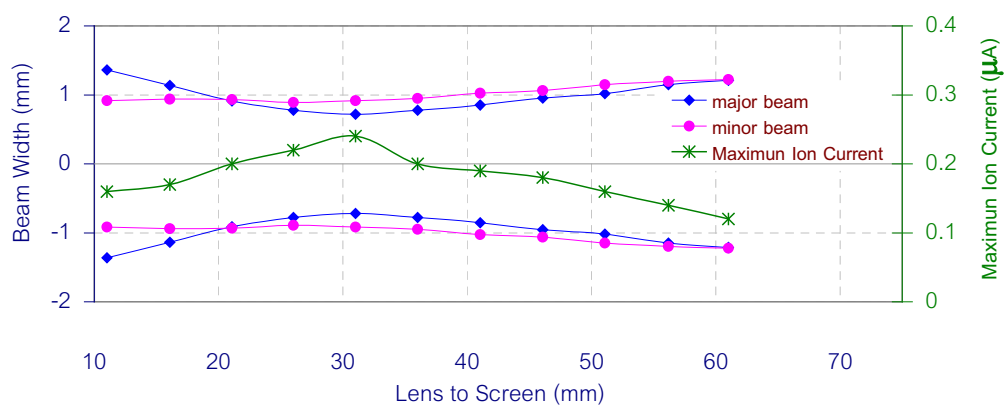
เมื่อนำผลการวัดขนาดและค่ากระแสของลำไอออนที่ผ่านระบบการโฟกัสทุกจุดมาพล็อตเทียบกับระยะทาง จะได้กราฟดังรูปที่ 66



รูปที่ 65 Ion Current Contour ของลำไอออนพลังงาน 1200 eV และ lens potential (V_L) 1600 V เมื่อ screen ห่างจากเลนส์ตัวสุดท้าย 11 , 21, 31, 41, 51 และ 61 mm ตามลำดับ

Trajectory of the ions at beam energy 1200 eV with emission current 20 mA from lens system:

2-common center electrodes at positive potential 1600 V



รูปที่ 56 เส้นทางเดินของลำไอออนเมื่อเคลื่อนที่ออกมาจากชุดเลนส์ที่ระยะต่าง ๆ เมื่อ beam energy = 1200 eV และ $V_L = 1600$ V

จากกราฟรูปที่ 66 เส้นกราฟ—◆— และ —●— แสดงขนาดของลำไอออน (major และ minor beam) ที่เปลี่ยนไปตามระยะที่ detector ถอยห่างออกจากแหล่งกำเนิดมากขึ้น สำหรับ

เส้นกราฟ—*—แสดงถึงขนาดของค่ากระแสไอออนสูงสุด (Maximum Ion current) ที่เปลี่ยนตามระยะของ detector ให้ห่างออกจากแหล่งกำเนิดมากขึ้นเช่นกัน

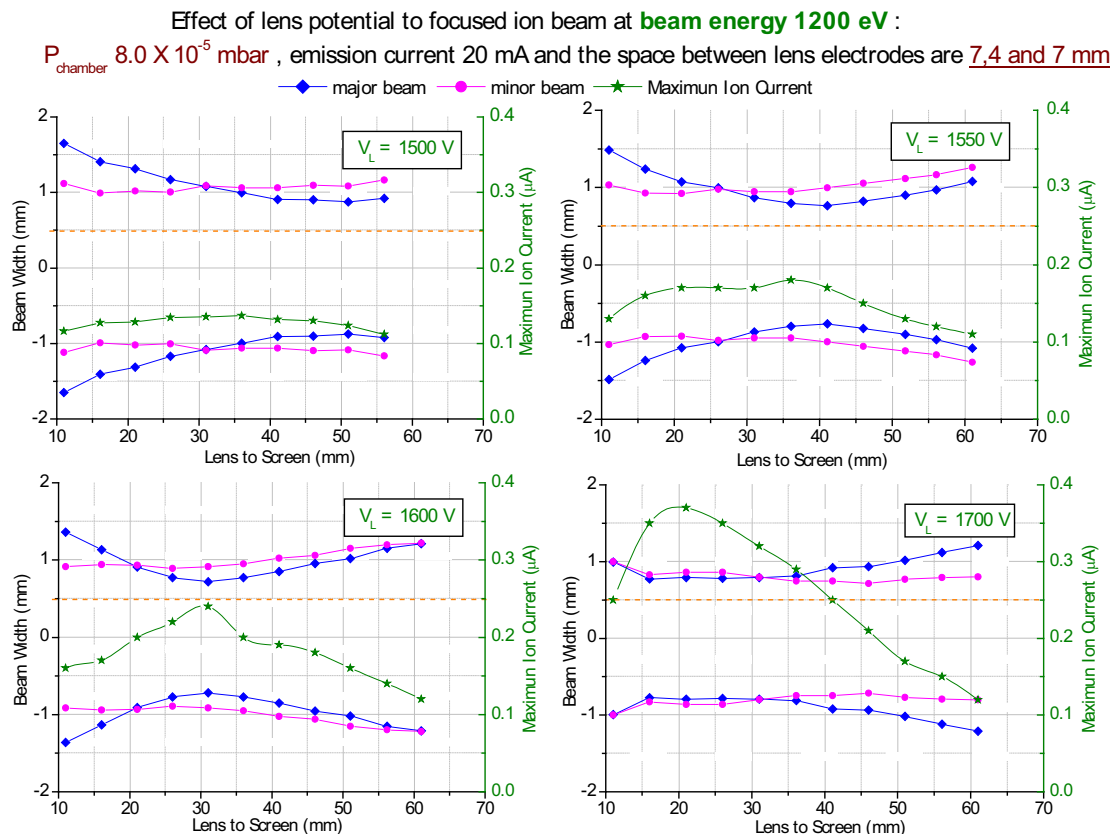
จากกราฟจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อถึงระยะโพกัสขนาดของลำไอออนจะมีขนาดเล็กที่สุดและกระแสไอออนสูงสุดที่วัดได้จากตำแหน่งนี้จะมีค่ามากที่สุดด้วย แต่หลังจากจุดระยะโพกัสแล้ว ขนาดของกระแสไอออนสูงสุดจะมีขนาดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับขนาดลำไอออนที่ค่อย ๆ ใหญ่ขึ้น (ผลรวมของจำนวนไอออนทั้งหมดที่วัดได้มีค่าเท่ากันตลอดระยะทาง) แต่จากยังพบว่าด้วยว่า minor beam ได้รับผลกระทบจากโวลเตจของเลนส์น้อยกว่า major beam

เมื่ออนุภาคที่เป็นไอออนวิ่งผ่านสนามไฟฟ้าของชุดเลนส์ชุดนี้ ซึ่งทำการต่อขั้วไฟฟ้าสองขั้วกลางให้มีศักย์เป็นบวก ในขณะที่สองขั้วด้านนอกต่อลงกราวด์ การต่อขั้วไฟฟ้าในลักษณะดังกล่าว จะทำให้แรงกระทำทางไฟฟ้าโดยรวมของชุดเลนส์ที่มีต่อไอออนมีทิศทางพุ่งเข้าหา optical axis (converging lens) ดังนั้นเมื่อทำการโพกัสลำไอออนด้วยชุดเลนส์จะทำให้เกิดตำแหน่งที่ลำไอออนมีขนาดเล็กที่สุดและในขณะเดียวกันที่ตำแหน่งนั้นสามารถวัดค่ากระแสสูงสุดได้มากที่สุดด้วย ที่จุดนี้จึงเรียกว่า ระยะโพกัส แต่หลังจากระยะโพกัส ค่าของกระแสไอออนสูงสุดจะลดลงและขนาดของลำไอออนมีขนาดใหญ่ขึ้นทั้งนี้เกิดเนื่องจาก เมื่ออนุภาคซึ่งมีจำนวนเท่าเดิมมารวมอยู่ในพื้นที่ที่มีขนาดเล็กลง (ความหนาแน่นของอนุภาคต่อหน่วยพื้นที่มีค่ามากขึ้น) ก็จะส่งผลทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันอย่างแรง จึงทำให้ลำไอออนมีขนาดใหญ่ขึ้นและขนาดของกระแสสูงสุดที่วัดได้ก็จะมีค่าน้อยลงด้วย (จำนวนอนุภาคในลำไอออนยังคงเท่าเดิม)

จากกราฟนี้เห็นได้อีกอย่างว่า เมื่อ minor beam วิ่งออกมาจากชุดเลนส์ค่อนข้างจะเป็น parallel beam ทั้งนี้เกิดจากผลกระทบของ sleeve electrode โดยเมื่อ beam วิ่งออกมาจาก sleeve electrode นั้นมี beam width และ divergence angle น้อยกว่าเมื่อวิ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดโดยตรง (ผลของ sleeve electrode ที่มีต่อ divergence angle แสดงดังรูปที่ 51) จึงทำให้ beam มีจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ใกล้ ๆ กับ optical axis ของชุดเลนส์ ซึ่งสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ ๆ กับ optical axis นั้นจะมี equipotential line ที่ตั้งฉากกับ optical axis จึงทำให้แรงกระทำทางไฟฟ้าที่มีต่ออนุภาคมีทิศทางที่ขนานไปกับ optical axis ส่งผลทำให้ลำไอออนที่วิ่งอยู่บริเวณใกล้ ๆ กับ optical axis เกิดเป็น parallel beam ขึ้นได้

สำหรับ major beam เนื่องจากมี beam width และ divergence angle ที่มากกว่า minor beam จึงทำให้ major beam น่าจะวิ่งอยู่ในบริเวณที่ห่างจาก optical axis ออกไปอีก ซึ่งสนามไฟฟ้ามีความแรงมากกว่าในบริเวณที่ใกล้ ๆ กับ optical axis และ equipotential line ยังทำมุมกับ optical axis ซึ่งมีทิศทางของแรงที่กระทำต่อไอออนพุ่งเข้าหา optical axis (converging lens) จึงส่งผลทำให้ลำไอออนที่วิ่งผ่านบริเวณถูกโพกัสให้มีขนาดลำไอออนที่เล็กลงได้

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนโวลเตจที่ป้อนให้กับชุดเลนส์เพื่อดูผลกระทบที่มีต่อ beam width และ focal length ของลำไอออน การทดลองทำด้วยเงื่อนไขเหมือนเดิม beam energy ยังคงมีค่า 1200 eV ทำการเปลี่ยน V_L อีก 3 ค่าด้วยกัน คือ 1500 , 1550 และ 1700 V ผลการทดลองเป็นดังนี้



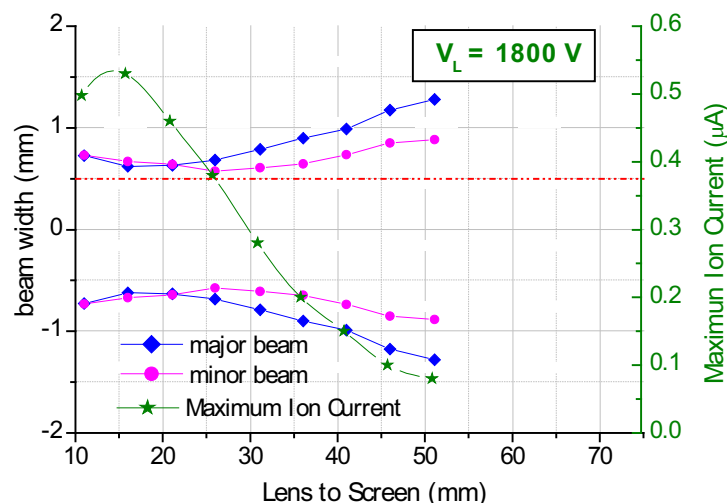
รูปที่ 67 ผลกระทบของโวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 (V_L) ของชุดเลนส์ที่มีต่อ beam width , maximum ion current , ระยะโฟกัส และ focal length เมื่อ beam energy มีค่า 1200 eV , $V_L = 1500$, 1550 , 1600 และ 1700 eV

จากรูปที่ 67 เห็นได้ว่าเมื่อค่าโวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 เปลี่ยนไป ขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัส , ตำแหน่งของจุดโฟกัส และ ค่ากระแสสูงสุดที่วัดได้ของแต่ละจุด ในแต่ละกรณีจะแตกต่างกันด้วย โดยยิ่งเพิ่มค่า V_L ให้มีค่ามากขึ้น ขนาดลำไอออนที่ lens system สามารถบีบได้จะมีขนาดเล็กลง แต่ระยะโฟกัสจะเลื่อนเข้ามาอยู่ใกล้กับเลนส์มากขึ้น และ ค่ากระแสสูงสุดที่จุดโฟกัสมีค่ามากขึ้นด้วย

สาเหตุที่เป็นเช่นเพราะว่า เมื่อเพิ่ม V_L มากขึ้นจะทำให้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าของ lens system เปลี่ยนไป โดยจะทำให้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อลำไอออนมีมากขึ้น ส่งผลทำให้มีแรงกระทำที่จะเอาชนะ Coulomb force มากขึ้น ทำให้เมื่อเพิ่ม V_L มากขึ้นลำไอออนที่วัดได้

จะมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังทำให้ equipotential line มีความโค้งมากขึ้น แรงกระทำทางไฟฟ้าที่มีต่อไอออนในลักษณะดังกล่าวทำให้ไอออนวิ่งเข้าหา optical axis เร็วขึ้น (focal length สั้นลง) เมื่อ focal length สั้นลง ขนาดของลำไอออนที่ออกจากเลนส์ชั้นสุดท้ายก็จะมีขนาดเล็กลง จึงทำให้มีไอออนที่วิ่งเข้าชนเลนส์ตัวสุดท้ายน้อยลงด้วย (ซึ่งสังเกตได้จากการวัดกระแสที่วิ่งเข้าเลนส์ตัวสุดท้าย) จึงทำให้จำนวนไอออนที่วิ่งออกไปจากเลนส์มีจำนวนมากขึ้นด้วย จึงทำให้สามารถวัดกระแสไอออนได้สูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่ม V_L ให้มากขึ้น

หลังจากนั้นจึงได้ตั้งข้อสงสัยว่า ถ้าเพิ่ม V_L ขึ้นอีก ระยะโฟกัสก็น่าจะเลื่อนเข้ามาอยู่ใกล้กับเลนส์หรืออาจอยู่ภายในเลนส์ก็ได้ รวมทั้งระดับกระแสสูงสุดที่วัดได้ก็น่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีก ในขณะที่ขนาดของลำไอออนที่ระยะโฟกัสน่าจะมีขนาดเล็กลงอีก การทดลองโดยเพิ่ม V_L เป็น 1800 V ได้ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 68 ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามที่ได้คาดเอาไว้



รูปที่ 68 ผลกระทบของโวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 (V_L) ของชุดเลนส์ที่มีต่อ beam width , maximum ion current , ระยะโฟกัส และ focal length เมื่อ beam energy มีค่า 1200 eV และ $V_L = 1800$ V

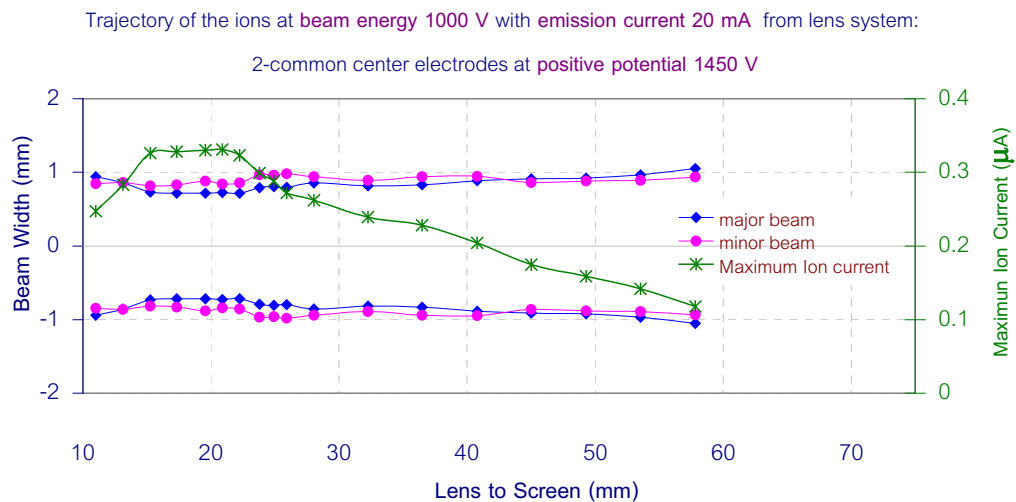
จากผลการทดลองเห็นได้ว่า minor beam เริ่มได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าของ lens system มากขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่า minor beam เริ่มมีการโฟกัสให้เห็นบ้างแล้ว ทั้งนี้เกิดขึ้นจากระดับโวลเตจของชุดเลนส์มีค่ามากขึ้น จนทำให้ equipotential line บริเวณใกล้กับ optical axis เริ่มทำมุมกับ optical axis ขึ้นมาบ้างเล็กน้อย

จากการทดลองยังพบอีกว่าถ้าเพิ่มระดับโวลเตจให้กับขั้วที่ 2 และ 3 มากขึ้นอีก จะพบว่า ไม่สามารถวัดค่ากระแสไอออนที่ Faraday cup ได้เลย ทั้งนี้อธิบายได้ว่า เนื่องจาก เลนส์ชนิดนี้มีบริเวณของสนามไฟฟ้า 2 แบบ ด้วยกัน คือ ช่วง diverging region และ converging

region สำหรับ diverging region ซึ่งจะอยู่ในช่วงแรกของชุดเลนส์ จะมีเฉพาะอนุภาคที่มีพลังงานมากกว่าระดับศักย์ในบริเวณนั้นเคลื่อนที่ผ่านออกไปได้เท่านั้น จึงทำให้เมื่อเพิ่ม V_L จนถึงค่าหนึ่งจะไม่มียุคอนุภาคตัวใดวิ่งเข้ามาในจากระบบเลนส์ได้ (V_L เป็นบวกสูงมากเมื่อเทียบกับ beam energy)

- ผลการวัด beam divergence ของ focused ion beam เมื่อ beam energy = 1000 eV

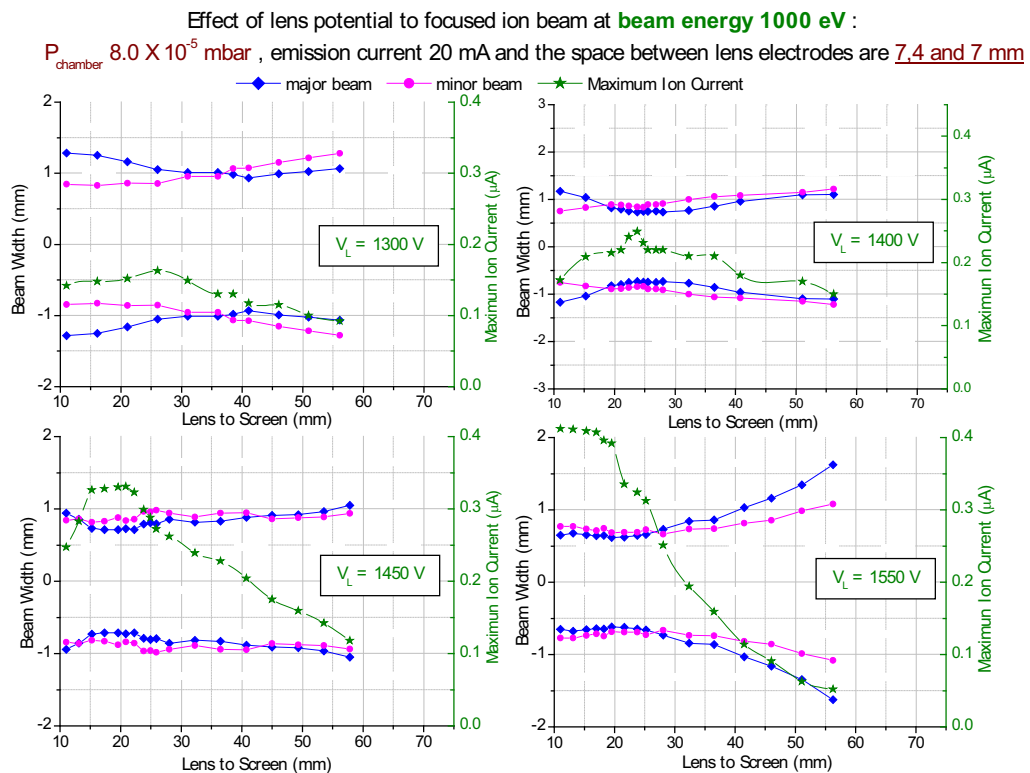
ผลการวัดขนาดลำไอออนซึ่งผ่าน focusing system ที่ระยะต่าง ๆ โดยที่ beam energy มีค่า 1000 eV และทำการป้อนโวลเตจให้กับขั้วที่ 2 และ 3 ของเลนส์ 1450 V แสดงดังรูปที่ 69



รูปที่ 69 เส้นทางเดินของลำไอออนในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านชุดเลนส์ออกมาที่ระยะต่าง ๆ เมื่อ beam energy = 1000 eV และ $V_L = 1450$ V

จากกราฟซึ่งแสดงเส้นทางเดินของลำไอออนในรูปที่ 69 เห็นได้ major beam และ minor beam มี ระยะโฟกัส ค่อนข้างจะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ทำให้ค่ากระแสสูงสุดมีค่าคงที่ได้ ช่วงระยะทางที่ยาวมากขึ้นไม่ลดลงอย่างทันทีทันใด สาเหตุหลักที่ทำให้ค่ากระแสสูงสุดลดลงอย่างรวดเร็วมาจาก major beam และ minor beam มี ระยะโฟกัส คนละตำแหน่งกัน

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนโวลเตจที่ป้อนให้กับชุดเลนส์เพื่อศึกษาถึง ผลกระทบที่มีต่อ beam width และ focal length ของลำไอออนในขณะที่ beam energy มีค่าเป็น 1000 eV โดยทำการเปลี่ยน V_L อีก 3 ค่าด้วยกัน คือ 1300 , 1400 และ 1550 V ผลการทดลอง เป็นดังกราฟรูปที่ 70



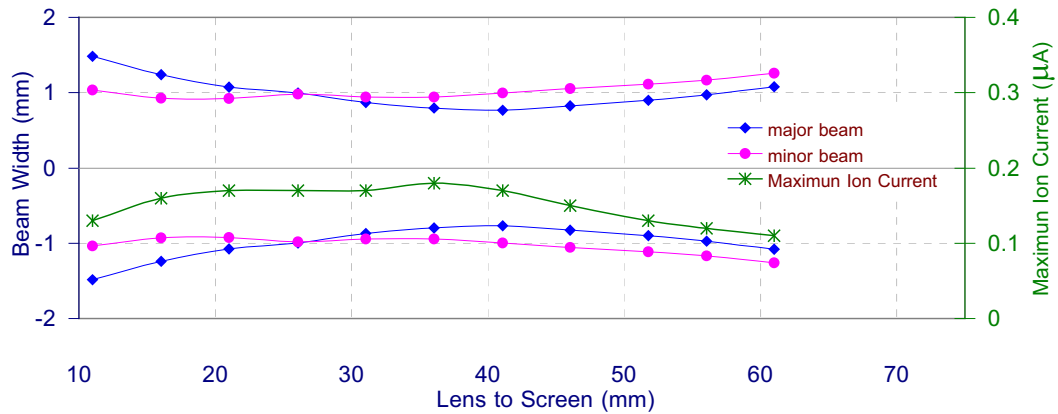
รูปที่ 70 ผลกระทบของโวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 (V_L) ของชุดเลนส์ที่มีต่อ beam width , maximum ion current , ระยะโฟกัส และ focal length เมื่อ beam energy = 1000 eV และ $V_L = 1300$, 1400 , 1450 และ 1550 V

นอกจากนี้จากกราฟในรูปที่ 67 และ 70 จะเห็นได้ว่ามีกรณีที่โวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 เท่ากันคือ $V_L = 1550$ V จากทั้งสองกรณีจะเห็นได้ว่า ในขณะที่โวลเตจที่ป้อนให้ขั้วที่ 2 และ 3 เท่ากัน แต่ trajectory ของ ลำไอออนไม่เหมือนกัน เพื่อให้เห็นข้อแตกต่างได้ชัดเจนขึ้นมากขึ้นจึงได้นำกราฟมาเปรียบเทียบกับกันดังรูปที่ 71

จากกราฟรูปที่ 71 (a) และ (b) เห็นได้ว่า เมื่อลำไอออนเคลื่อนที่ผ่านชุดเลนส์มีระดับพลังงานที่แตกต่างกัน ในขณะที่ V_L ของชุดเลนส์ยังคงเดิม จะส่งผลทำให้เส้นทางเดินของลำไอออนเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน จากรูปที่ 71 (a) จะเห็นได้ว่าลำไอออนซึ่งมี beam energy 1200 eV มี ระยะโฟกัส อยู่ห่างจากเลนส์ประมาณ 40.5 mm ในขณะที่ beam energy มีค่า 1000 eV ขนาดของลำไอออนที่ออกมาจากเลนส์เป็น beam ที่ค่อนข้างขนานแล้วค่อยบานออกในระยะต่อมาดังรูปที่ 71 (b) ถ้าพิจารณาจากจุดที่ beam บานออกพบว่าจุดโฟกัสจะต้องอยู่ห่างจากเลนส์น้อยกว่า 31.0 mm มาก

Trajectory of the ions at beam energy 1200 eV with emission current 20 mA from lens system:

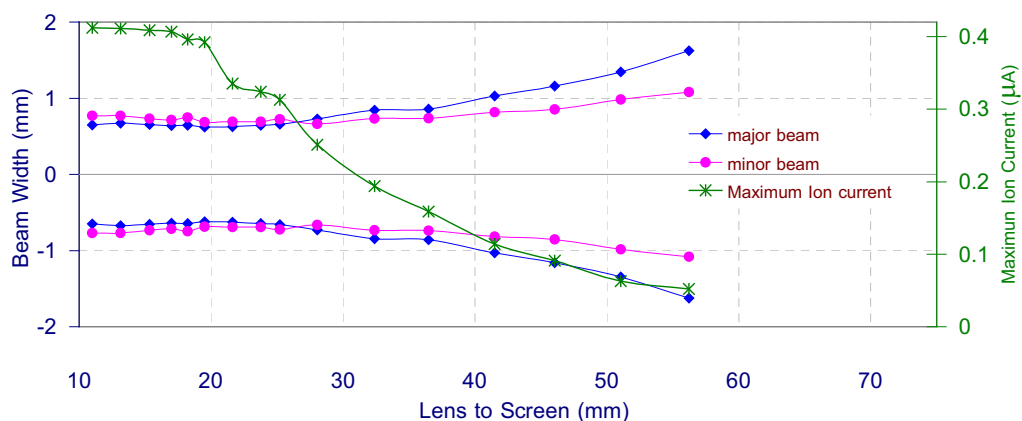
2-common center electrodes at positive potential 1550 V



(a) : beam energy 1200 eV

Trajectory of the ions at beam energy 1000 eV with emission current 20 mA from lens system:

2-common center electrodes at positive potential 1550 V



(b) : beam energy 1000 eV

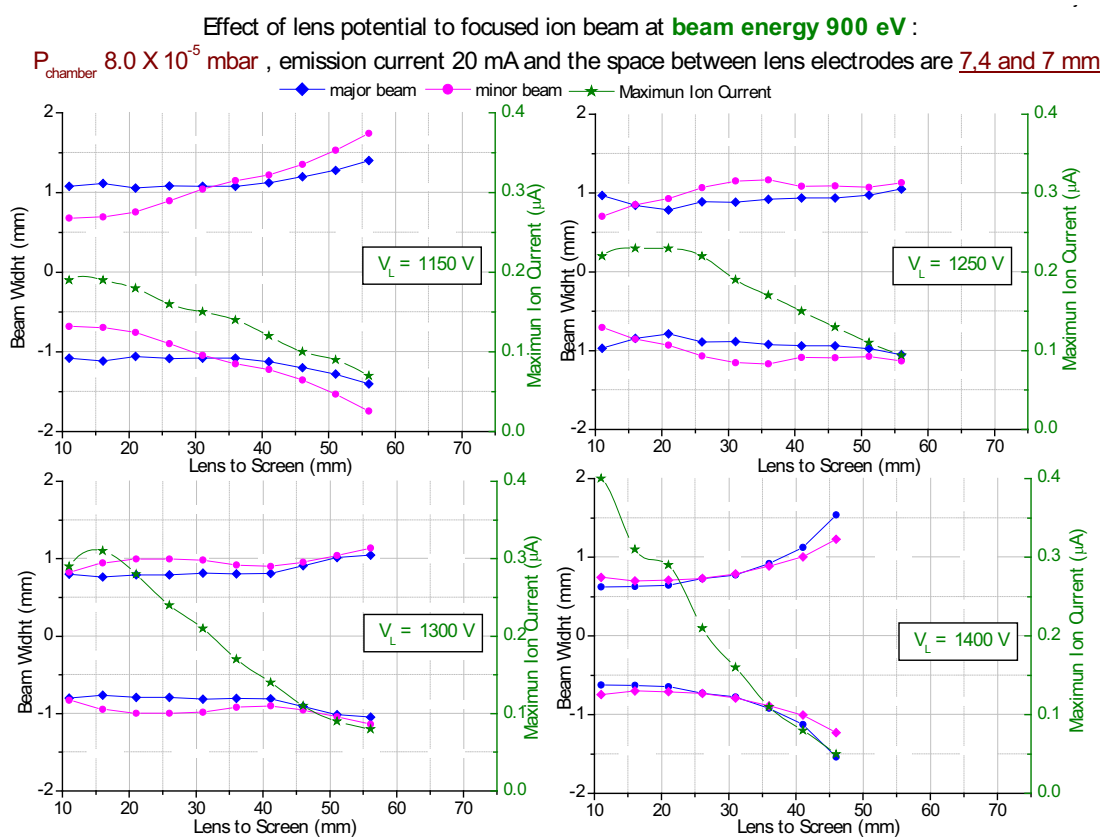
- รูปที่ 71** (a) เส้นทางเดินของลำไอออนขณะที่ลำไอออนเคลื่อนที่ผ่านเลนส์ตัวสุดท้ายออกมาที่ระยะต่าง ๆ เมื่อ $V_L = 1550$ V และ beam energy 1200 eV
 (b) เส้นทางเดินของลำไอออนขณะที่ลำไอออนเคลื่อนที่ผ่านเลนส์ตัวสุดท้ายออกมาที่ระยะต่าง ๆ เมื่อ $V_L = 1550$ V และ beam energy 1000 eV

สาเหตุที่ทำให้ลำไอออนมีเส้นทางเดินเปลี่ยนไป เมื่อ beam energy เปลี่ยนไป ในขณะที่ V_L มีค่าคงเดิม เป็นเพราะว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายในชุดเลนส์ (ทิศของแรงกระทำค่อย ๆ พุ่งเข้าหา optical axis) ที่มีต่อลำไอออนที่มีพลังงานสูงจะน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ

อิทธิพลที่มีต่อลำไอออนที่มีพลังงานน้อยกว่า ดังนั้นลำไอออนที่มีระดับพลังงานน้อยกว่าจึงถูกบีบและเบี่ยงเบนได้ง่ายและเร็วกว่า จึงทำให้มีขนาดลำไอออนที่เล็กกว่า และ ระยะโฟกัสจะอยู่ใกล้กับชุดเลนส์มากกว่า

- ผลการวัด beam divergence ของ focused ion beam เมื่อ beam energy = 900 eV

ผลการวัดขนาดลำไอออนซึ่งผ่าน focusing system ที่ระยะต่าง ๆ โดยที่ beam energy มีค่า 900 eV และทำการป้อนโวลเตจให้กับขั้วที่ 2 และ 3 ของเลนส์ 1150 , 1250 , 1300 และ 1400 V แสดงดังรูปที่ 72

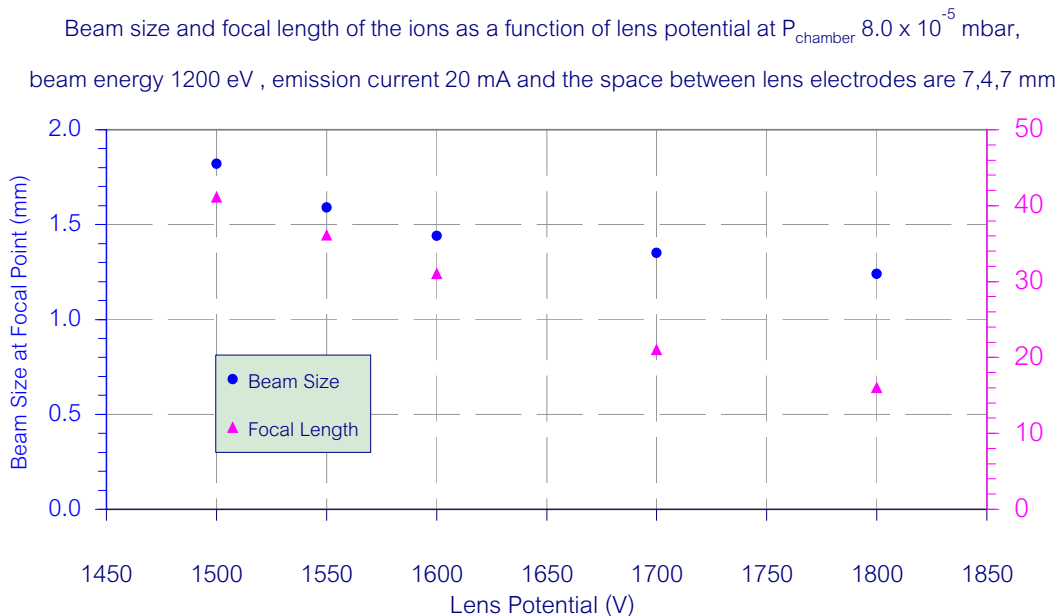


รูปที่ 72 ผลกระทบของโวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 (V_L) ของชุดเลนส์ที่มีต่อ beam width , maximum ion current , ระยะโฟกัส และ focal length เมื่อ beam energy = 900 eV และ $V_L = 1150$, 1250 , 1300 และ 1400 V

จากการศึกษาและวัดเส้นทางเดินของลำไอออนในขณะที่ลำไอออนมีค่า beam energy แตกต่างกันหลายค่าดังแสดงในรูปที่ 67 , 70 และ 72 พบว่าเมื่อถ้า beam energy มีค่าเปลี่ยนไป ระดับโวลเตจที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ก็จะต้องมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

เมื่อนำขนาดของจุดโฟกัส major beam และ ระยะโฟกัส มาพล็อต กราฟเทียบกับโวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 สำหรับลำไอออนมี beam energy 1200 eV จะได้กราฟดังรูปที่

73



รูปที่ 73 ขนาดของลำไอออน ณ จุดโฟกัส (ระยะโฟกัส) และ ระยะความยาวโฟกัส (focal length) ซึ่งเปลี่ยนไประดับโวลเตจที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ เมื่อลำไอออนมีพลังงาน 1200 eV และ ระยะห่างระหว่างขั้วเลนส์มีค่าเป็น 7 , 4 และ 7 mm

จากกราฟรูปที่ 73 จะเห็นได้ว่าเมื่อ V_L มีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของจุดโฟกัส จะมีขนาดเล็กลง แต่ตำแหน่งของระยะโฟกัสหรือระยะโฟกัส จะอยู่ใกล้กับชุดเลนส์มากขึ้นหรืออาจอยู่ภายในชุดเลนส์ก็ได้ สำหรับลำไอออนที่ระดับพลังงานอื่นก็แสดงพฤติกรรมแบบนี้เช่นกัน

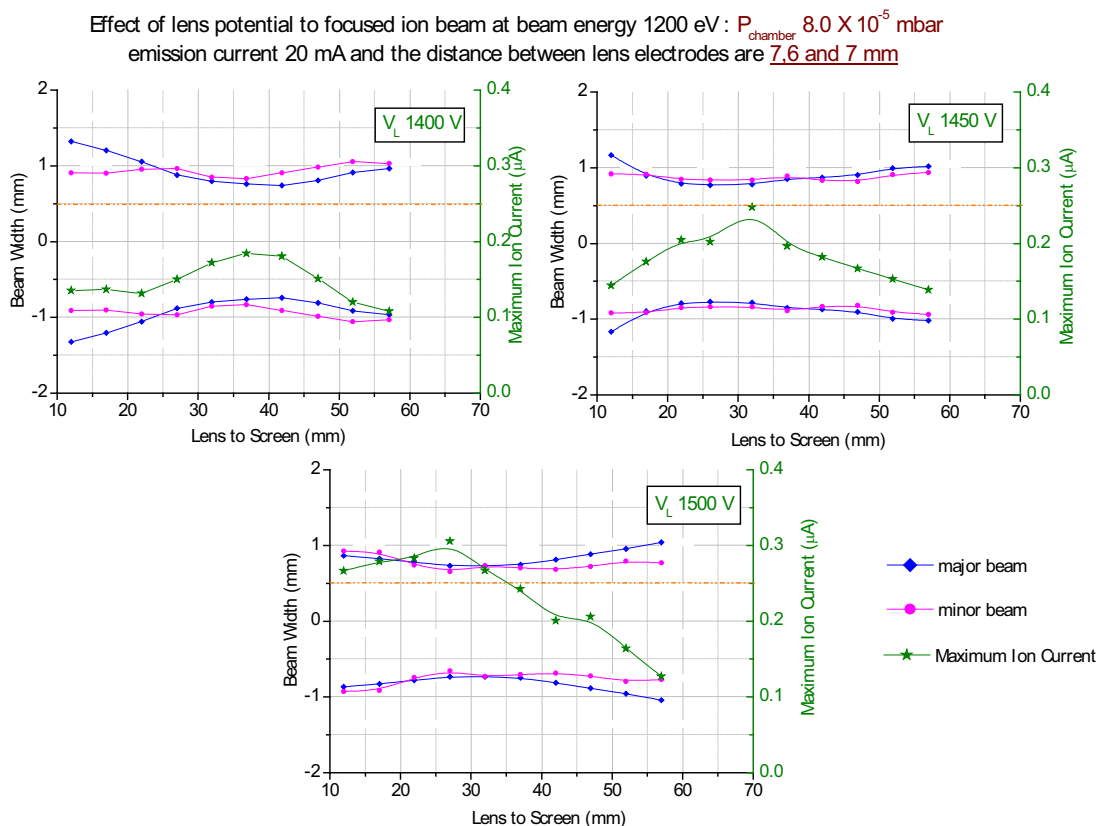
3.2 The space between lens electrodes and lens system length effect

จุดประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วเลนส์ที่มีต่อระยะโฟกัสและขนาดของลำไอออนมีขึ้น เพื่อทำศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วเลนส์ที่เหมาะสมกับระบบการโพกัสลำไอออน

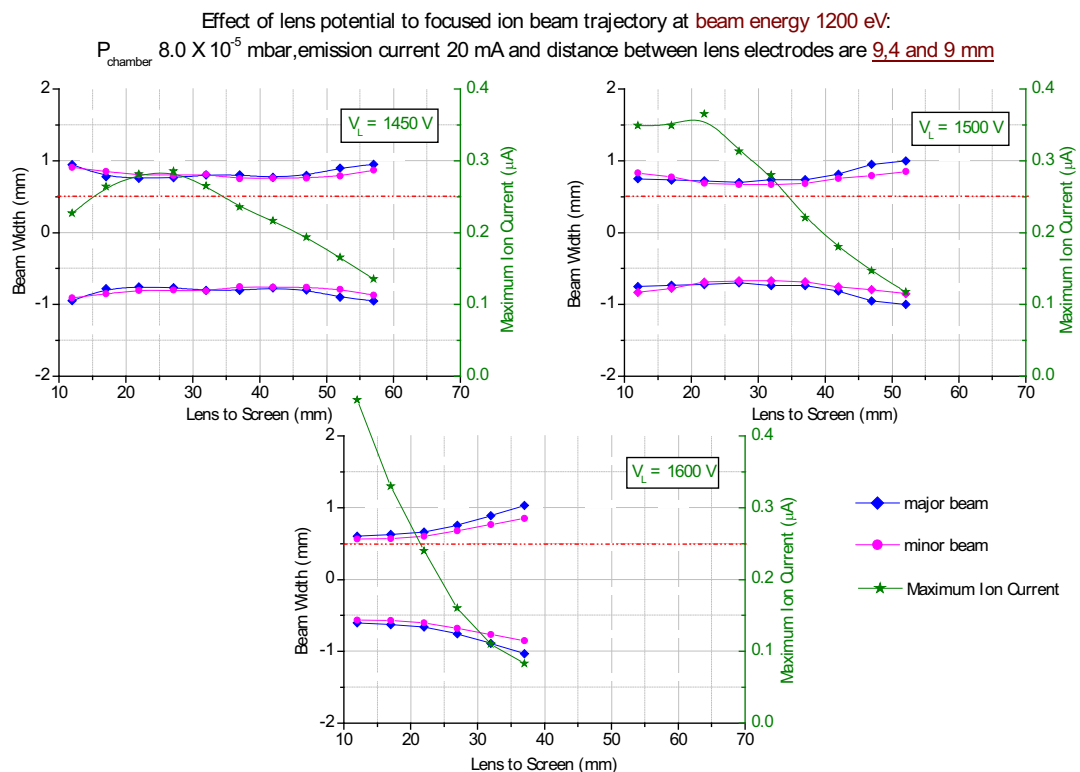
การทดลองเพื่อทำการศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วเลนส์และความยาวรวมของระบบเลนส์ ทำได้โดยการจัดระบบดังไดอะแกรมดังรูปที่ 60 โดยทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเลนส์ จาก 7 , 4 , 7 เป็น 7 , 6 , 7 mm กับ 9 , 4 , 9 mm และ ต่อดวงจรวัดไฟฟ้างดรูปที่ 63 โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- Circular aperture on mask $\varnothing$ 1 mm
- $P_{\text{main chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar
- emission current of ion gun 20 mA
- scan step 0.3 mm
- scan area : x = 9 – 18 mm , y = 9 – 18 mm
- screen อยู่ห่างจากเลนส์ 11 mm ที่ระยะแรกของการวัดขนาด
- beam energy 1200 eV
- $V_L = 1600$ V เมื่อ ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7,4 และ 7 mm
- $V_L = 1450$ V เมื่อ ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7,6 และ 7 mm
- $V_L = 1700$ V เมื่อ ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7,4 และ 7 mm
- $V_L = 1500$ V เมื่อ ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 9,4 และ 9 mm

ผลการทดลองแสดงดังในกราฟรูปที่ 67 , 74 และ 75



รูปที่ 74 ผลกระทบของโวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 (V_L) ของชุดเลนส์ที่มีต่อ beam width , maximum ion current , ระยะโฟกัส เมื่อ beam energy มีค่า 1200 eV , $V_L = 1400$, 1450 และ 1500 V และ เมื่อระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7 , 6 และ 7 mm

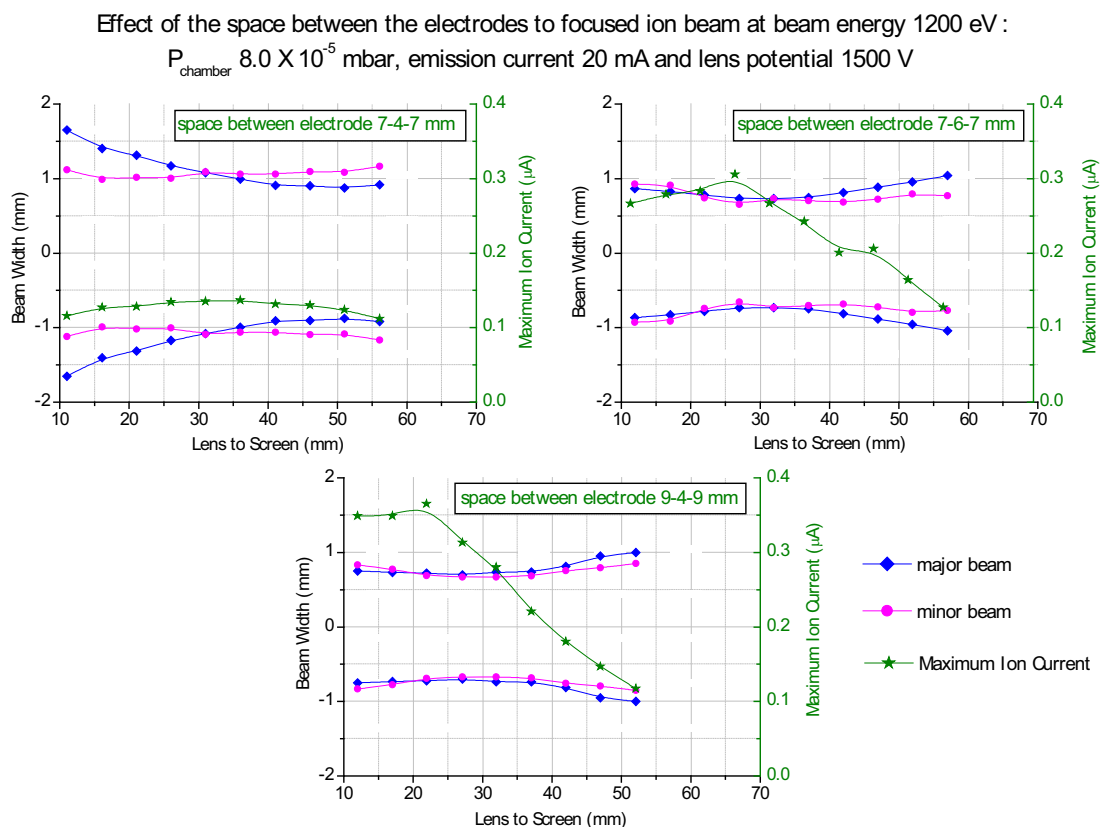


รูปที่ 75 ผลกระทบของโวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 (V_L) ของชุดเลนส์ที่มีต่อ beam width , maximum ion current , ระยะโฟกัส เมื่อ beam energy มีค่า 1200 eV และ $V_L = 1450$, 1500 และ 1600 V และ เมื่อระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 9 , 4 และ 9 mm

จากผลการทดลองในรูปที่ 67 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างเลนส์ 7,4,7 mm และ รูปที่ 74 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างเลนส์ 7,6,7 mm จะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการได้ลำไอออนที่มีระยะโฟกัส 31 mm จะต้องทำการป้อนโวลเตจให้กับชุดเลนส์ 1600 และ 1450 V ตามลำดับ และ จากผลการทดลองในรูปที่ 67 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างเลนส์ 7,4,7 mm และ รูปที่ 75 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างเลนส์ 9,4,9 mm ถ้าต้องการได้ลำไอออนที่มีระยะโฟกัส 21 mm จะต้องทำการป้อนโวลเตจให้กับชุดเลนส์ 1700 V และ 1500 V ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์มีค่ามากขึ้น ส่งผลทำให้ระดับโวลเตจที่ป้อนให้กับชุดเลนส์มีค่าลดลง โดยที่ขนาดของลำไอออน และ ion current density ณ จุดโฟกัสยังคงมีค่าเท่าเดิม

นอกจากนี้ จากกราฟรูปที่ 74 และ 75 จะเห็นได้ว่าเมื่อ V_L มีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของจุดโฟกัส จะมีขนาดเล็กลง แต่ตำแหน่งของระยะโฟกัส จะอยู่ใกล้กับชุดเลนส์มากขึ้นหรืออาจอยู่ภายในชุดเลนส์ก็เป็นได้ ซึ่งยังคงได้ความสัมพันธ์ระหว่าง lens potential กับ ขนาดของลำไอออน ณ จุดโฟกัส และ ระยะโฟกัส เช่นเดิม

เพื่อที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความยาวของชุดเลนส์มีผลต่อจุดและระยะโฟกัสจึงได้ออกแบบการทดลอง โดยทำการวัดเส้นทางเดินของลำไอออนซึ่งผ่าน focusing system ที่ระยะต่าง ๆ โดยที่ beam energy มีค่า 1200 eV และ ทำการป้อนโวลเตจให้กับขั้วที่ 2 และ 3 ของเลนส์ (V_L) 1500 V เมื่อระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7,4 ,7 mm , 7,6 ,7 mm และ 9,4,9 mm โดยความยาวรวมของ focusing system มีค่าเป็น 24 , 26 และ 28 mm ตามลำดับ ผลการวัดเส้นทางเดินของลำไอออนแสดงดังรูป 76



รูปที่ 76 ผลของระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์และความยาวของระบบการโฟกัสที่มีต่อตำแหน่งของจุดโฟกัสของลำไอออน เมื่อ beam energy 1200 eV , $P_{\text{chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar และ $V_L = 1500$ V

จากกราฟรูปที่ 76 เห็นได้ว่า เส้นทางเดินของลำไอออน ขนาดของลำไอออน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ และ ตำแหน่งของจุดโฟกัสมีค่าลดลงเมื่อความยาวของชุดเลนส์มีค่ามากขึ้น

ปรากฏการณ์ดังกล่าวอธิบายได้ว่า เมื่อความยาวของชุดเลนส์มากขึ้น ทำให้อนุภาคต้องเคลื่อนที่ภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสนามไฟฟ้าของระบบเลนส์เป็นเวลานาน จึงถูกเบี่ยงเบนไปมากกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคที่เคลื่อนที่ในระบบเลนส์ที่สั้นกว่า (ในกรณีที่อนุภาคมีระดับพลัง

งานเท่ากัน) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ ลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านชุดเลนส์ที่มีความยาวมากกว่ามีระยะโฟกัสสั้นกว่าลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านชุดเลนส์ที่มีความยาวน้อยกว่า

สรุปได้ว่า เมื่อต้องการให้ระยะโฟกัสและขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัสเท่าเดิม ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์มากขึ้นจะต้องใช้โวลเตจในการโฟกัสต่ำลง

นอกจากนี้จากกราฟรูปที่ 76 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการป้อน V_L 1500 V ให้กับระบบเลนส์ที่มีระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7,4,7 mm หลังจากที่ลำไอออนเคลื่อนที่ห่างจาก screen มากกว่า 35 mm แล้ว ลำไอออนจะค่อนข้างเป็นลำขนาน แต่ถ้าป้อน V_L 1500 V ให้กับระบบเลนส์ 7,6,7 mm เมื่อผ่านจุดโฟกัสที่ระยะ 26 mm ไปแล้วลำไอออนจะลู่ออกทันที จากการศึกษาและผลการทดลองในเรื่องของ lens potential effect ที่ผ่านมานั้น พบว่าถ้าทำการลด lens potential จนถึงระดับหนึ่งก็จะสามารถทำให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านระบบเลนส์นั้นเป็น parallel beam ได้ นั่นหมายความว่า ถ้าต้องการได้ลำไอออนที่เป็น parallel beam จากระบบเลนส์ 7,6,7 mm แล้ว ก็ต้องใช้ lens potential ที่น้อยกว่า 1500 V ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบเลนส์ 7,4,7 mm ต้องใช้โวลเตจในการโฟกัสมากกว่าระบบเลนส์ 7,6,7 mm

จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 76 ยังพบอีกว่า ลำไอออนที่ได้จากระบบเลนส์ที่มีความยาวระหว่างเลนส์เป็น 7,6,7 mm มีระยะโฟกัส 26 mm ในขณะที่ลำไอออนที่ได้จากระบบเลนส์ 9,4,9 mm จะมีระยะโฟกัสเพียง 21 mm แต่ขนาดของลำไอออน ณ จุดโฟกัสที่ได้จากระบบเลนส์ทั้งสองเท่ากัน ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระบบเลนส์ 7,6,7 mm มีประสิทธิภาพของการโฟกัสที่ดีกว่าระบบเลนส์ 9,4,9 mm

เมื่อทำการทดลองการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเลนส์ด้วยกัน 3 แบบ คือ

1. ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7 , 4 และ 7 mm
2. ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7 , 6 และ 7 mm
3. ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 9 , 4 และ 9 mm

พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์มีค่าเป็น 7 , 6 และ 7 mm จะใช้โวลเตจในการโฟกัสน้อยกว่ารวมทั้งมีประสิทธิภาพในการโฟกัสมากกว่าระบบเลนส์ที่มีระยะห่างเป็น 7,4,7 และ 9,4,9 mm ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงขอเลือกใช้ระบบเลนส์ที่มีระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7,6 และ 7 mm

3.3 Pressure Effect to Ion Beam Trajectory

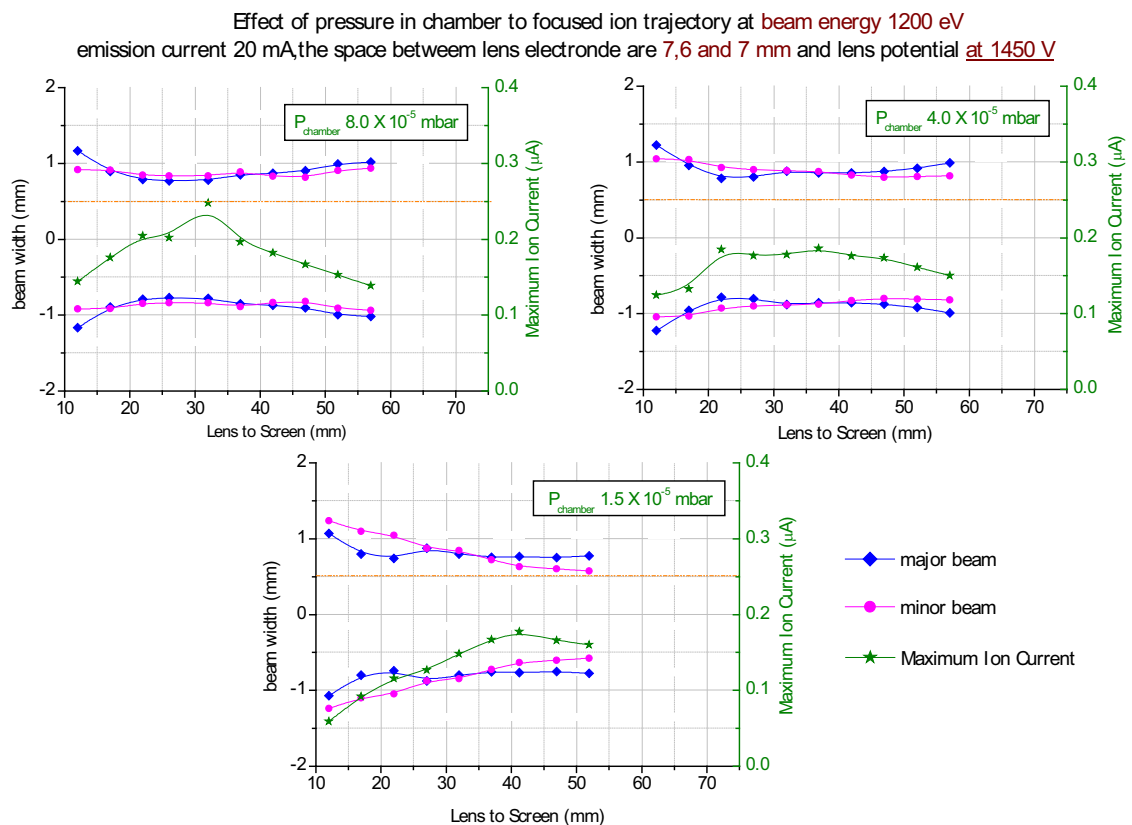
เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะต้องทำการเบี่ยงเบนลำไอออนด้วย scanning system ซึ่งเป็น deflection plate คุณสมบัติของลำไอออนที่ใช้กับ scanning system นั้นควรมีจุดโฟกัสอยู่บน screen นั้นหมายความว่า ระยะโฟกัสของลำไอออนควรยาวกว่า scanning system ซึ่ง scanning system ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (เฉพาะในแนวแกน x) จะมีความยาวรวมของระบบ ประมาณ 33 mm ดังนั้นระยะโฟกัสของลำไอออนควรจะยาวมากกว่า 40 mm แต่จากการผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าระยะโฟกัสที่ได้จาก focusing system นั้นมีระยะโฟกัสที่น้อยกว่า 40 mm

จากการพิจารณาถึงระดับความดันที่ใช้กับการทดลองที่ผ่านมาข้างต้นนั้น ระบบทำงานอยู่ที่ระดับความดัน 8.0×10^{-5} mbar ของ Ar gas ซึ่งมี mean free path ประมาณ 40 cm แต่ว่าระยะทางที่ไอออนจะต้องใช้เคลื่อนที่ตั้งแต่แหล่งกำเนิดจนถึง detector มีระยะทางประมาณ 25 cm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระยะ mean free path อยู่เพียง 15 cm ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถเพิ่มระยะโฟกัสของระบบเลนส์ได้ จึงได้ทำการทดลองที่ความดันต่ำกว่า 8.0×10^{-5} mbar อยู่ 2 ค่าด้วยกัน คือ 4.0×10^{-5} mbar และ 1.5×10^{-5} mbar ซึ่งจะทำให้ระบบมี mean free path เพิ่มขึ้นเป็น 89 และ 230 cm ตามลำดับ

การทดลองเพื่อศึกษา pressure effect ทำการทดลองโดยการจัดระบบดังไดอะแกรมรูปที่ 60 และต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 63 โดยเงื่อนไขในการทดลองมีดังนี้

- Circular aperture on mask $\varnothing$ 1 mm
- emission current of ion gun 20 mA
- scan step 0.3 mm
- scan area : x = 9 – 18 mm , y = 9 – 18 mm
- screen อยู่ห่างจากเลนส์ 11 mm ที่ระยะแรกของการวัดขนาด
- beam energy 1200 eV
- ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7,6 และ 7 mm
- $V_L = 1450$ V
- P_{chamber} 8.0×10^{-5} , 4.0×10^{-5} และ 1.5×10^{-5} mbar

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 77



รูปที่ 77 ผลของความดันระบบที่มีต่อเส้นทางเดินของลำไอออน เมื่อ beam energy 1200 eV, emission current 20 mA และ V_L 1450 V เมื่อ P_{chamber} มีค่าเป็น 8.0×10^{-5} , 4.0×10^{-5} และ 1.5×10^{-5} mbar ตามลำดับ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการทดลองที่ความดัน 8.0×10^{-5} mbar จะได้ระยะโฟกัสยาวประมาณ 31 mm แต่ ถ้าลดความดันลงเหลือ 4.0×10^{-5} และ 1.5×10^{-5} mbar จะได้ระยะโฟกัสที่ยาวขึ้นเป็น 36 และ 43 mm ตามลำดับ สำหรับที่ความดัน 1.5×10^{-5} mbar ขนาดลำไอออนที่จุดโฟกัสจะมีขนาดเล็กกว่ากรณีอื่นอีกด้วย

จากกราฟรูปที่ 77 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อความดันต่ำลงปริมาณไอออนสูงสุด ณ จุดโฟกัสมีค่าลดลง นอกจากนี้ถ้าคำนวณหากระแสไอออนรวมพบว่า ที่ความดันต่ำปริมาณไอออนรวมมีค่าลดลงด้วย ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก chamber ของแหล่งกำเนิดไอออนกับ chamber ของ focusing system เป็น chamber เดียวกัน การเปลี่ยนแปลงความดันภายในระบบของ focusing system จึงมีผลทำให้ความดันของแหล่งกำเนิดไอออนเปลี่ยนแปลงด้วย โดยเมื่อความดันของแหล่งกำเนิดไอออนต่ำลงจะส่งผลทำให้ไอออนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดมีปริมาณลดลง ด้วยเหตุผลดังกล่าว ความดันของระบบที่ลดลงอาจจะไม่ใช่สาเหตุหลักที่ทำให้ระยะโฟกัสยาวขึ้นและขนาดของลำไอออนเล็กลงก็ได้ เนื่องจากที่ความดันต่ำปริมาณไอออนถูกบีบด้วยชุดเลนส์นั้นมี

ปริมาณน้อยกว่าที่ความดันสูง ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบเลนส์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไอออนลดลง

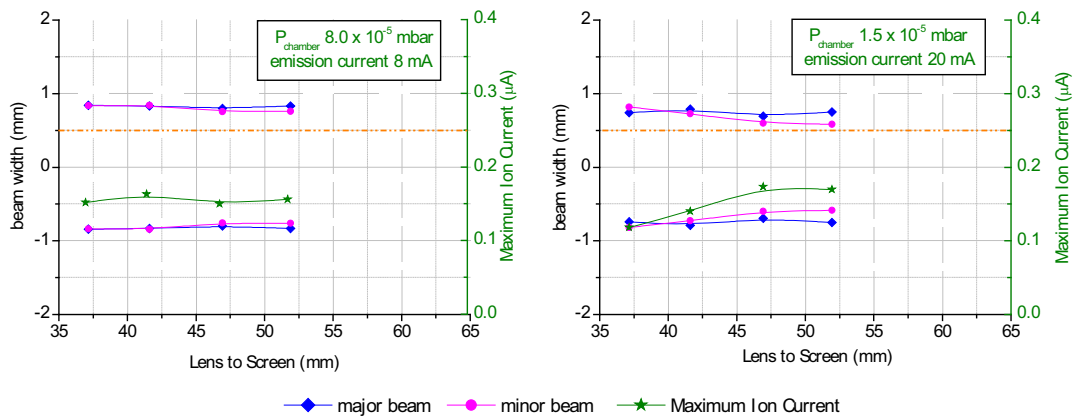
เนื่องจากการทดลองผลกระทบของความดันที่มีต่อขนาดและเส้นทางเดินของลำไอออนที่ผ่านมานั้นมีข้อบกพร่องตรงที่ในการทดลองแต่ละครั้งมีปริมาณไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออนไม่เท่ากัน เพื่อให้มีปริมาณไอออนออกมาเท่ากันที่ความดันต่างกัน จึงได้ทำการทดลองโดยจะกำหนดให้ emission current ของแหล่งกำเนิดไอออนที่ความดันสูงนั้นมีค่าน้อยกว่าที่ความดันต่ำ

การศึกษาผลของความดันที่มีต่อขนาดและเส้นทางเดินของลำไอออน เมื่อปริมาณของไอออนที่ออกจากแหล่งกำเนิดมีค่าเท่ากัน ทำการทดลองโดยการต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 63 และมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- Circular aperture on mask $\varnothing$ 1 mm
- scan step 0.3 mm
- scan area : x = 9 – 18 mm , y = 9 – 18 mm
- screen อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 37 mm ที่ระยะแรกของการวัดขนาด
- beam energy 1200 eV
- ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7,6 และ 7 mm
- $V_L = 1450$ V
- emission current 8 mA ที่ $P_{\text{chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar
- emission current 20 mA ที่ $P_{\text{chamber}} 1.5 \times 10^{-5}$ mbar

ผลการทดลองผลของความดันเมื่อมีปริมาณไอออนออกมาจากแหล่งกำเนิดเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 78

Effect of pressure in chamber at same number of ion :
beam energy 1200 eV, lens potential 1450 V and the space between lens electrodes are 7,6 and 7 mm



รูปที่ 78 ผลของความดันที่มีต่อเส้นทางเดินของลำไอออน ระยะโฟกัส และขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัส โดยที่ปริมาณของไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดมีค่าเท่ากัน เมื่อ beam energy 1200 eV , V_L 1450 V ที่ความดัน 8.0×10^{-5} และ 1.5×10^{-5} mbar ตามลำดับ

จากกราฟ เมื่อทำการทดลองและวัดเส้นทางเดินของลำไอออนในช่วงที่ lens ห่างจาก screen 37 – 52 mm พบว่า ที่ความดัน 8.0×10^{-5} mbar ลำไอออนในช่วงที่ได้นี้ค่อนข้างเป็นลำที่ขนานแต่ Maximum Ion Current (ion density) มีค่าลดลงเมื่อมีเคลื่อนที่ห่างจากเลนส์มากขึ้น ส่วนลำไอออนที่ได้จากระบบที่มีความดัน 1.5×10^{-5} mbar จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ระยะห่างจาก screen 46 mm เป็นตำแหน่งโฟกัส และหลังจากผ่านระยะนี้ไปแล้วลำไอออนที่ได้เริ่มมีแนวโน้มเป็นลำขนาน ในขณะที่ Maximum Ion Current ยังมีค่าสูงขึ้นและมีค่าเกือบคงที่หลังจากผ่านจุดโฟกัสไปแล้ว นอกจากนี้ขนาดของลำไอออนที่จุดโฟกัสยังมีขนาดเล็กกว่า รวมทั้ง Maximum Ion Current มีค่ามากกว่าของลำไอออนที่ได้จากระบบที่มีความดัน 8.0×10^{-5} mbar

ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ในระบบที่มีความดันสูงซึ่งมี mean free path น้อย ส่งผลทำให้โอกาสในการชนกันระหว่างไอออนกับอนุภาคในระบบมีมากขึ้น ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นไปในลักษณะของการกระเจิง ทำให้ลำไอออนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ ion density ณ จุดโฟกัสน้อยลงด้วย

สรุปได้ว่า เมื่อความดันภายใน focusing system มีค่าต่ำจนถึงระดับ 1.5×10^{-5} mbar ซึ่งทำให้ mean free path ของอนุภาคยาวมากถึง 240 cm ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการ transport อนุภาคของระบบเลนส์ดีขึ้น ซึ่งทำให้ระยะโฟกัสยาวขึ้น และ ขนาดลำไอออนที่จุดโฟกัสมีขนาดเล็กลงด้วย

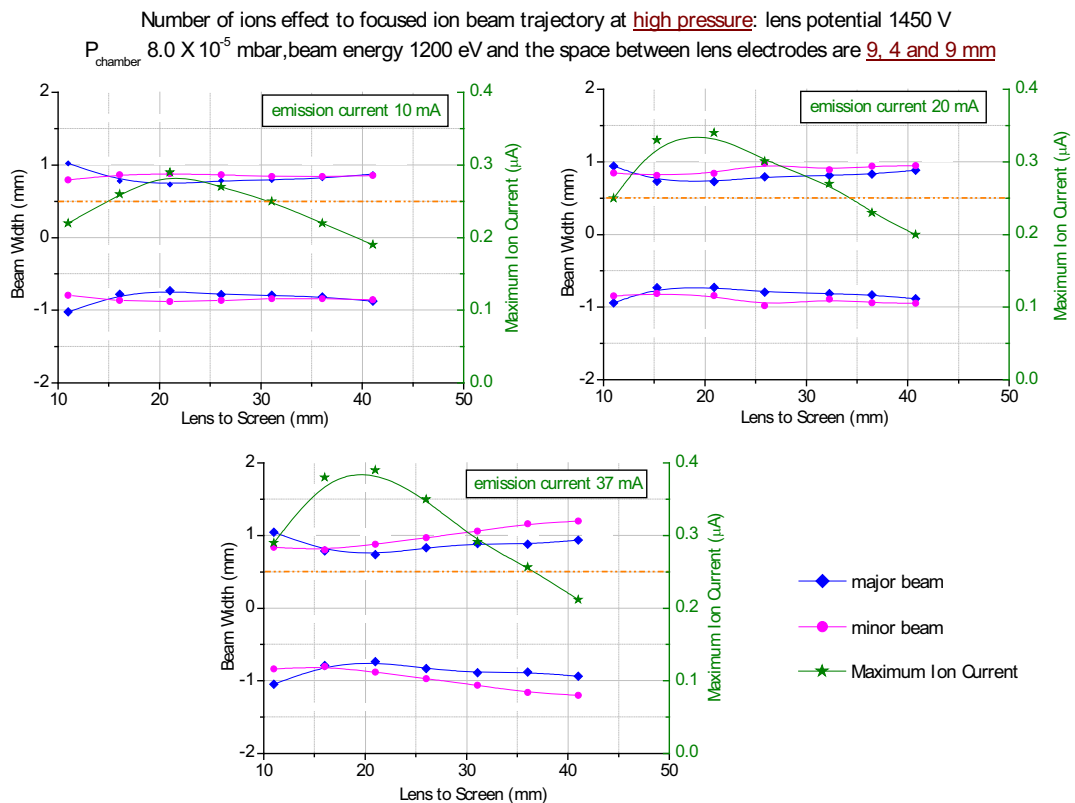
3.4 Emission Current and Ion Current Density Effects

การศึกษาผลของ emission current มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและสังเกตว่า เมื่อ emission current มีค่าเปลี่ยนไปแล้วจะมีผลอย่างไรต่อเส้นทางเดินของลำไอออน สำหรับในกรณีที่มีการป้อนแก๊สให้กับแหล่งกำเนิดอย่างเพียงพอแล้ว emission current จะเป็นค่า ๆ หนึ่งที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโอกาสในการชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของแก๊ส หมายความว่า เมื่อ emission current มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลทำให้มีจำนวนไอออนเกิดขึ้นภายในแหล่งกำเนิดสูงตามด้วยเช่นกัน

การศึกษาผลกระทบของ emission current แท้จริงแล้วจึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อทำการศึกษาว่า เมื่อทำการโฟกัสลำไอออนโดยที่จำนวนของไอออนภายในลำไม่เท่าเดิม ประสิทธิภาพในการทำงานของชุดเลนส์จะเปลี่ยนอย่างไรบ้าง จากการศึกษาผลของความดันซึ่งมีผลต่อเส้นทางเดิน ขนาด และ ระยะโฟกัสของลำไอออนนั้น จึงได้ทำการทดลองแยกออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ที่ระดับความดันสูง 8.0×10^{-5} mbar และ ที่ระดับความดันต่ำ 1.5×10^{-5} mbar ทำการทดลองโดยการต่อวงจรทางไฟฟ้าดังรูปที่ 13 เช่นเดิม เงื่อนไขการทดลองมีดังนี้

- Circular aperture on mask $\varnothing$ 1 mm
- scan step 0.3 mm
- scan area : x = 9 – 18 mm , y = 9 – 18 mm
- screen อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด 37 mm ที่ระยะแรกของการวัดขนาด
- beam energy 1200 eV
- $V_L = 1450$ V
- ระยะห่างระหว่างชิ้นเลนส์ คือ 9 , 4 และ 9 mm
- emission current 10 , 20 และ 30 mA ที่ $P_{\text{chamber}} 8.0 \times 10^{-5}$ mbar
- emission current 20 และ 30 mA ที่ $P_{\text{chamber}} 1.5 \times 10^{-5}$ mbar

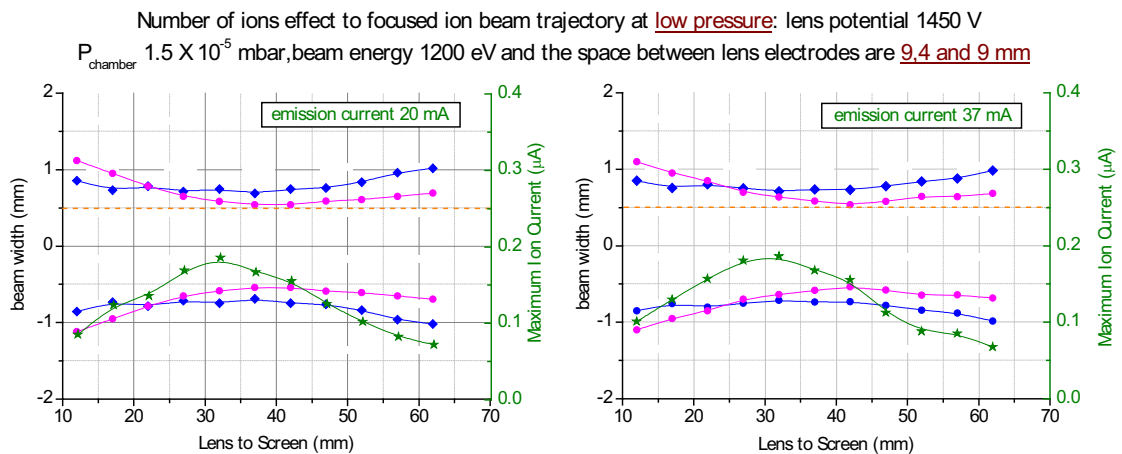
ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 79 และ 80



รูปที่ 79 ผลของ emission current ที่ออกมาแหล่งกำเนิดที่มีต่อเส้นทางเดินของลำไอออน ระยะโฟกัส ขนาดลำไอออน และ ion current density ที่จุดโฟกัส เมื่อ beam energy 1200 eV , V_L 1450 V และ emission current 10 , 20 และ 37 mA ตามลำดับ ที่ระดับความดันสูง $P_{\text{chamber}} = 8.0 \times 10^{-5}$ mbar

จากกราฟรูปที่ 79 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ระดับความดันสูงนั้น จะเห็นได้ว่า เมื่อ emission current มีค่ามากขึ้นจะส่งผลทำให้ ion current density ที่จุดโฟกัส มีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อทำการคำนวณหาจำนวนไอออนทั้งหมดบนระนาบ xy พบว่า มีค่าสูงขึ้นตามด้วย (โดยผลรวมของจำนวนไอออนบนระนาบ xy แต่ละจุดตลอดแนวทางเดินมีจำนวนเท่ากันตลอด) และจากการวัดปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเลนส์ชิ้นแรกพบว่ามีค่ามากขึ้นเช่นกัน แต่ระยะโฟกัส ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ยังสังเกตได้อีกว่า emission current มีผลต่อขนาดของลำไอออนด้วยเช่นกัน โดยจะเห็นได้ว่าตั้งแต่จุดแรกของการวัดจนถึงจุดโฟกัส ขนาดและเส้นทางเดินของลำไอออนในแต่ละกรณีค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก แต่หลังจากผ่านจุดโฟกัสไปแล้ว ลำไอออนจะเริ่มลู่ออก โดยจะลู่ออกมากขึ้นเมื่อ emission current มีค่ามากขึ้น

สำหรับผลการทดลองของ emission current ที่ระดับความดันต่ำแสดงดังรูปที่ 80 จากกราฟสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีผลการทดลองในกรณีที่ emission current 10 mA ทั้งนี้เนื่องจากระดับไอออนที่เกิดขึ้นในกรณีนี้มีค่าน้อยมาก ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากระดับความดันของระบบมีค่าน้อยมาก (ดังที่ได้กล่าวมาตั้งแต่ต้นว่า chamber ของแหล่งกำเนิดไอออนกับของ focusing system เชื่อมต่อเป็น chamber เดียวกัน)



รูปที่ 80 ผลของ emission current ที่ออกมาแหล่งกำเนิดที่มีต่อเส้นทางเดินของลำไอออน ระยะโพกัส ขนาดลำไอออน และ ion current density ที่จุดโฟกัส เมื่อ beam energy 1200 eV , V_L 1450 V และ emission current 20 และ 37 mA ตามลำดับ ที่ระดับความดันต่ำ $P_{\text{chamber}} 1.5 \times 10^{-5}$ mbar

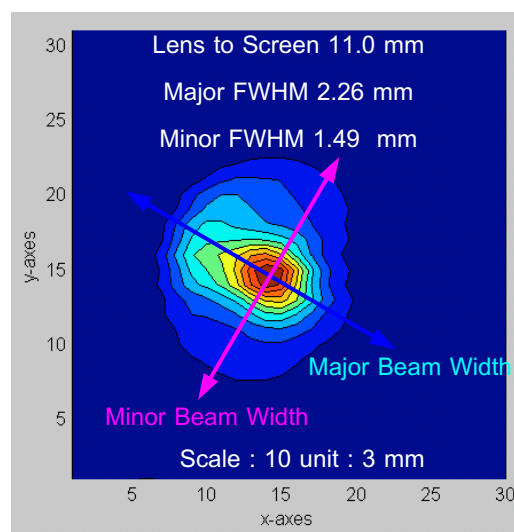
จากกราฟจะเห็นได้ว่า เส้นทางเดิน ระยะโพกัส และขนาดของลำไอออน ทั้งกรณีที่ emission current 20 และ 30 mA นั้นเหมือนกัน และจากการวัดไอออนที่วิ่งเข้าชนเลนส์ชิ้นแรกของระบบ พบว่า มีปริมาณเท่ากัน สาเหตุสำคัญที่ทำให้ focused ion trajectory ที่ระดับความดัน 1.5×10^{-5} mbar ไม่เปลี่ยนแปลงนั้น น่าจะเกิดขึ้นเนื่องจาก ภายในระบบมีปริมาณแก๊สที่น้อยเกินไป จนทำให้เมื่อ emission current เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการแตกตัวของแก๊สถึงจุดอิมพัลส์ไม่เพิ่มขึ้นตามค่า emission current ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณไอออนทั้งกรณี 20 และ 30 mA มีปริมาณเท่ากัน ซึ่งสังเกตได้จากจำนวนไอออนที่วิ่งเข้าชนขั้วไฟฟ้าของชุดเลนส์ แต่ถ้า emission current มีค่าน้อยกว่านี้ ก็จะส่งผลให้อัตราการแตกตัวของแก๊สน้อยมาก

นอกจากนี้จากการศึกษา Ion Source Characteristics ที่ผ่านมาพบว่า เมื่อ emission current มีค่าอยู่ในช่วง 10 – 42 mA beam width และ energy spread ของลำไอออนที่ออกจากแหล่งกำเนิดจะมีขนาดคงเดิม แต่ ion current density จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของ emission current จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นชัดว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลง emission current แล้ว ส่งผลทำให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านชุดเลนส์มีขนาดหรือ trajectory เปลี่ยนไปนั้น ไม่ได้มีสาเหตุจาก beam width กับ energy spread ของลำไอออนอย่างแน่นอน

จากผลการทดลองที่ผ่านมาพอสรุปได้ว่า เมื่อลำไอออนที่เคลื่อนผ่านระบบเลนส์มี ion current density เพิ่มขึ้น พบว่า ระบบเลนส์ที่สร้างขึ้นก็สามารถโฟกัสได้ โดยมีที่ ion current density ที่จุดโฟกัสมากขึ้นเช่นกัน และ ระยะโฟกัสของลำไอออนไม่เปลี่ยนแปลง แต่ เมื่อผ่านตำแหน่งของจุดโฟกัสไปแล้ว ลำไอออนที่มี ion density จะมี divergence angle มากขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องจาก space charge effect ที่เกิดขึ้นภายในลำไอออนนั่นเอง

3.5 Effect to Beam Profile

ในการโฟกัสลำไอออนด้วยระบบเลนส์ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมานั้น จากผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ลำไอออนที่ได้ออกมามีลักษณะเป็นวงรี ไม่กลม จึงทำให้การระบุขนาดของลำไอออน (beam width) จำเป็นต้องระบุด้วยค่า 2 ค่า คือ major beam และ minor beam :ซึ่ง เป็น Full Width at Half Maximum (FWHM) ลักษณะ profile ของลำไอออนที่ได้จากระบบการโฟกัสมีลักษณะดังรูปที่ 81



รูปที่ 81 Profile ของลำไอออนที่ได้ระบบการโฟกัสลำไอออน เมื่อ $P_{\text{chamber}} = 8.0 \times 10^{-5}$ mbar, beam energy 1000 eV และ V_L 1400 V

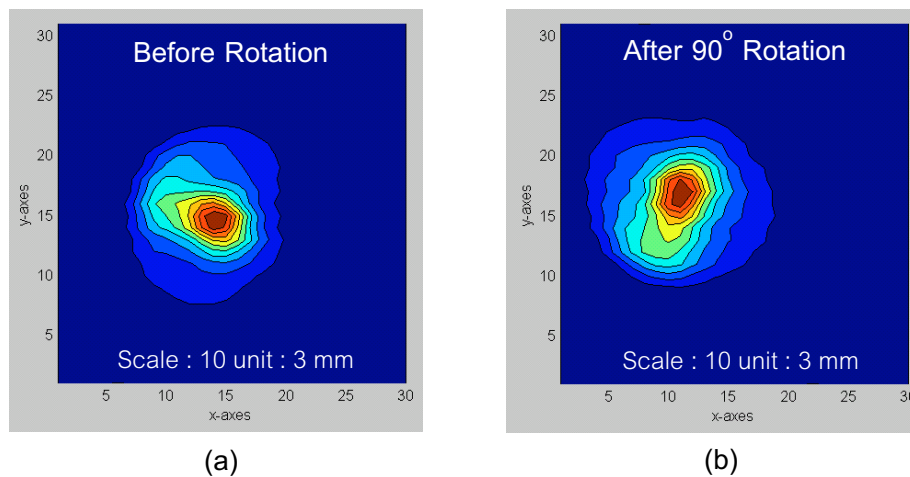
สำหรับสาเหตุที่ส่งผลให้ลำไอออนที่เคลื่อนผ่านระบบการโฟกัสลำไอออนมี profile ที่ไม่กลมนั้นน่าจะมีสาเหตุเนื่องมาจากระบบใดระบบหนึ่งที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับลำไอออนดังกล่าว ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ระบบกันคือ

1. ระบบการวัด : Faraday cup และ ระบบการขับเคลื่อน Faraday cup
2. แหล่งกำเนิดไอออน : ลักษณะของลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด
3. ระบบการโฟกัสลำไอออน : สนามไฟฟ้าที่เกิดจาก Disc lens

จากคำแนะนำของที่ปรึกษาโครงการ (ดร. วิโรจน์ ตันตราภรณ์) ให้ทำการศึกษาโดยการหมุนแหล่งกำเนิดไอออน หรือ ชุดเลนส์พร้อมกับสังเกตการเปลี่ยนแปลง profile ของลำไอออนที่เกิดขึ้น

1. ระบบการวัด

การทดสอบผลของระบบการวัดที่มีต่อ beam profile ของลำไอออนทำได้โดยการหมุนทั้งแหล่งกำเนิดไอออนและระบบการโฟกัส ไป 90° ทวนเข็มนาฬิกา (โดยมองจากด้านหลังของ Faraday cup เข้าไปหาแหล่งกำเนิดไอออน) แล้วทำการวัด profile ของลำไอออน ผลการวัด profile ของลำไอออนที่ได้จากการหมุนทั้งสองระบบนี้แสดงดังรูปที่ 82



รูปที่ 82 Beam Profile ของลำไอออนที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการหมุนแหล่งกำเนิดไอออนและระบบการโฟกัสลำไอออนไป 90° ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

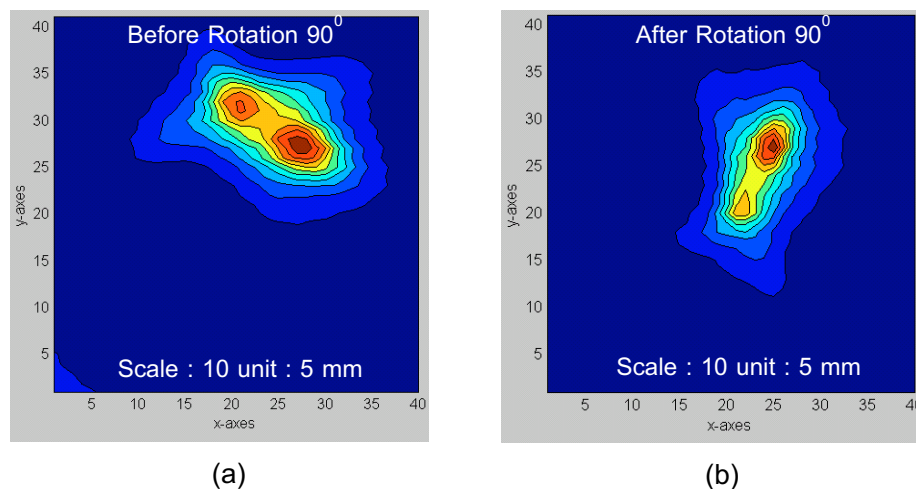
(a) Beam Profile ก่อนการหมุนแหล่งกำเนิดและระบบการโฟกัส (Beam Profile เดียวกันในรูปที่ 81)

(b) Beam Profile หลังจากทีหมุนแหล่งกำเนิดและระบบการโฟกัส

จากผลการทดลองจะเห็นได้เมื่อทำการหมุนแหล่งกำเนิดไอออนพร้อมกับระบบการโฟกัสไป 90° ทิศทวนเข็มนาฬิกา พบว่า Beam Profile ที่ได้ออกมาจากระบบดังกล่าวก็หมุนตามไปด้วย แสดงว่า สาเหตุที่ทำให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านระบบโฟกัสแล้วไม่กลมมันไม่ได้มีสาเหตุเกิดมาจากระบบการวัดและระบบการขับเคลื่อน Faraday cup

2. แหล่งกำเนิดไอออน

การทดสอบผลของแหล่งกำเนิดไอออนที่มีต่อ beam profile ของลำไอออนนั้นทำได้โดยการวัด profile ของลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออนโดยตรง (นาระบบการโฟกัสลำไอออนออก) และทำการหมุนแหล่งกำเนิดไอออนไป 90° ทิศทวนเข็มนาฬิกา แล้วนำผลที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับ profile ของลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดก่อนที่จะทำการหมุน ผลการทดลองและการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 83



รูปที่ 83 Beam Profile ของลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการหมุนแหล่งกำเนิดไอออนไป 90° ทิศทวนเข็มนาฬิกา ที่ beam energy 1000 eV
 (a) Beam Profile ก่อนการหมุนแหล่งกำเนิด : detector resolution 2 mm
 (b) Beam Profile หลังจากการหมุนแหล่งกำเนิด : detector resolution 1 mm

จากผลการวัดเมื่อทำการหมุนแหล่งกำเนิดไอออนไป 90° ในทิศทวนเข็มนาฬิกา พบว่าลำไอออนที่วัดออกมามี Profile ที่หมุนตามไปด้วย แสดงว่า เมื่อแหล่งกำเนิดไอออนหมุนไปเป็นผลให้ลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดหมุนตามไปด้วย

จากการทดลองที่ผ่านมาจะพอสรุปได้ว่า การที่ลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกมาจากระบบโฟกัสแล้วมีลักษณะของ beam profile เป็นวงรี จนเป็นสาเหตุทำให้ต้องทำการวัด beam width เป็น 2 ค่าด้วยกันนั้นน่าจะมีสาเหตุเกิดเนื่องจากลำไอออนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไม่กลมอยู่แล้ว

4. Scanning System

ในการกำหนดและควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำไอออนบนฉากรับภาพ (screen) นั้น เป็นหน้าที่ของระบบที่เรียกว่า scanning system หรือ deflection plates โดย deflection plates ที่ใช้กับงานวิจัยนี้เป็นระบบเพลทคู่ ควบคุมการเบี่ยงเบนของลำไอออนด้วยสนามไฟฟ้า ลำไอออนที่ถูกโฟกัสโดยระบบโฟกัสลำไอออนจะถูกกวาดให้ไปตกยังตำแหน่งใด ๆ เพื่อเซาะร่องบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ เพื่อให้ระบบดังกล่าวสามารถควบคุมการกวาดได้ทั้ง 2 มิติ scanning system ที่ใช้จึงจำเป็นต้องมีระบบเพลทคู่ จำนวน 2 ชุด (x - and y - scan) ด้วยกัน

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่เป็นการศึกษาและพัฒนา scanning system จะแยกออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

- 4.1 การสร้างและพัฒนาชุดควบคุมการกวาดลำไอออน
- 4.2 การออกแบบและสร้างระบบเพลทคู่ (deflection plates)
- 4.3 การทดสอบระบบเพลทคู่

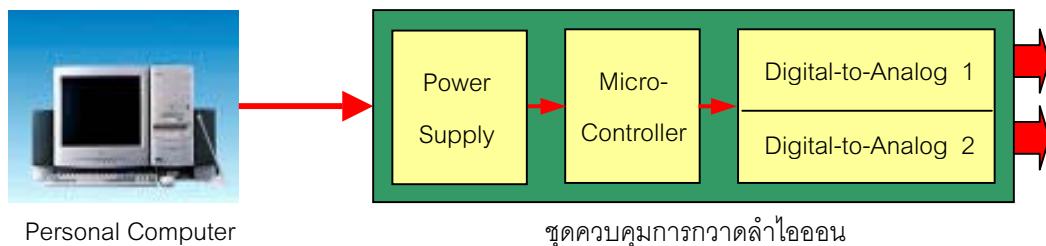
4.1 การสร้างและพัฒนาชุดควบคุมการกวาดลำไอออน

ชุดกวาดลำไอออนที่สร้างขึ้นนี้ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาจนเป็นระบบควบคุมที่สามารถควบคุมการกวาดลำไอออนด้วยความละเอียด $500\ \mu\text{m}$ โดยใช้สัญญาณควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย ความละเอียด 39 mV จากวงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกขนาด 8 บิต โดยเป้าหมายที่ต้องทำคือการเพิ่มความละเอียดขึ้นประมาณ 100 เท่า ซึ่งจะได้ความละเอียดในระดับ $5\ \mu\text{m}$ ซึ่งต้องใช้สัญญาณควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วย ความละเอียดสูงกว่า 0.5 mV จึงต้องเลือกวงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกให้เหมาะสมและจะต้องปรับปรุงวงจรต่าง ๆ เพื่อลดสัญญาณรบกวนลง

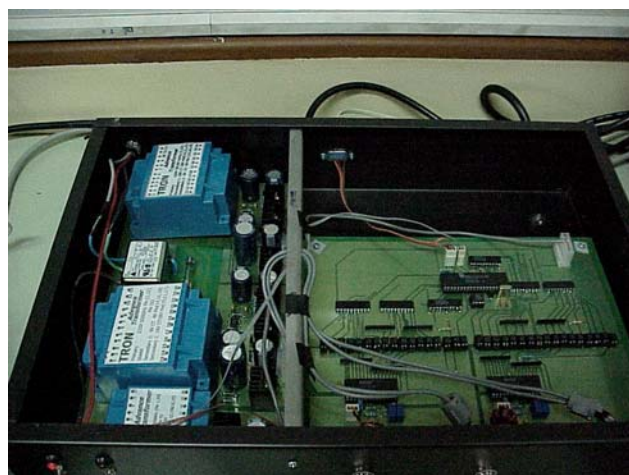
ระบบที่พัฒนาขึ้นจะมีความทำงานด้วยการรับคำสั่งควบคุมจากคอมพิวเตอร์ PC โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์ 89C51RD2 เป็นชุดเชื่อมต่อ และใช้ไอซี DAC707JP ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกขนาด 15 บิต (ถ้าใช้ในโหมดที่เอาต์พุตเป็น $\pm 10\ \text{V}$ จะมีความละเอียด 16 บิต) ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณอนาลอกที่มีความละเอียดระดับ $10/32767 = 0.305\ \text{mV}$ ได้ ไอซี DAC707JP ที่เลือกใช้เป็นชนิดที่มีแรงดันอ้างอิงภายใน ทั้งนี้จะช่วยลดปัญหาเรื่องความไม่เสถียรของแรงดันเอาต์พุตได้มาก อย่างไรก็ตาม วงจรของชุดแหล่งจ่ายไฟ วงจรชุดควบคุม (ไมโครคอนโทรลเลอร์) หรือแม้แต่วงจรของไอซี DAC707JP เอง ต่างก็เป็นแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนทั้งสิ้น ดังนั้นในการออกแบบระบบจะต้องลดสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ลงให้มากที่สุด

ในการออกแบบเพื่อลดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน ต้องให้ความสำคัญตั้งแต่แหล่งจ่ายไฟ (จุดเริ่มต้นของสัญญาณรบกวน) หากเราสามารถสร้างแหล่งจ่ายไฟที่ให้โวลเตจที่คงที่มากที่สุด ส่วนต่อมาที่ต้องพิจารณาก็คือส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนนี้เป็นสัญญาณดิจิตอลทั้งหมด ดังนั้นวงจรส่วนนี้มักไม่มีปัญหาเรื่องการมีสัญญาณรบกวนเข้ามารบกวนในวงจร แต่ในทางตรงกันข้ามส่วนนี้กลับเป็นส่วนที่สร้างสัญญาณรบกวนไปรบกวนวงจรส่วนอื่น ๆ เพราะเป็นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณไฟฟ้าตลอดเวลา จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นรบกวนระบบทั้งหมดได้ การลดปัญหาในส่วนนี้สามารถแก้ไขได้โดยการสร้างวงจรลงแผ่น PCB ที่มีการออกแบบตามหลักการลดสัญญาณรบกวนที่ถูกต้อง สายไฟที่ใช้ต้องมีการชีลด์กราวด์และเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความสามารถในการกรองสัญญาณรบกวน เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแยกส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมการกวาดลำไอออน ได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนการแปลงดิจิตอลเป็นอนาล็อก โดยระบบจะรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ PC ส่วนเอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 0 - 10 V ที่สามารถปรับค่าได้ด้วยความละเอียดน้อยกว่า 0.5 mV ซึ่งโครงสร้างของชุดควบคุมการกวาดลำไอออน แสดงดังรูปที่ 84 , 85 และ 86



รูปที่ 84 โครงสร้างของชุดควบคุมการกวาดลำไอออน



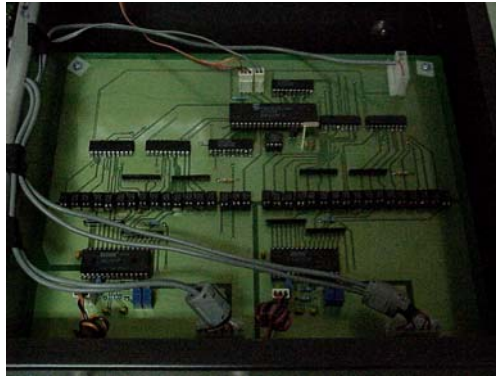
รูปที่ 85 วงจรภายในของชุดควบคุมการกวาดลำไอออน



รูปที่ 86 ส่วนแหล่งจ่ายไฟกระแสดตรงของชุดควบคุมการกวาดลำไอออน

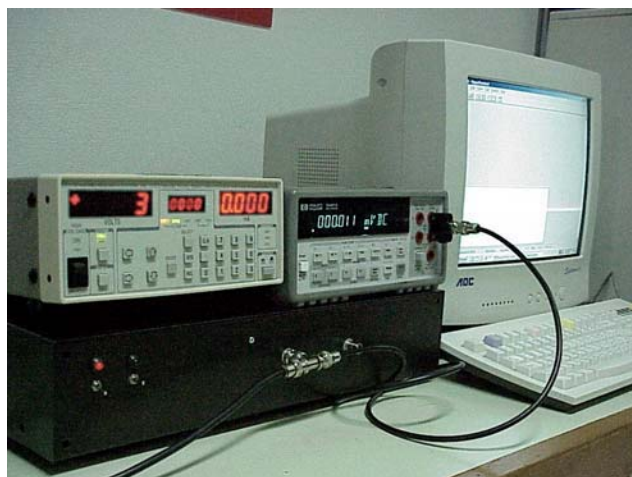
ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟกระแสดตรงที่ให้เลี้ยงวงจรส่วนต่าง ๆ ออกแบบให้มีสัญญาณรบกวนต่ำโดยใช้ power line filter กรองสัญญาณเป็นระดับแรก แหล่งจ่ายไฟทั้งหมดมี 3 ชุด คือ +5 V 1 ชุด ± 15 V และ +5 V 2 ชุด ซึ่งแต่ละชุดใช้หม้อแปลงที่มีการชิลล์ภายใน ทั้งในด้านขดลวด primary และ secondary แรงดันไฟฟ้าหลักทั้ง 3 ชุดจะแยกกราวด์จากกันเพื่อเสถียรภาพของกราวด์สัญญาณ ทำการออกแบบ PCB ตามหลักการออกแบบเพื่อเสถียรภาพของสัญญาณไฟฟ้า ชุดแหล่งจ่ายไฟกระแสดตรง +5 V จะจ่ายไฟให้กับวงจรควบคุมหลัก ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 89C51RD2 เป็นส่วนควบคุม ส่วนชุดแรงดันไฟฟ้า +5 V และ ± 15 V อีก 2 ชุด จะจ่ายให้กับวงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาล็อก 2 ชุด สำหรับการควบคุมการกวาดในแนวแกน x และแกน y

ส่วนของวงจรควบคุมหลักประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 89C51RD2 มีการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS232 ข้อมูลขนาด 16 บิต ที่ส่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอนุกรมจะถูกแปลงเป็นข้อมูลแบบขนานและเก็บไว้ใน latch จากนั้นจะส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต แต่เนื่องจากพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ 89C51RD2 มีขนาด 8 บิต จึงต้องใช้พอร์ตอินพุต/เอาต์พุต จำนวน 2 พอร์ต คือ P1 และ P2 โดยที่พอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ออกแบบให้มี IC buffer เพื่อป้องกันการดึงกระแสจากไอซีโดยตรง ข้อมูลจะถูกส่งออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังวงจรแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล DAC707JP ผ่านทางไอซี photocoupler เพื่อแยกวงจรสองส่วนนี้ให้อิสระจากกัน (กราวด์ของวงจรสองส่วนนี้ก็ถูกแยกกันเช่นกัน) ส่วนสัญญาณควบคุมทั้งหลายจะส่งผ่านทางพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต P0 โดยผ่านไอซี photocoupler เช่นกัน



รูปที่ 87 ส่วนวงจรควบคุมหลักและวงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกของชุดควบคุมการกวาดลำไอออน

ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนวงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกซึ่งแสดงดังรูปที่ 87 ในระบบนี้ต้องใช้ 2 ชุด ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ เพื่อควบคุมการกวาดลำไอออนทางแกน x และแกน y วงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกมีไอซีแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอก ICDAC707JP ของบริษัทฟิลลิป เป็นไอซีแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกขนาด 15 บิต เป็นส่วนประกอบหลัก ไอซีแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอกนี้มีแรงดันอ้างอิงภายใน 10 V และมี latch ทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุต (ด้านดิจิตอลและด้านอนาลอก) มีความละเอียดในการแบ่งระดับแรงดัน 10 V ออกเป็น 2^{15} ระดับ นั่นคือมีความละเอียด 0.305 mV เมื่อใช้โวลเตจนี้ไปควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 5000 V จากการคำนวณ พบว่าระบบที่ออกแบบนี้สามารถควบคุมการกวาดได้ด้วย ความละเอียด 6.5 μm สำหรับภาพโดยรวมของชุดควบคุมการกวาดลำไอออนแสดงดังรูปที่ 88



รูปที่ 88 ชุดควบคุมการกวาดลำไอออนที่สร้างขึ้น

เมื่อได้ทำการสร้างชุดควบคุมการกวาดลำไอออนเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำมาทดสอบแหล่งจ่ายแรงดันสูง (High voltage) การทดสอบการทำงานของระบบทำได้โดยการต่อสัญญาณแรงดันจากระบบที่สร้างขึ้นไปยังแหล่งจ่ายแรงดันสูง โดยเมื่อมีสัญญาณควบคุมเพียง 0 – 10 V แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงนี้จะสามารถกำเนิดโวลเตจได้ตั้งแต่ 0 – 5000 V ดังแสดงดังรูปที่ 89



รูปที่ 89 การควบคุมโวลเตจของแหล่งจ่ายแรงดันสูงด้วยชุดควบคุม

เมื่อส่งข้อมูลควบคุมการกำเนิดโวลเตจที่ต้องการจากคอมพิวเตอร์ PC ไปยังชุดควบคุมแล้วบันทึกระดับโวลเตจที่ชุดควบคุมสร้างขึ้นและระดับโวลเตจที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสร้างขึ้น จะได้ผลดังตารางที่ 1 และความสัมพันธ์ของโวลเตจจากชุดควบคุมการกวาดลำไอออนกับโวลเตจจากแหล่งจ่ายแรงดันสูงแสดงดังกราฟรูปที่ 90 จากกราฟจะเห็นได้ว่าโวลเตจทั้งสองมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้น

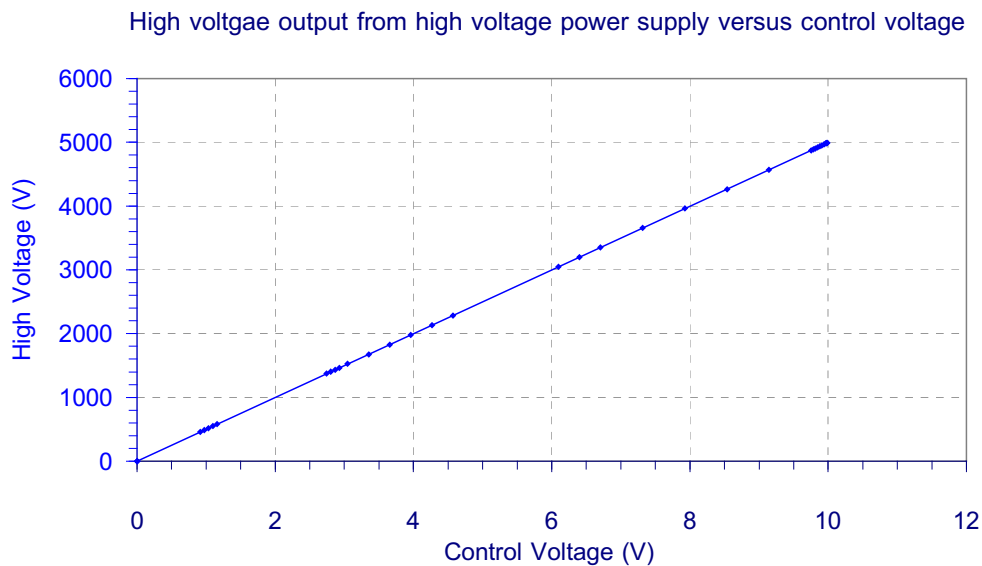
ตารางที่ 1 : resolution ของชุดควบคุมการกวาดลำไอออนซึ่งสามารถสร้างแรงดันได้ 32,767 step โดยใช้โวลเตจเพียง 0 – 10 V (ความละเอียดของ multi - meter 1 μV , ความละเอียดของแหล่งจ่ายแรงดันสูง 1 V)

Step	โวลเตจจากชุดควบคุม	โวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟแรงสูง
0	0.002 mV	0
1	0.305 mV	0-1 [*]
2	0.620 mV	0-1
3	0.922 mV	0-1
4	1.23 mV	1
5	1.53 mV	1
6	1.84 mV	1
7	2.14 mV	1-2
8	2.43 mV	1-2
9	2.74 mV	1-2
10	3.05 mV	1-2
11	3.35 mV	2
3000	0.915 V	458
3200	0.975 V	488
3400	1.036 V	518
3600	1.097 V	549
3800	1.158 V	579
9000	2.743 V	1372
9200	2.804 V	1402
9400	2.865 V	1433
9600	2.926 V	1463

^{*} a - b หมายถึงว่า เครื่องแสดงค่าอยู่ระหว่าง a กับ b ทั้งนี้เพราะ resolution ของแหล่งจ่ายแรงดันสูงมีค่าเพียง 1 V

ตารางที่1(ต่อ) : resolution ของชุดควบคุมการกวาดลำไอออนซึ่งสามารถสร้างแรงดันได้ 32,767 step โดยใช้โวลเตจเพียง 0 – 10 V (ความละเอียดของ multi - meter 1 μV , ความละเอียดของแหล่งจ่ายแรงดันสูง 1 V)

Step	โวลเตจจากชุดควบคุม	โวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟแรงสูง
10000	3.048 V	1524
11000	3.353 V	1676
12000	3.658 V	1828
13000	3.963 V	1981
14000	4.267 V	2133
15000	4.572 V	2286
20000	6.097 V	3047
21000	6.402 V	3199
22000	6.706 V	3352
24000	7.316 V	3656
26000	7.926 V	3961
28000	8.536 V	4265
30000	9.145 V	4570
32000	9.755 V	4874
32100	9.785 V	4890
32200	9.816 V	4905
32300	9.846 V	4920
32400	9.877 V	4935
32500	9.907 V	4951
32600	9.938 V	4966
32700	9.968 V	4982
32720	9.9748 V	4985
32740	9.9809 V	4988
32767	9.9891 V	4992



รูปที่ 90 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตโวลเตจจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกับโวลเตจจากชุดควบคุม

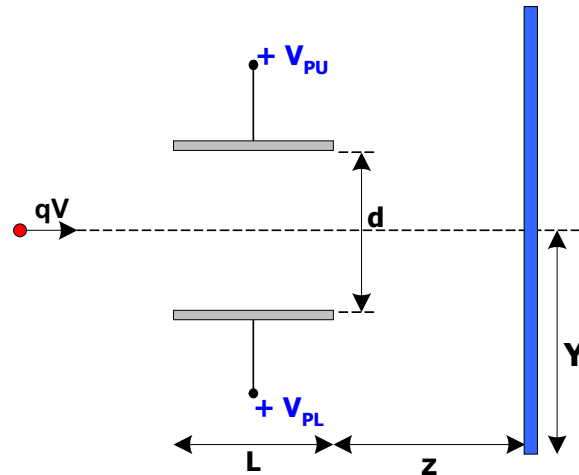
4.2 การออกแบบและสร้างระบบเพลทคู่ (deflection plates)

ในการออกแบบและสร้างระบบ deflection plates เพื่อใช้ในการเบี่ยงเบนลำไอออนนั้น ใช้หลักการที่ว่า เมื่อลำไอออนที่เคลื่อนที่ออกจากระบบโฟกัสโดยมีเฉพาะความเร็วในแนวแกน z (optical axis) เท่านั้น ด้วยระดับพลังงาน qV และ เมื่อลำไอออนเคลื่อนที่เข้าไปยังบริเวณแผ่นเพลทที่มีสนามไฟฟ้าในแนวแกน y ก็จะถูกแรงกระทำทางไฟฟ้าให้เบี่ยงเบนไปในแนวแกน y เช่นกัน ในขณะที่ความเร็วในทิศตามแนวแกน z (optical axis) ยังคงมีค่าคงที่ และ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านพ้นเพลทไปแล้ว ความเร็วทั้งในแนวแกน y และแนวแกน z จะมีค่าคงที่ทั้งสองแนวแกน

การออกแบบ deflection plates มีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะในการเบี่ยงเบนลำไอออนบนฉากในแนวแกน y กับ ระยะทางระหว่าง plates กับ screen (z) ความยาวของ plates (L) โดยเมื่อทำการเบี่ยงเบนด้วยระยะการเบี่ยงเบนสูงสุดแล้ว ลำไอออนจะไม่ชนกับขอบ plates เมื่อ plates ห่างกันเป็นระยะ d และ ลำไอออนที่เข้ามาในระบบการเบี่ยงเบนมีพลังงานเริ่มต้น qV

สำหรับ scanning system ที่ออกแบบไว้ใน phase 1B นี้ สามารถควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับ deflection plates ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยแรงดันที่ป้อนให้กับ plates มีค่า V_{PU} และ V_{PL} ดังไดอะแกรมรูปที่ 91 ซึ่งสามารถป้อนแรงดันให้เป็น positive potential หรือ negative potential ทั้งคู่ก็ได้ ในกรณีที่ทำการป้อน plates ทั้งสองด้วย positive potential แต่ potential ของ plate ขึ้นบนมีค่ามากกว่า plate ขึ้นล่าง ($V_{PU} > V_{PL}$) ลำไอออนจะถูกเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ แต่ถ้า $V_{PU} < V_{PL}$ ลำไอออนจะถูกเบี่ยงเบนไปในทิศ $+y$ สำหรับการคำนวณเพื่อทำการออก

แบบ deflection plates นั้น จะกำหนดให้ $V_{PL} = 0$ V และ $V_{PU} = +V_P$ (ป้อน positive potential ให้กับ plate ขึ้นบน) โดยในการพิจารณาการเคลื่อนของอนุภาคจะแบ่งออกเป็น 2 แนวแกน คือ ในแนวแกน y และ แกน z



รูปที่ 91 scanning system ซึ่งเป็น deflection plates ควบคุมการเบี่ยงเบนของอนุภาคด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าในแนวแกน y

- การเคลื่อนของอนุภาคในแนวแกน y

แรงกระทำทางไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาค : $F = qE = ma$

สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลท : $E = \frac{V_P}{d}$

เมื่อ q คือ ประจุของอนุภาค

ดังนั้นความเร่งของอนุภาคเมื่อเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเพลท : $a = \frac{qV_P}{md}$

ระยะทางที่ลำไอออนเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน y : $s = ut + \frac{1}{2}at^2$
 $= \frac{1}{2}at^2$

(u : ความเร็วเริ่มต้นในแนวแกน y = 0)

ความเร็วของอนุภาคในแนวแกน y : $v_y = u + at = at$

- การเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวแกน z (optical axis)

ความเร็วของอนุภาคในแนวแกน z คำนวณได้จากพลังงานของลำไอออน :

$$\frac{1}{2}mv_z^2 = qV$$

เมื่อ v_x คือ ความเร็วของอนุภาค
 V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เร่งลำไอออนออกจากระบบเลนส์

จะได้ว่า

$$v_z = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

ดังนั้น

เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านพื้น deflection plates :

$$t = \frac{L}{v_z} = \frac{L}{\sqrt{\frac{2qV}{m}}}$$

ซึ่งเวลาช่วงนี้อนุภาคจะถูกเบี่ยงเบนในแนวแกน y ไปเป็น :

$$s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{qV_p}{md}\right)\left(\frac{L}{\sqrt{\frac{2qV}{m}}}\right)^2$$

$$= \frac{1}{4}\left(\frac{V_p L^2}{dV}\right)$$

ความเร็วของอนุภาคในแนวแกน y :

$$v_y = at = L\left(\frac{qV_p}{md}\right)\sqrt{\frac{m}{2qV}}$$

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านพื้น deflection plates ออกมาแล้ว ก็จะไม่มีความกระทำทางไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคทั้งในแนวแกน y และ z ดังนั้น

ความเร็วของอนุภาคในแนวแกน z : $v_z = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$

ความเร็วของอนุภาคในแนวแกน y : $v_y = at = L \left(\frac{qV_p}{md} \right) \sqrt{\frac{m}{2qV}}$

เวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่ถึงฉาก : $t = \frac{z}{v_z} = z \sqrt{\frac{m}{2qV}}$

สำหรับระยะที่ลำไอออนถูกเบี่ยงเบนไปบน screen ในแนวแกน y มีค่าเป็น

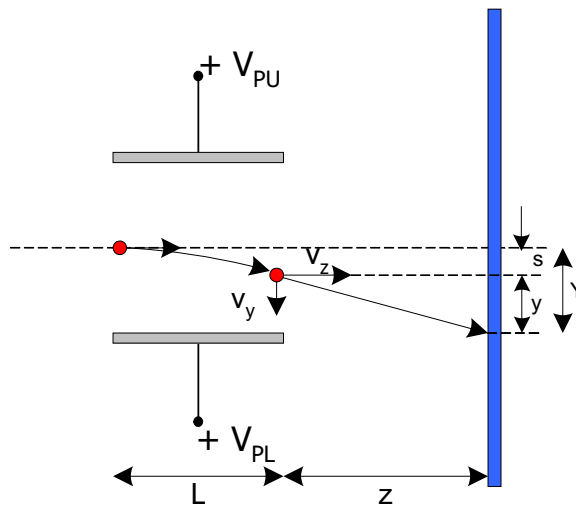
$$Y = Lz \frac{V_p}{2dV} + \frac{1}{4} \left(\frac{V_p L^2}{dV} \right)$$

$$= \frac{LV_p}{4dV} (2z + L)$$

เมื่อ

$$y = v_y t = Lz \left(\frac{qV_p}{md} \right) \left(\frac{m}{2qV} \right)$$

$$= Lz \frac{V_p}{2dV}$$

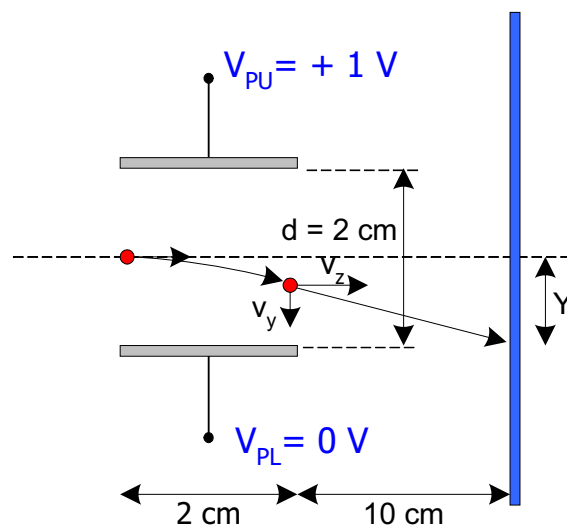


รูปที่ 92 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้แรงกระทำทางไฟฟ้าของ deflection plates

เนื่องจากในการออกแบบระบบการกวาดลำไอออนสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือระยะโฟกัสของลำไอออนที่ได้จากระบบโฟกัส และเนื่องจากในการโฟกัสในในระยะแรกของการทำวิจัยระบบโฟกัสที่ได้ทำการสร้างและพัฒนาขึ้นมาั้นมีระยะโฟกัสเพียง 4 cm เท่านั้น ในขั้นต้นจึงได้ทำ

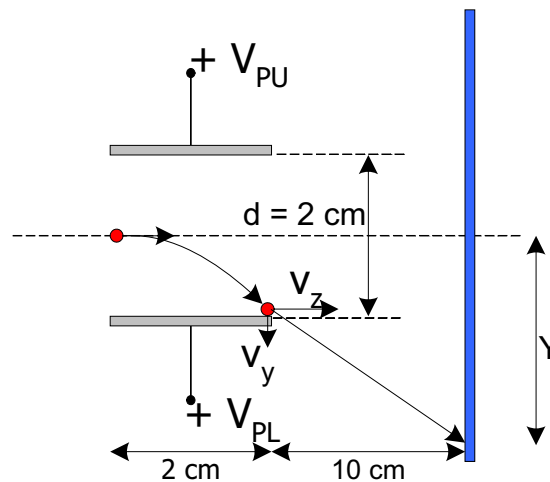
การออกแบบระบบการกวาดลำไอออนโดยให้ plates แต่ละชั้นมีความยาว $L = 2 \text{ cm}$ ระยะห่างระหว่างเพลท $d = 2 \text{ cm}$ โดยให้ฉากอยู่ห่างจาก plates $x = 10 \text{ cm}$

เมื่อลำไอออนมีพลังงานเริ่มต้น 2000 eV , $V_{PL} = 0 \text{ V}$ และ $V_{PU} = 1 \text{ V}$ นั่นคือ deflection voltage หรือ $V_p = 1 \text{ V}$ (แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ปรับค่าได้ในช่วง $0 - 5000 \text{ V}$, resolution 1 V) ลำไอออนจะวิ่งชนฉากที่ตำแหน่ง $Y = 27.5$ ไมโครเมตร โดยไม่ชนกับขอบของ plates ดังรูปที่ 93



รูปที่ 93 ระบบกวาดลำไอออนโดยแผ่นเพลทที่มีความยาว 2 cm ระยะห่างระหว่างเพลท 2 cm ฉากอยู่ห่างเพลท 10 cm และ ลำไอออนมีพลังงานเริ่มต้น 2000 eV เมื่อ deflection voltage = 1 V

สำหรับ deflection voltage หรือ V_p ที่ทำให้ลำไอออนถูกเบี่ยงเบนได้มากที่สุดนั่นคือค่า V_p ที่ทำให้ลำไอออนเคลื่อนที่ผ่านเพลทได้โดยไม่มีการชนขอบเพลท ซึ่งระยะที่ลำไอออนจะถูกเบี่ยงเบนได้มากที่สุดในบริเวณของ plates คือ 1 cm ($s = 1 \text{ cm}$) แสดงดังรูปที่ 94 จากการคำนวณพบว่า deflection voltage หรือ V_p ที่ทำให้ $s = 1 \text{ cm}$ มีค่าเป็น 4000 V และ ลำไอออนจะวิ่งชนฉากที่ระยะ $Y = 11 \text{ cm}$ จากจุดศูนย์กลาง



รูปที่ 94 ระบบกวาดลำไอออนโดยแผ่นเพลทมีความยาว 2 cm ระยะห่างระหว่างเพลท 2 cm จากอยู่ห่างเพลท 10 cm และ ลำไอออนมีพลังงานเริ่มต้น 2000 eV เมื่อ deflection voltage = 4000 V

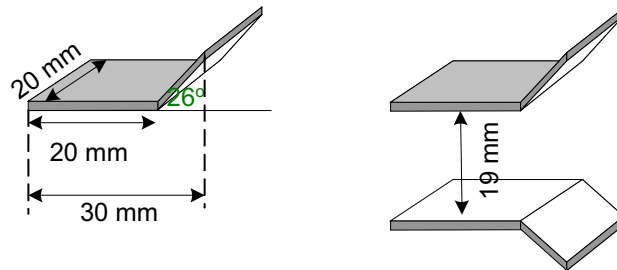
สรุปได้ว่าสำหรับระบบการกวาดลำไอออนที่ออกแบบไว้นี้ ถ้าอนุภาคมีพลังงานศักย์เริ่มต้น 2000 eV เคลื่อนที่เข้ามายังเพลทขนานที่มีความยาว 2 cm ระยะห่างระหว่างเพลท 2 cm และมีระยะห่างจากเพลทถึงฉาก 10 cm ระบบจะสามารถกวาดลำไอออนได้ไกลสุด ± 10 cm (เวเฟอร์มีรัศมีสูงสุด 10 cm) และมี resolution 27.5 ไมโครเมตร เมื่อใช้โวลเตจที่แผ่นเพลท +4000 V (หรือ -4000 โวลต์) แต่ถ้าแผ่นเวเฟอร์มีขนาดเล็กกว่านี้ ก็จะใช้โวลเตจควบคุมการกวาดน้อยลง เช่น ถ้าแผ่นเวเฟอร์มีรัศมี 5 cm โวลเตจที่ใช้ก็จะลดเหลือเพียง +2000 โวลต์

4.3 การทดสอบระบบเพลทคู่

ในช่วงเริ่มแรกของการศึกษา scanning system ด้วย deflection plates ที่ได้ทำการออกแบบไว้ข้างต้นนั้น เพื่อให้เห็นปัญหาและผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นปัญหาในเรื่องของสนามไฟฟ้าจาก deflection plates ซึ่งจะมีผลต่อรูปร่างของลำไอออนหรือไม่ ระยะที่เบี่ยงเบนได้บนฉาก รวมทั้ง profile ของลำไอออนเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าของ deflection plates จึงได้ทำการออกแบบสร้าง และ ทดสอบ scanning system โดยใช้ plates เพียง 1 คู่ ในการเบี่ยงเบนลำไอออนในแนวแกน y ก่อนเท่านั้น

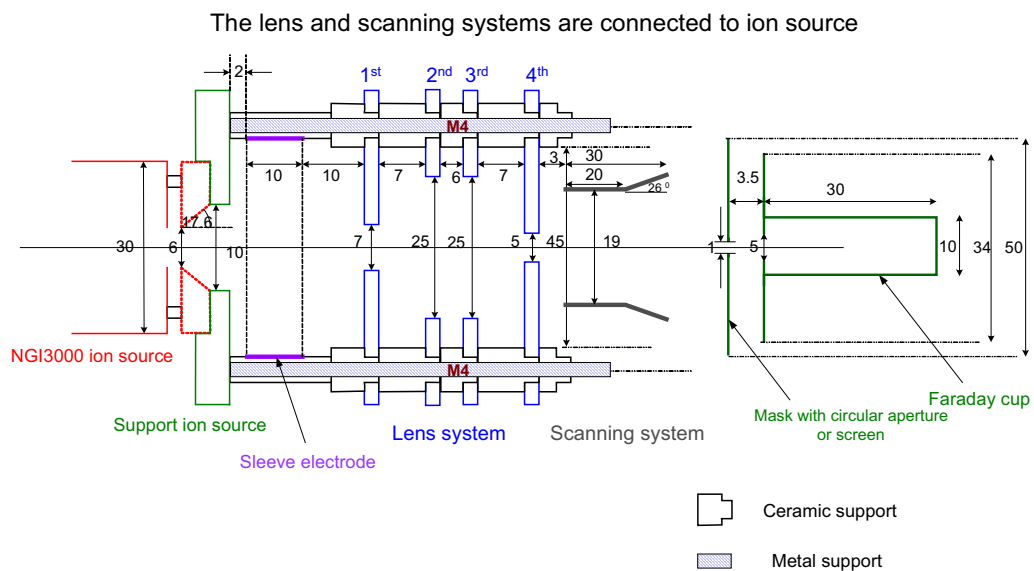
scanning system ที่ใช้ในงานวิจัยในช่วง Phase 1B ที่ผ่านมา มีลักษณะเป็นเพลท 2 ชิ้น วางห่างกัน 19 mm ซึ่งมีลักษณะดังไดอะแกรมรูปที่ 95 เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาในการชนของลำไอออนกับแผ่นเพลทเมื่อลำถูกเบี่ยงเบน จึงได้ออกแบบแผ่นเพลทในลักษณะที่ปลาย

ของเพลททำมุมกับ optical axis 26° สำหรับหลักการและทฤษฎีในการออกแบบ scanning system นั้น ได้กล่าวไว้แล้วในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2



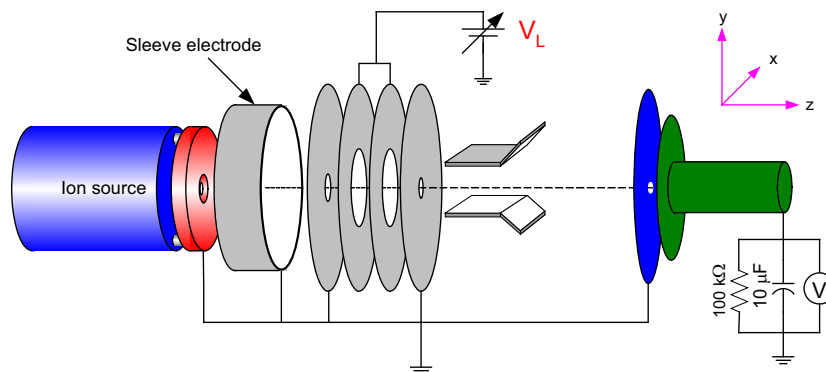
รูปที่ 95 ลักษณะและขนาดของ scanning system ซึ่งเป็นแผ่นเพลทคู่

scanning system เป็นระบบซึ่งอยู่ต่อจาก focusing system โดยวางห่างจากเลนส์ชั้นสุดท้าย 3 mm แสดงดังไดอะแกรมรูปที่ 96 เพื่อความสะดวกในการสร้างและออกแบบ scanning system ในระยะแรกนี้ material ที่นำมาใช้ทำแผ่นเพลทจึงเป็น aluminium ซึ่งถ้าประสบความสำเร็จในการทดสอบจะเปลี่ยน material ที่นำมาใช้เป็น stainless steel



รูปที่ 96 ไดอะแกรมแสดงขนาดและการจัดวาง ion source , lens system , scanning system และ Faraday cup

การวัดและการศึกษาการเบี่ยงเบนของลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่าน deflection plates ออกมา ทำได้โดยการจัดระบบดังไดอะแกรมรูปที่ 97



รูปที่ 97 ไดอะแกรมระบบการโฟกัสและการกวาดลำไอออน ซึ่ง ประกอบด้วย ion source , focusing system , scanning system และ ระบบการวัด (mask and Faraday cup)

สำหรับภาพถ่ายของ deflection plates และ ระบบทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย ion source, focusing system และ scanning systemแสดงดังรูปที่ 98



(a)



(b)

รูปที่ 98 (a) Deflection Plates 2 แผ่น ทำจาก aluminium
(b) Focusing System และ Scanning System

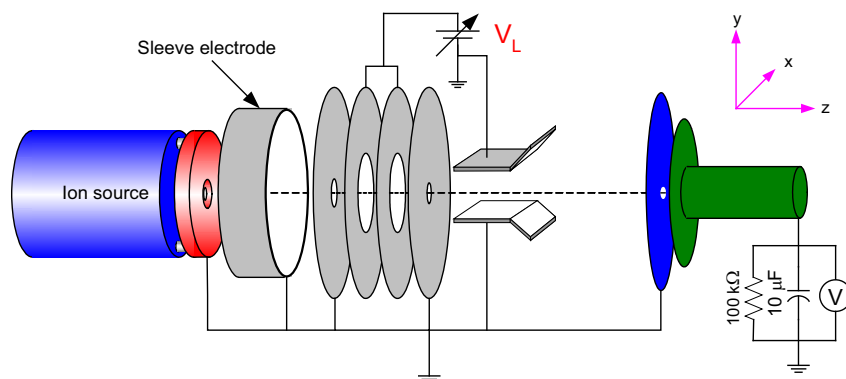
พารามิเตอร์และเงื่อนไขในการทำงานของ ion source และ focusing system ที่ใช้ในการทดลองการเบี่ยงเบนลำไอออนเป็นดังนี้

- Circular aperture on mask $\varnothing$ 1 mm
- $P_{\text{chamber}} 1.5 \times 10^{-5}$ mbar
- emission current of ion gun 20 mA
- scan step 0.3 mm
- scan area : x = 12 - 18 mm , y = 0 - 20 mm

- screen อยู่ห่างจากเลนส์ 36 mm ที่ระยะแรกของการวัดขนาด
- beam energy 1200 eV
- ระยะห่างระหว่างชิ้นเลนส์เป็น 7,6 และ 7 mm
- $V_L = 1450$ V
- เปลี่ยนแปลงโวลเตจระหว่างแผ่นเพลท

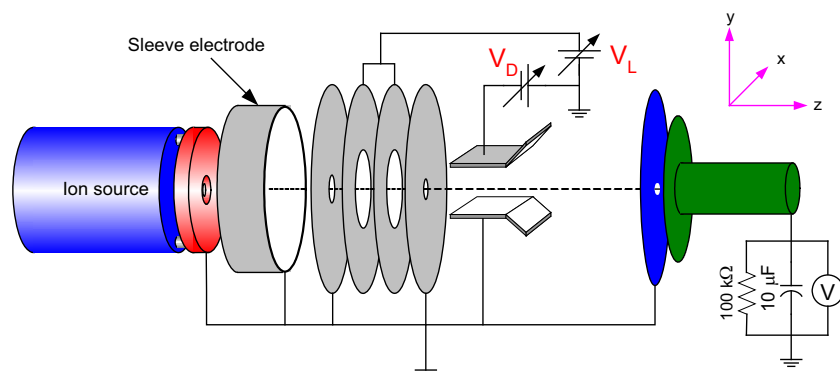
ขั้นเริ่มต้นในการศึกษาและเรียนรู้พฤติกรรมของระบบการเบี่ยงเบนลำไอออนจากการทำทดลองครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าจาก deflection plates ที่มีต่อ profile ของลำไอออน อยู่ 3 ลักษณะด้วยกันคือ

1. เมื่อติดตั้ง deflection plates แล้วทำการเชื่อม plates ทั้งสองลงกราวด์



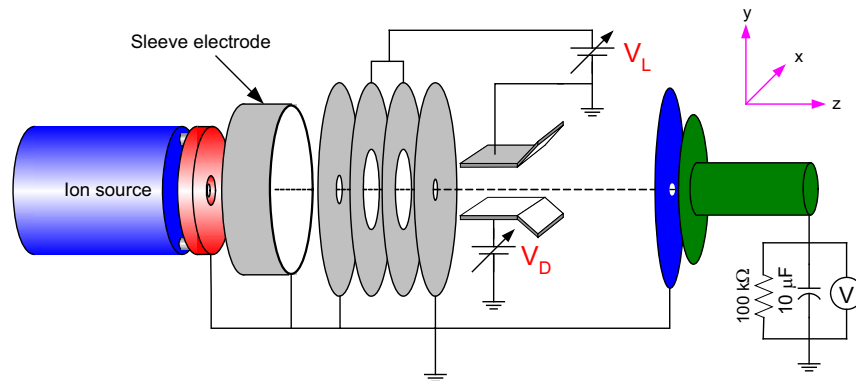
รูปที่ 99 โดอะแกรมการต่อวงจรไฟฟ้าให้กับระบบการโฟกัสและการกวาดลำไอออน ในขณะที่เพลททั้งสองแผ่นเชื่อมต่อลงกราวด์

2. เมื่อติดตั้ง deflection plates แล้วทำการเบี่ยงเบนลำไอออน โดยให้มีทิศทางในแนวแกน +y ด้วยการต่อ plate ขึ้นบนเข้ากับขั้วลบ และ ต่อ plate ชี้นล่างลงกราวด์



รูปที่ 100 โดอะแกรมการต่อวงจรไฟฟ้าให้กับระบบการโฟกัสและการกวาดลำไอออน เมื่อเพลทขึ้นบนต่อเข้ากับขั้วลบของ H.V. แต่ เพลทขึ้นต่อลงกราวด์

3. เมื่อติดตั้ง deflection plates แล้วทำการเบี่ยงเบนลำไอออน โดยให้มีทิศทางในแนวแกน +y แต่ต่อ plate ขึ้นบนลงกราวด์และ ต่อ plate ขึ้นล่างเข้ากับขั้วบวก



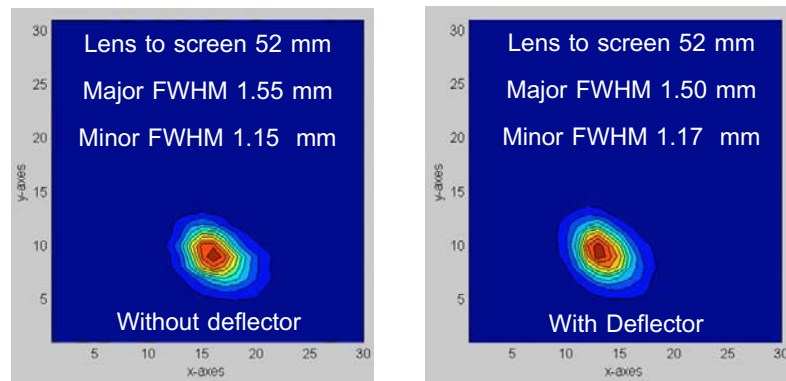
รูปที่ 101 ไดอะแกรมการต่อวงจรไฟฟ้าให้กับระบบการโพกัสและการกวาดลำไอออน เมื่อเพลทขึ้นล่างต่อเข้ากับขั้วบวกของ H.V. แต่ เพลทขึ้นบนต่อลงกราวด์

การทดลองทั้ง 3 ลักษณะนี้ทำขึ้น เพื่อศึกษาอิทธิพลสนามไฟฟ้าจาก deflection plates มีผลต่อลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่าน และ profile ของลำไอออน เมื่อถูกเบี่ยงเบนด้วยสนามไฟฟ้าดังกล่าว

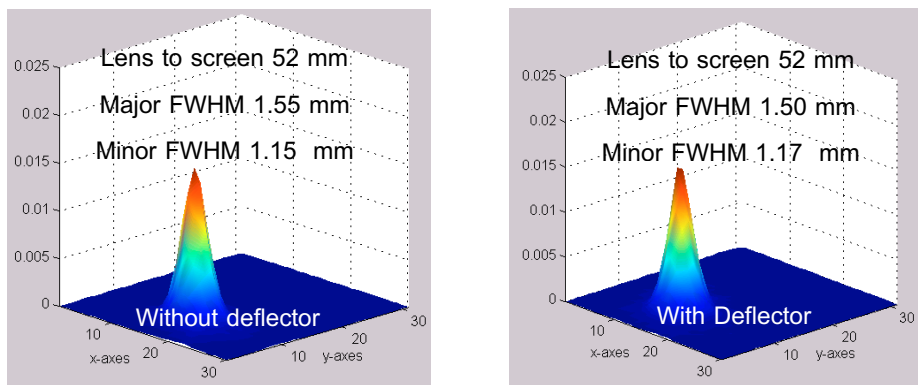
1. เมื่อติดตั้ง deflection plates แล้วทำการเชื่อมต่อ plates ทั้งสองลงกราวด์

การทดลองในหัวข้อนี้มีจุดประสงค์หลัก เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง profile และ เส้นทางเดินของลำไอออน ในขณะที่ไม่ได้ทำการใส่ deflection plates ไว้ในระบบ กับ เมื่อใส่ deflection plates แต่ไม่ได้ทำการเบี่ยงเบนลำ ว่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรบ้าง

การทดลองเพื่อทำการวัด profile และ เส้นทางเดินของลำไอออนที่เคลื่อนผ่าน deflection plates โดยยังไม่ได้ทำการเบี่ยงเบนลำนั้น ทำได้โดยการต่อเพลททั้งคู่ลงกราวด์ การต่อวงจรไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 99 แล้วนำผลที่วัดได้นำมาเปรียบเทียบรูปร่างและเส้นทางเดินของลำไอออนกับระบบที่ไม่มี deflection plates อยู่ในระบบ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 102 และ 103



(a)



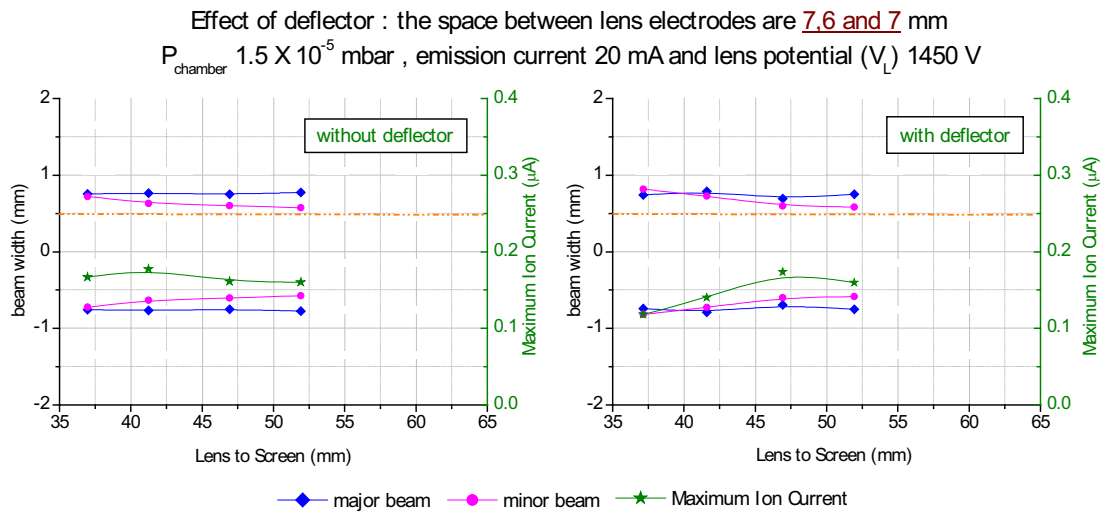
(b)

รูปที่ 102 ผลกระทบของ Deflection Plates ที่มีต่อ Ion Current Contour และ Ion Current Profile โดยทำการวัด beam profile ของลำไอออนที่ beam energy 1200 eV, V_L 1450 V, the space between lens electrodes 7,6,7 mm ที่ตำแหน่งห่างจาก screen 52 mm

(a) Ion Current Contour โดยที่ x- และ y- axis : scale : 10 unit = 5 mm

(b) Ion Current Profile โดยที่ z- axis : scale : 0.01 unit = 0.1 μA

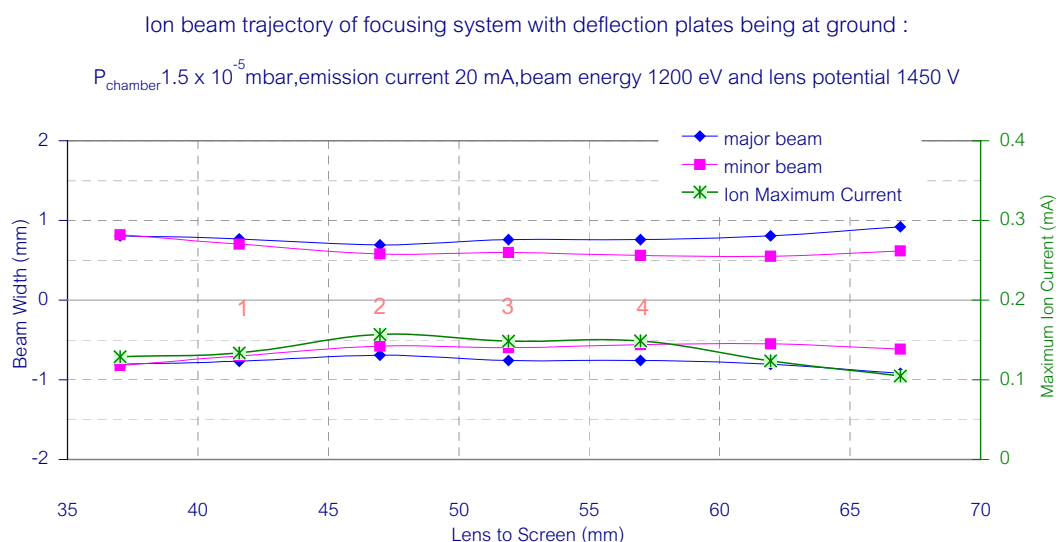
จากผลการวัด รูปร่างของลำไอออนที่ตำแหน่งห่างจาก screen 52 mm ในรูปที่ 102 นั้นสังเกตเห็นได้ว่า Ion current contour และ Ion current profile ของลำไอออนก่อนและหลังใส่ deflector ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่าน deflector นั้น Ion current contour ของลำมีความเนียนมากกว่าลำที่เคลื่อนผ่านเฉพาะ free space ทั้งนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากการสะสมประจุไฟฟ้าอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของ deflection plates จึงทำให้มีสนามเกิดขึ้นจาก plates ถึงแม้ว่าจะมีการต่อ plates ทั้งคู่ลงกราวด์แล้วก็ตาม ส่วนขนาดของลำไอออนยังคงมีขนาดเท่าเดิม



รูปที่ 103 ผลกระทบของ deflection plates ที่มีต่อเส้นทางเดินของลำไอออน โดยทำการวัด beam profile ของลำไอออนที่ beam energy 1200 eV , V_L 1450 V , space between lens 7,6,7 mm ที่ตำแหน่งห่างจาก screen 36 – 52 mm

สำหรับผลของ deflection plates ที่มีต่อเส้นทางเดินของลำไอออนแสดงดังรูปที่ 103 นั้น พบว่า สนามไฟฟ้าจากการสะสมประจุบริเวณผิวหน้าของเพลทส่งผลทำให้ลำไอออนมีระยะโพกัสห่างจากชั้นเลนส์มากขึ้นอีก ซึ่งเป็นผลดีสำหรับการทดลองต่อไป

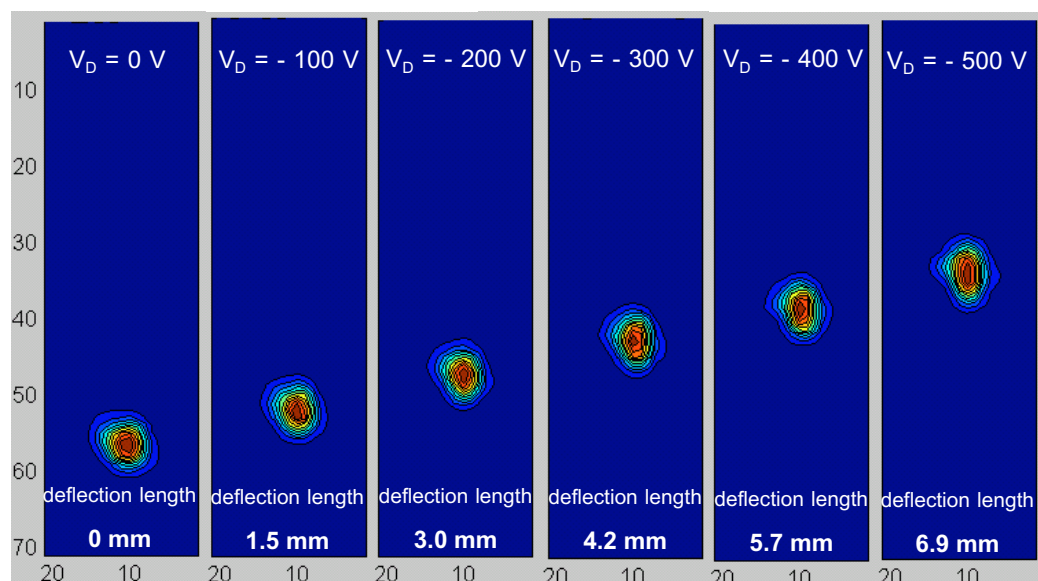
โดยผลการวัดเส้นทางเดินของลำไอออนในที่ระยะห่างจาก screen ระหว่าง 42 – 73 mm ในขณะที่ deflection plates ต่อลงกราวด์ มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 104



รูปที่ 104 เส้นทางเดินของลำไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านระบบการโพกัสและระบบการกวาดลำไอออน ที่ $P_{\text{chamber}} 1.5 \times 10^{-5}$ mbar , beam energy 1200 eV , V_L 1450 V เมื่อเพลททั้งสองต่อลงกราวด์

2. เมื่อติดตั้ง *deflection plates* แล้วทำการเบี่ยงเบนลำไอออน โดยให้มีทิศทางในแนวแกน +y ด้วยการต่อ plate ขึ้นบนเข้ากับขั้วลบ และ ต่อ plate ขึ้นล่างลงกราวด์

การทดลองในหัวข้อนี้มีจุดประสงค์เพื่อการศึกษาว่าเมื่อทำการเบี่ยงเบนลำไอออนด้วยสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ plates ลำไอออนจะถูกเบี่ยงเบนไปแนวแกน +y หรือไม่ การทดลองทำได้โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 100 ทำการเบี่ยงเบนลำไอออนที่ตำแหน่งเลนส์ห่างจาก screen 41.5 mm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ 1 ของกราฟรูปที่ 104 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 105



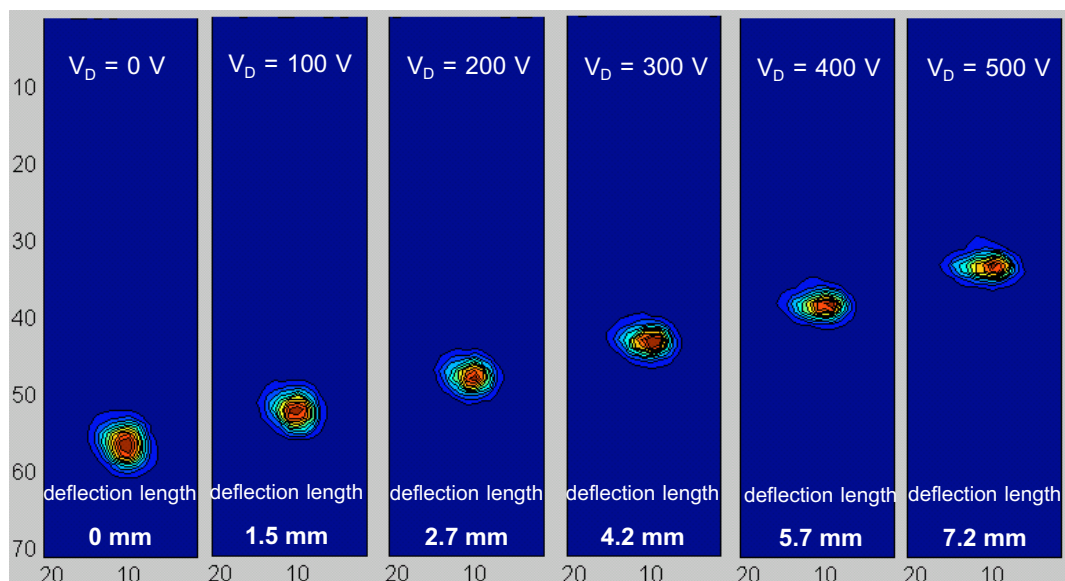
รูปที่ 105 การเบี่ยงเบนลำไอออนด้วยสนามไฟฟ้าในทิศ +y ด้วยการป้อนขั้วลบของ H.V. ให้กับเพลทขึ้นบน และ เพลทขึ้นล่างต่อลงกราวด์ : scale : 10 unit : 3 mm

จากการทดลองเพื่อทำการเบี่ยงเบนลำไอออน พบว่า ลำไอออนถูกเบี่ยงเบนมากขึ้นและเป็นเชิงเส้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเพลท แต่ จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเบี่ยงเบนด้วยสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น จะพบว่า รูปร่างของลำไอออนจะถูกดึงให้ยัดในแนวเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้าจากเพลท

จากผลการทดลองในข้างต้นจึงได้ทำการทดลองเบี่ยงเบนลำไอออนขึ้นด้านบนด้วยสนามไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากัน เพียงแต่เพลทชั้นล่างใส่โวลต์เดจซึ่งเป็นขั้วบวกของ H.V. ในขณะที่เพลทชั้นบนต่อลงกราวด์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3. เมื่อติดตั้ง *deflection plates* แล้วทำการเบี่ยงเบนลำไอออน โดยให้มีทิศทางในแนวแกน +y แต่ต่อ *plate* ขึ้นบนลงกราวด์และ ต่อ *plate* ขึ้นล่างเข้ากับขั้วบวก

จากทดลองดังกล่าวทำได้โดยการต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 101 โดยการเบี่ยงเบนในทิศไปแนวแกน +y และทำการวัดที่ระยะห่างจากเลนส์สิ้นสุดท้าย 41.5 mm เช่นกัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 106

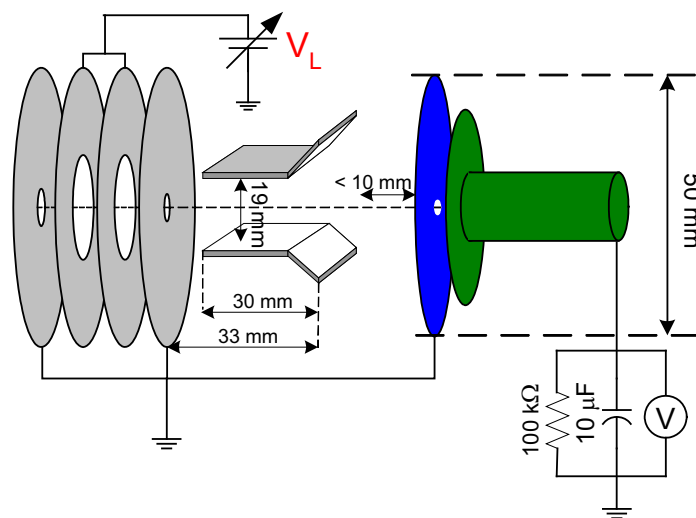


รูปที่ 106 การเบี่ยงเบนลำไอออนด้วยสนามไฟฟ้าในทิศ +y ด้วยการป้อนขั้วบวกของ H.V. ให้กับเพลทขึ้นล่าง และ เพลทขึ้นบนต่อลงกราวด์ : scale : 10 unit : 3 mm

จากรูป จะเห็นว่าเมื่อทำการเบี่ยงเบนลำไอออน ระยะการเบี่ยงเบนเป็นเชิงเส้นกับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ plates เช่นเดิม แต่ลักษณะของลำไอออนที่ถูกเบี่ยงเบนด้วยสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น จะมีลักษณะที่ถูกสนามไฟฟ้าบีบอัดมากขึ้น ซึ่งต่างจากกรณีที่ผ่านมา ที่ทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบให้กับ plate ขึ้นบน เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้น ลำจะมีลักษณะที่ถูกยืดออกมากขึ้นด้วย

จากรูปที่ 105 และ 106 สังเกตเห็นได้อีกอย่างว่า ระยะที่ลำไอออนถูกเบี่ยงเบนด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มเท่ากัน มีค่าใกล้เคียง (ซึ่งจากรูปทั้งสองจะเห็นได้มีบางกรณี que เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าในการเบี่ยงเบนเท่ากันแต่ระยะการเบี่ยงเบนไม่เท่ากัน โดยมีความแตกต่างกันอยู่ 0.3 mm สาเหตุนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก resolution ของการวัด)

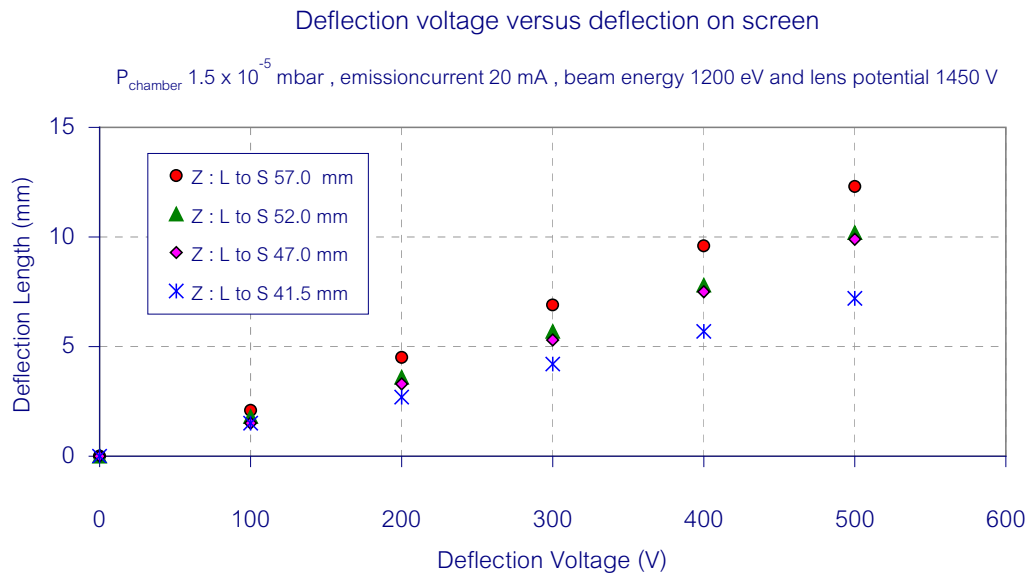
ปรากฏการณ์ดังกล่าวอธิบายได้ว่า เนื่องจากระบบที่ใช้ในการวัด (screen and Faraday cup) สมบัติของลำไอออนนั้น screen ถูกต่อลงกราวด์ และอีกทั้งระยะห่างระหว่าง screen กับขอบของ deflection plates มีค่าประมาณ 8.5 mm ในขณะที่ plates ที่ใช้ในการเบี่ยงเบนมีขนาด $20 \times 20 \text{ mm}^2$ ในช่วงที่เป็น parallel plates ยาวทั้งหมด 30 mm วางห่างกัน 19 mm ความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่าง deflection plates กับ ระบบการวัดแสดงดังรูปที่ 107 เมื่อเทียบระยะห่างระหว่าง plates กับ ระยะห่างระหว่าง plates กับ screen จะเห็นได้ว่าการที่ลำไอออนนั้นถูกบีบหรือยืดออกนั้นน่าจะมีผลมาจากทิศของสนามไฟฟ้าของ plates ที่กระทำกับ screen



รูปที่ 107 ความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท กับ ระยะห่างระหว่างขอบของแผ่นเพลทกับ screen ของระบบการวัดสมบัติของลำไอออน

สำหรับการลดอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มาจาก screen ทำได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่าง deflection plates กับ screen ให้มากขึ้นอีก

นอกจากนี้ยังได้ทำการเลื่อนตำแหน่งของ screen ที่ตำแหน่งที่ 2 , 3 และ 4 ของกราฟรูปที่ 104 ซึ่ง เลนส์มีระยะห่างจาก screen 47 , 52 และ 57 mm ตามลำดับ การเบี่ยงเบนลำไอออนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 108

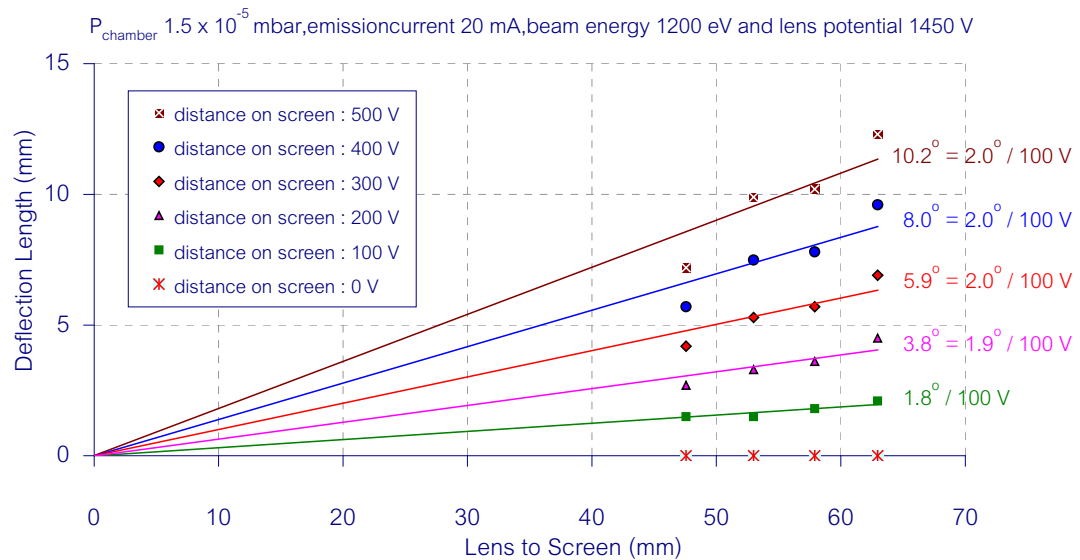


รูปที่ 108 การเบี่ยงเบนลำไอออนด้วย deflection plates ที่ระยะเลนส์ห่างจาก screen 41.5 , 47.0 , 52.0 และ 57.0 mm เมื่อ $P_{\text{chamber}} 1.5 \times 10^{-5}$ mbar , beam energy 1200 eV และ lens potential 1450 V

จากผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 108 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเบี่ยงเบนลำไอออนที่ระยะห่างจากเลนส์มากขึ้น ระยะที่เบี่ยงเบน (deflection length) ได้บน screen ก็มากขึ้นด้วย เมื่อใช้ deflection voltage เท่า ๆ กัน แต่จะสังเกตเห็นได้อย่างหนึ่งว่า เมื่อทำการเบี่ยงเบนลำไอออนในระยะที่เลนส์ห่างจาก screen 47.0 และ 52.0 mm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในกราฟรูปที่ 104 ซึ่งเป็นช่วงของลำไอออนค่อนข้างเป็น parallel beam นั้น deflection length ที่ได้ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองนี้คงจะต้องทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองดังกล่าวต่อไปในภายหลัง และ ถ้าผลการทดลองดังกล่าวเป็นจริงก็จะส่งผลดีต่อการพัฒนาการกวาดลำไอออนต่อไปในอนาคต

เมื่อนำระยะของเลนส์ที่ห่างจาก screen กับ ระยะการเบี่ยงเบน (deflection length) มาพล็อตกราฟ ดังกราฟรูปที่ 109 เพื่อหา sensitivity ของระบบการเบี่ยงเบน พบว่า scanning system ที่ทำการพัฒนาขึ้นมามี sensitivity อยู่ในราว $1.9^\circ - 2.0^\circ / 100 \text{ V}$

Deflection Angle of Ion Beam and Scanning System Sensitivity :



รูปที่ 109 Scanning System Sensitivity

5. Focusing System Improvement

จากการศึกษาระบบเลนส์ที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าระยะโฟกัสของลำไอออนที่ได้จากระบบเลนส์ดังกล่าวถือว่ายังไม่ยาวนานและโวลเตจที่ป้อนให้กับชุดเลนส์ (lens potential) ก็ยังมีระดับสูงอยู่ จึงได้พยายามพัฒนาระบบเลนส์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งได้พัฒนาระบบเลนส์ขึ้นมาใหม่ด้วยกัน 2 ระบบ คือ

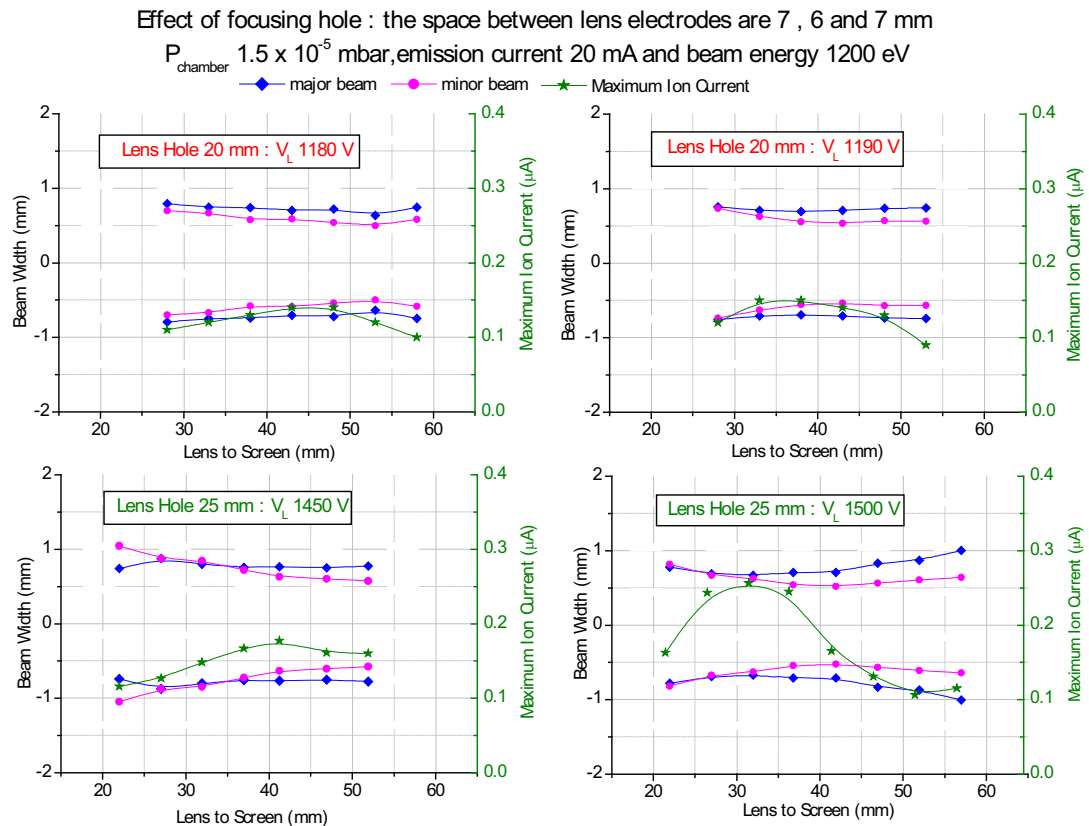
5.1 Small Hole Focusing System

5.2 Double Focusing System

5.1 Small Hole Focusing System

ลักษณะของลำไอออนที่ได้จาก focusing system ที่ผ่านมา พบว่า ระยะโฟกัสสามารถปรับได้จาก lens potential ที่ป้อนให้กับขั้วที่ 2 และ 3 ของชุดเลนส์ และ ความของระยะโฟกัสจะมากขึ้นเมื่อทำการลดความดันให้กับระบบเลนส์ นอกจากนี้จากการปรับเปลี่ยนระหว่างระหว่างชั้นเลนส์ จะช่วยให้โวลเตจที่ป้อนให้กับชุดเลนส์นั้นน้อยลงแต่ก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น รวมทั้งช่วงที่ลำไอออนเป็น parallel beam นั้นยังเป็นเพียงช่วงสั้น ๆ ซึ่งไม่เหมาะนักที่จะนำไปใช้การสแกนลำ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้ทำการลดขนาดของรูตรงกลางของเลนส์ชั้นที่ 2 และ 3 ของไดอะแกรมของชุดเลนส์แสดงดังรูปที่ 60 จากเดิม $\varnothing$ 25 mm เป็น $\varnothing$ 20 mm

ผลการวัดเส้นทางเดินและกระแสสูงสุดของลำไอออนซึ่งผ่านระบบเลนส์ที่มีขนาดรูตรงกลางของเลนส์ชั้นที่ 2 และ 3 ขนาด $\varnothing$ 20 mm เทียบกับเส้นทางเดินของลำไอออนที่ได้จากเลนส์ที่มีรูขนาด $\varnothing$ 25 mm แสดงดังรูปที่ 110



รูปที่ 110 เส้นทางเดินของลำไอออนซึ่งได้จากระบบเลนส์ที่เลนส์ชั้นที่ 2 และ 3 มี $\varnothing$ 20 mm เปรียบเทียบกับ ระบบเลนส์ที่เลนส์ชั้นที่ 2 และ 3 มี $\varnothing$ 25 mm

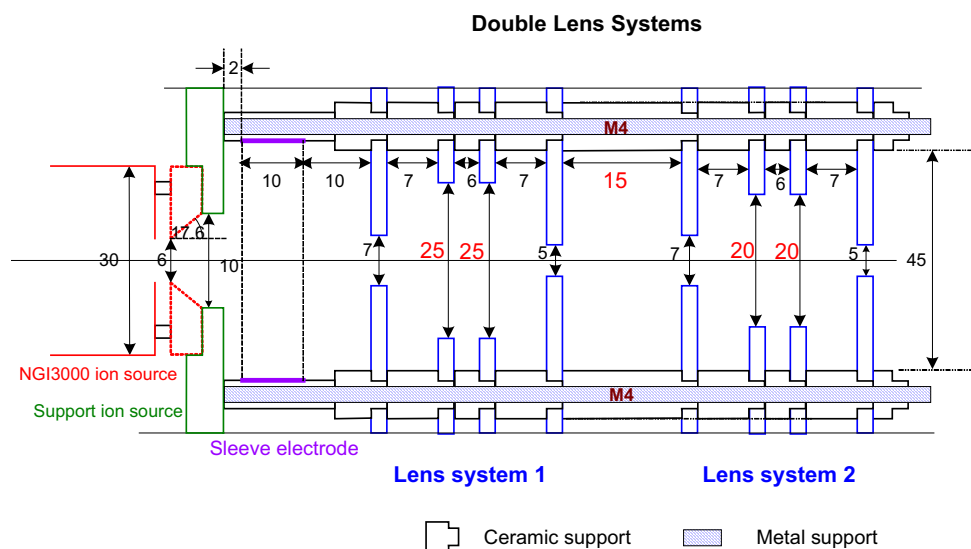
จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อต้องการให้ลำไอออนมีระยะโฟกัสยาวประมาณ 42 mm สำหรับระบบเลนส์ที่มีรูขนาด $\varnothing$ 25 mm จะต้องใช้ lens potential ถึง 1450 V แต่ถ้าเป็นระบบเลนส์ที่มีรูขนาด $\varnothing$ 20 mm จะใช้ lens potential 1180 V เท่านั้นในการโฟกัสลำ และถ้าต้องการระยะโฟกัสยาวประมาณ 31 mm ระบบเลนส์ที่มีรูขนาด $\varnothing$ 25 mm จะต้องใช้ lens potential 1500 V แต่ถ้าเป็นระบบเลนส์ที่มีรูขนาด $\varnothing$ 20 mm จะใช้ lens potential 1190 V

จากการเปรียบเทียบการทำงานของระบบเลนส์ซึ่งรูของเลนส์ชั้นที่ 2 และ 3 มีขนาด $\varnothing$ ต่างกัน พบว่า เมื่อใช้ระบบเลนส์ซึ่งมีขนาดของรูเลนส์ชั้นที่ 2 และ 3 เล็กกว่าทำให้สามารถลด Lens potential ในการโฟกัสลำไอออนลงได้ รวมทั้งลำไอออนที่ได้ก็มีช่วงที่เป็น parallel beam มากกว่า แต่ ion density ที่วัดได้มีค่าน้อยลง

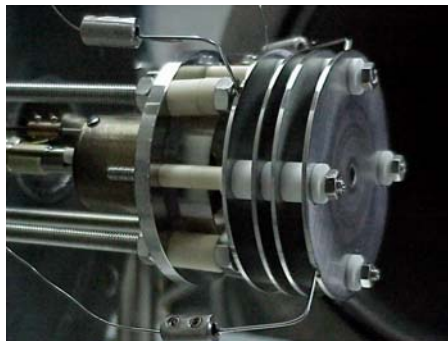
5.2 Double Focusing Systems

จากการทดลองการเบี่ยงเบนลำไอออนด้วย deflection plates พบว่า เมื่อทำการเบี่ยงเบนด้วยความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ทำให้รูปร่างของลำไอออนผิดเพี้ยนไปจากเดิม เนื่องจากเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่าง screen กับ plate การลดผลกระทบของสนามไฟฟ้างกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่าง screen กับ plates ให้มากขึ้นเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่าง deflection plates แต่เนื่องจากระบบเลนส์ที่ได้ทำการสร้างและพัฒนาขึ้นมา พบว่า ระยะโฟกัสยาวเพียง 47 mm ซึ่งไม่เพียงพอที่จะลดผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่าง screen กับ deflection plates ดังกล่าว และไม่เพียงพอที่จะใส่ deflection plates ชุดที่ 2

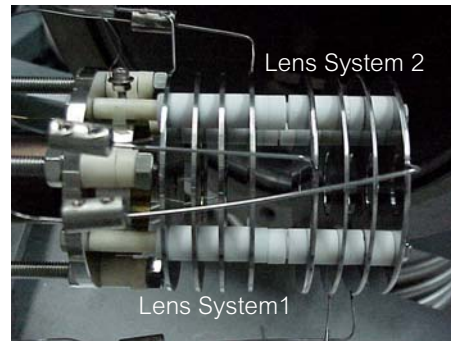
จากการศึกษา ion beam focusing system พบว่ามีคุณสมบัติบางประการคล้ายคลึงกับเลนส์ทางแสง ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาเห็นได้ชัดว่า เมื่อระยะโฟกัสยาวขึ้นขนาดของลำไอออนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับเลนส์ทางแสง โดยขนาดของลำไอออนจะเปรียบเสมือนกับขนาดภาพที่เกิดขึ้นจากเลนส์ทางแสงนั่นเอง จึงได้เกิดแนวความคิดในการใช้ focusing system เพิ่มอีกหนึ่งชุดเพื่อช่วยในการเพิ่มระยะโฟกัสของลำไอออน เพื่อทดสอบแนวความคิดดังกล่าวว่าเป็นไปได้หรือไม่ จึงนำระบบเลนส์ทั้งสองแบบที่มีอยู่มาประกบกัน (ระบบเลนส์ที่มีขนาด $\varnothing$ 25 mm กับ ระบบเลนส์ที่มีขนาด $\varnothing$ 20 mm) ดังไดอะแกรมรูปที่ 111 และเมื่อประกอบเลนส์ทั้งสองชุดเข้ากับแหล่งกำเนิดไอออนมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 112 (b)



รูปที่ 111 ไดอะแกรมของระบบเลนส์ 2 ชุด ซึ่งประกอบด้วย ระบบเลนส์ที่เลนส์ชิ้นที่ 2 และ 3 มี $\varnothing$ 25 mm กับ ระบบเลนส์ที่เลนส์ชิ้นที่ 2 และ 3 มี $\varnothing$ 20 mm



(a)



(b)

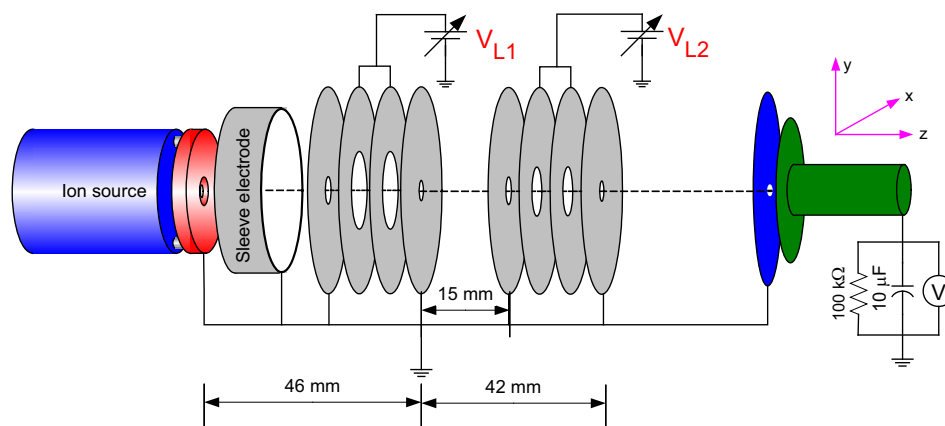
รูปที่ 112 Ion Focusing System

(a) Single Focusing System

(b) Double Focusing System

การทดสอบประสิทธิภาพของ double focusing systems ทำได้โดยการต่อวงจรทางไฟฟ้าดังไดอะแกรมรูปที่ 113 ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

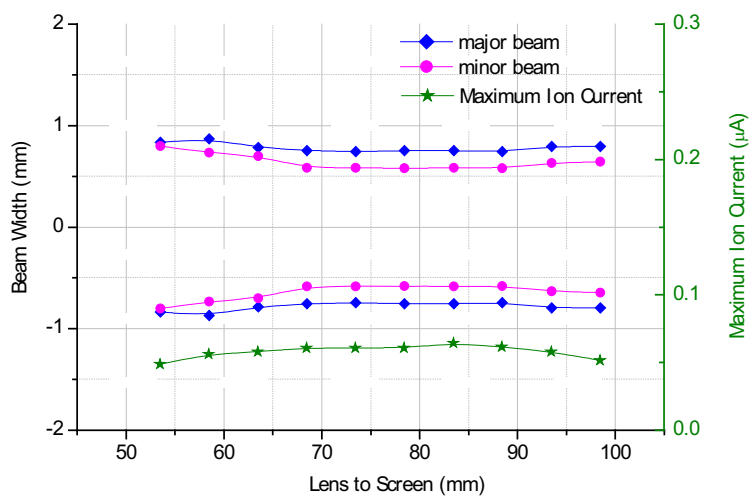
- Circular aperture on mask $\varnothing$ 1 mm
- $P_{\text{main chamber}} 1.5 \times 10^{-5}$ mbar
- emission current of ion gun 20 mA
- scan step 0.3 mm
- scan area : x = 9 – 18 mm , y = 9 – 18 mm
- screen อยู่ห่างจากเลนส์ ชั้นสุดท้าย 52 mm ที่ระยะแรกของการวัดขนาด
- ระยะห่างระหว่างชั้นเลนส์เป็น 7,6 และ 7 mm
- ชุดเลนส์ที่ 1 กับ 2 ห่างกัน 15 mm
- beam energy 1200 eV
- $V_{L1} = 1190$ V $V_{L2} = 830$ V



รูปที่ 113 ไดอะแกรมการต่อวงจรทางไฟฟ้าของ Double Focusing Systems

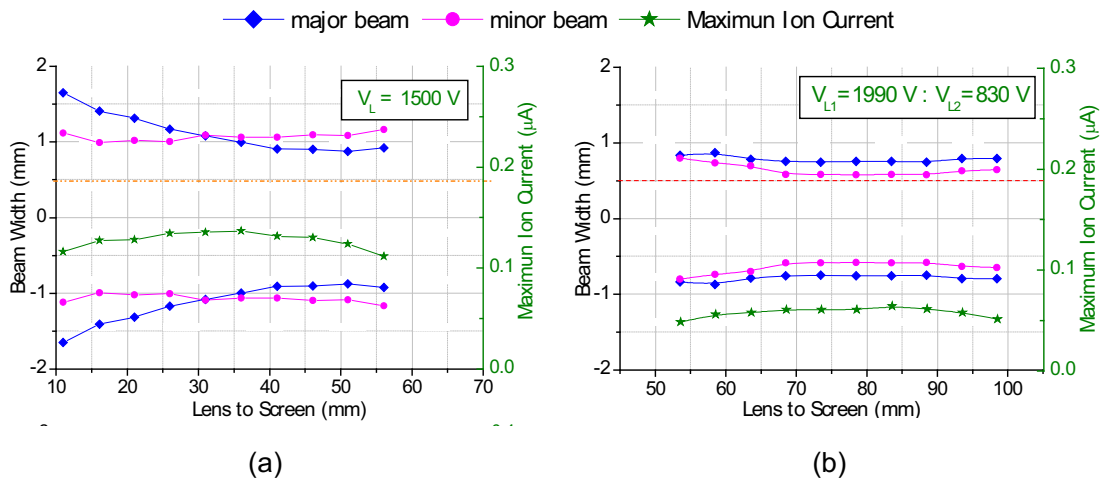
ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 114

Ion beam Trajectory of Double focusing lens system :
 $P_{\text{chamber}} = 1.5 \times 10^{-5}$ mbar , emission current 20 mA, beam energy 1200 eV
 the space between lens electrodes are 7 , 6 , 7 mm and $V_{L1} = 1190$ V , $V_{L2} = 830$ V



รูปที่ 114 เส้นทางเดินของลำไอออนที่ได้จาก double focusing systems

เมื่อนำผลการวัดเส้นทางเดินของลำไอออน (beam energy 1200 eV) ที่ได้จาก single focusing system เทียบกับ ที่วัดได้จาก double focusing system จะเห็นถึงความแตกต่างดังรูปที่ 115



รูปที่ 115 เส้นทางเดินของลำไอออนที่ได้จากระบบโฟกัส

(a) Single Focusing System

(b) Double Focusing Systems

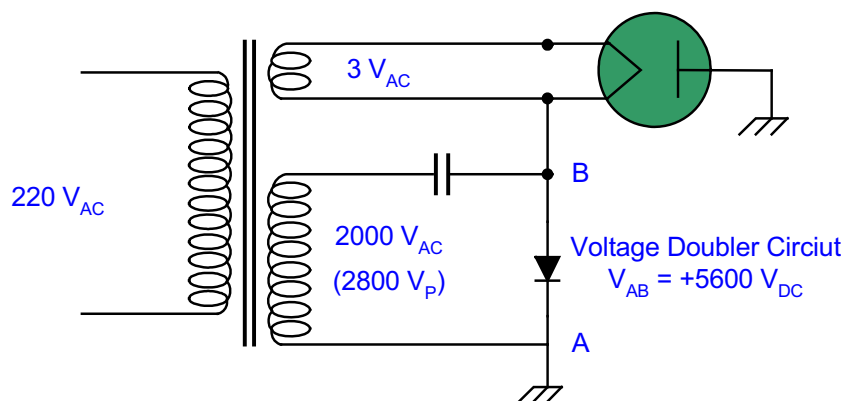
จากเส้นทางเดินของลำไอออนที่ได้จาก double focusing systems จะเห็นได้ว่าลำไอออนที่ได้นั้นมีความเป็น parallel beam มากกว่า ลำไอออนที่ได้จาก single focusing system อีกทั้งระยะโฟกัสของลำยาวถึง 85 mm ซึ่งถ้าเป็นระบบแบบเดิม ระยะโฟกัสยาวเพียง 40 mm นอกจากนี้ยังพบอีกว่าขนาดของลำไอออนที่ได้มีขนาดใกล้เคียง 1 mm (ซึ่งเป็นขีดจำกัดของ detector) แต่ ion current ที่ได้จาก double focusing systems มีค่าน้อยลง

สำหรับการพัฒนาระบบเลนส์ เพื่อให้ได้ระบบเลนส์ที่มีประสิทธิภาพในการโฟกัสลำไอออนมากขึ้นจะได้มีการศึกษาเพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาในระบบในโอกาสต่อไป

6. Microwave Ion Source

การดำเนินงานในช่วง Phase 1B ที่ผ่านมานี้ นอกจากได้ทำการศึกษาและพัฒนาระบบการโพกัสและระบบการกวาดล่าไอออนแล้ว ยังได้ทำการศึกษาระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟที่ใช้กันทั่วไป เพื่อนำหลักการของการกำเนิดคลื่นไมโครเวฟของเตามาใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นให้กับ microwave ion source

จากการศึกษาการทำงานของเตาไมโครเวฟ พบว่า magnetron เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟให้กับเตา ซึ่งจะมี power ประมาณ 600 – 800 W แต่นำคลื่นไมโครเวฟมากระตุ้นเพื่อให้แก๊สในหลอดขนาด $\varnothing$ 1 cm ยาว 10 cm เกิดการแตกตัวด้วย power ระดับดังกล่าวนี้มีค่าสูงเกินความจำเป็น จากหลักการการทำงานของ magnetron พบว่า magnetron จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อจ่ายกระแสในระดับ 10 A ให้กับ filament และ มีการป้อนแหล่งจ่ายแรงดันสูงให้กับ anode และ cathode ของ magnetron ดังไดอะแกรมรูปที่ 116



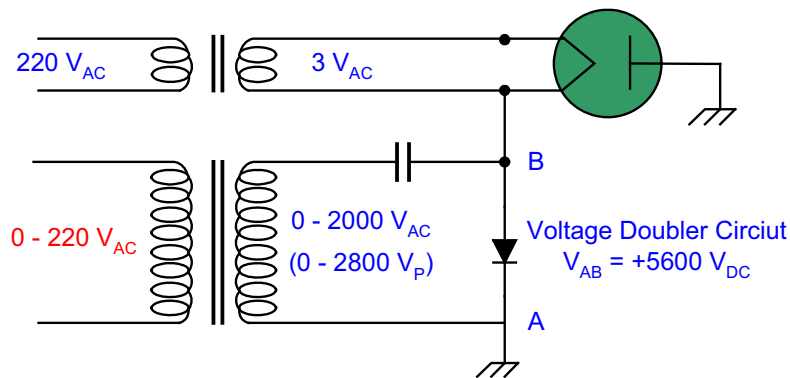
รูปที่ 116 ไดอะแกรมการต่อวงจรทางไฟฟ้าของ magnetron โดยใช้ transformer เพียง 1 ตัว

จากไดอะแกรมจากทำงานของ magnetron จะเห็นได้ว่าการลด power ของคลื่นที่ออกมาจาก magnetron ทำได้ 2 วิธี คือ

- ลดกระแสที่จ่ายให้กับ filament
- ลดแรงดันสูงที่จ่ายให้ระหว่าง anode กับ cathode

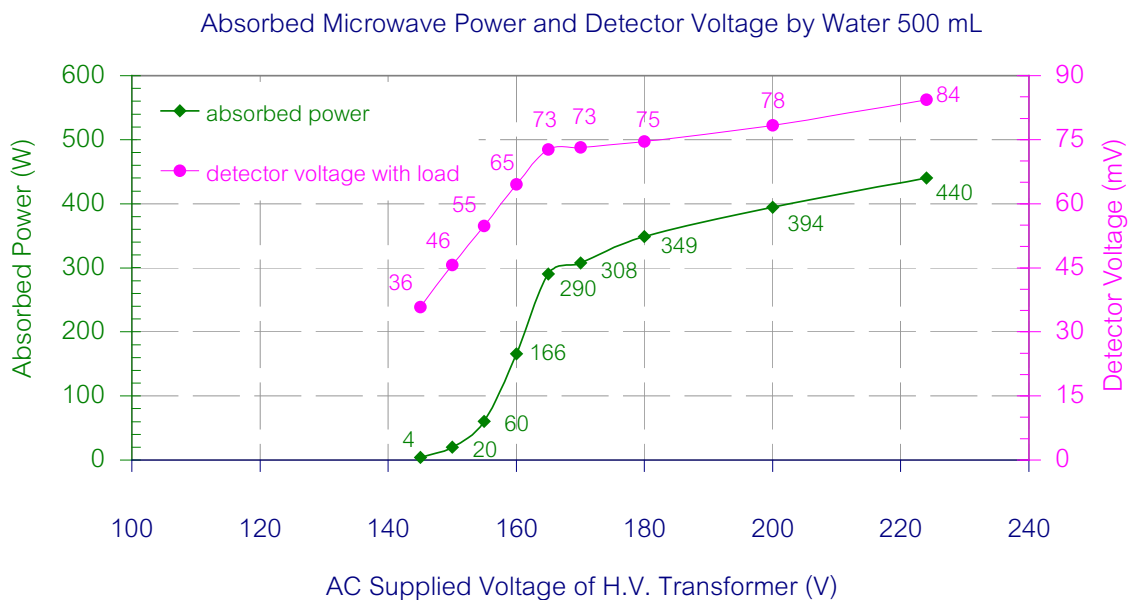
หลักการการทำงานของ magnetron อยู่ที่ต้องมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสให้กับ filament ดังนั้น ถ้าทำการลด power ด้วยการลดกระแสที่จ่ายให้กับ filament ก็จะทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจาก filament น้อยลงหรือไม่มีหลุดออกมา ซึ่งจะทำให้ magnetron ไม่สามารถผลิตคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ สำหรับในส่วนที่เป็นแรงดันสูงนั้นจะเป็นตัวกำหนดความเร็วและปริมาณของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าหาขั้ว anode ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้ทำการลด power ของไมโครเวฟด้วยการลดแรงดันสูงระหว่าง anode กับ cathode ซึ่งทำได้

โดยการแยก transformer ออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนของ High Voltage Transformer ที่ใช้กับระบบจ่ายแรงดันสูงจะสามารถปรับโวลเตจของขด primary ได้โดยใช้ variac ซึ่งสามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ 0 – 220 V_{AC} ดังไดอะแกรมรูปที่ 117



รูปที่ 117 ไดอะแกรมการต่อวงจรทางไฟฟ้าของ magnetron เมื่อทำการแยก transformer ออกเป็น 2 ตัว

ผลการลด power ของ magnetron โดยการปรับแรงดัน transformer ที่จ่ายให้กับระบบแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 118

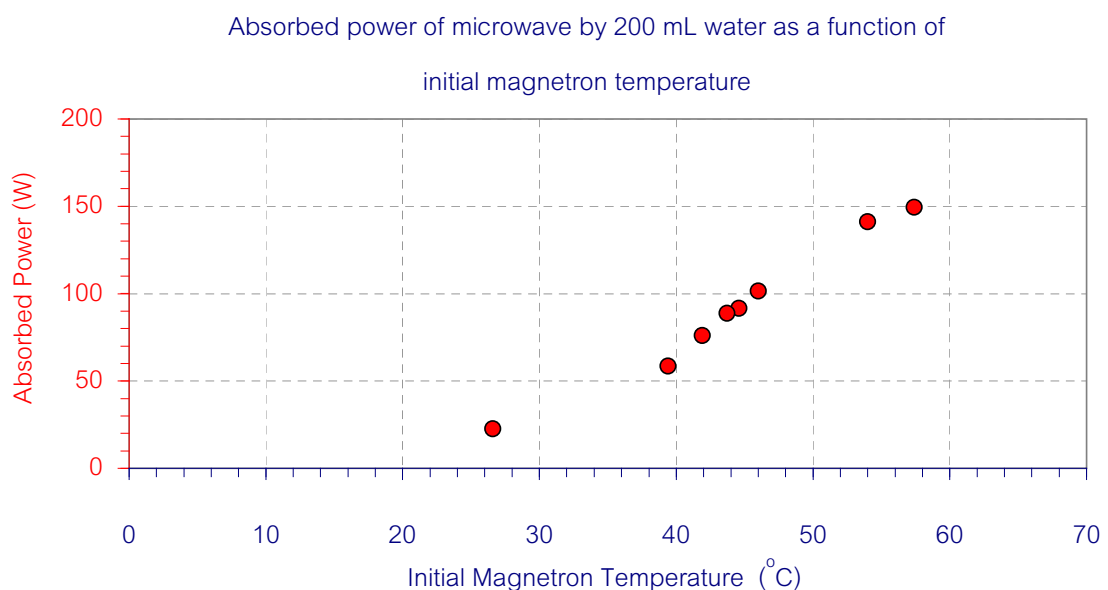


รูปที่ 118 ผลการลด power ของ magnetron ด้วยการปรับโวลเตจ V_{AC} ของ transformer ให้กับระบบจ่ายแรงดันสูง

จากผลการวัด power ของ magnetron โดยใช้ น้ำ 500 mL เป็นตัวดูดกลืนพลังงาน พบว่า สามารถลด power ของ magnetron ลงเหลือเพียง 4 W ดังกราฟเส้น  นอกจากนี้ยังได้นำ Microwave Detector เข้าไปติดไว้ในเตา พบว่า โวลเตจที่ได้จาก detector มีความสัมพันธ์กับ power ของไมโครเวฟแสดงดังรูปกราฟ 

ในขณะที่ทำการทดลองเพื่อทำการลด power ของ magnetron ได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ magnetron ในขณะทำงานด้วย จากการวัดอุณหภูมิของ magnetron พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิของ magnetron จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการทำงานของ magnetron แต่ก็จะมีค่าที่ในที่สุด ซึ่งทำให้ค้นพบว่า เมื่ออุณหภูมิของ magnetron มีค่าสูงจนถึงระดับหนึ่งแล้ว ถึงแม้จะหยุดจ่ายกระแสให้กับ filament ของ magnetron ในขณะที่ยังคงทำการป้อนแหล่งจ่ายแรงดันสูงให้กับขั้วแอโนดและแคโทด พบว่า magnetron ยังคงสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า self sustaining plasma

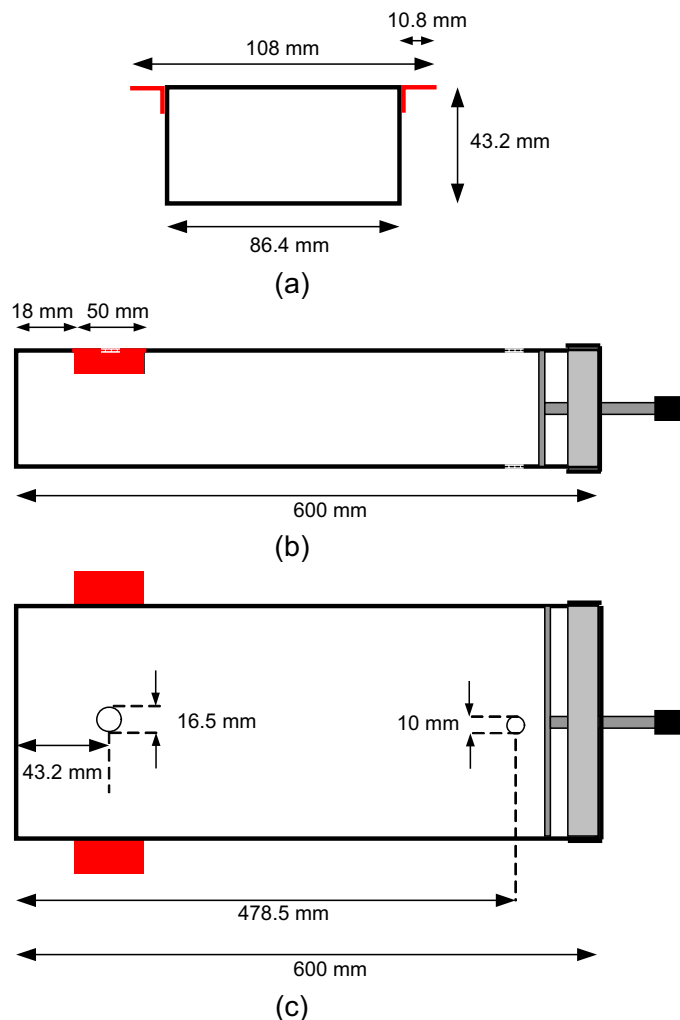
นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นในการทำงานของ magnetron (initial magnetron temperature) ไม่เท่ากันแล้ว ถึงแม้จะป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับ magnetron ด้วยค่าเท่ากัน ($V_{AC} = 155 \text{ V}$) power ที่นำดูดกลืนไว้ก็จะมีค่าแตกต่างกันอีกด้วย ดังผลการทดลอง ดังกราฟรูปที่ 119



รูปที่ 119 ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของ magnetron ที่มีต่อการดูดกลืน power จากคลื่นไมโครเวฟของน้ำ 200 mL

จากการศึกษาการทำงานของเตาไมโครเวฟทำให้มีความเข้าใจในการทำงานของ magnetron และ พฤติกรรมการส่งผ่านพลังงานของคลื่นไมโครเวฟไปยัง material ขึ้นมาอย่างมาก จึงได้ทำการออกแบบระบบการนำคลื่นไมโครเวฟ (waveguide) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อไป

ระบบท่อนำคลื่นไมโครเวฟที่ได้ทำการสร้างและพัฒนาขึ้นมาเป็น waveguide WR 340 โดยมีพื้นที่หน้าตัดขนาด $108 \times 86.4 \text{ mm}^2$ ความยาวทั้งหมด 600 mm และมี plunger คอยปรับตำแหน่งความยาวของ waveguide เพื่อให้เกิด resonance ภายใน waveguide cavity คลื่นที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นคลื่นในโหมด TE_{103} ขนาดและลักษณะของ waveguide cavity ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 120 และ 121

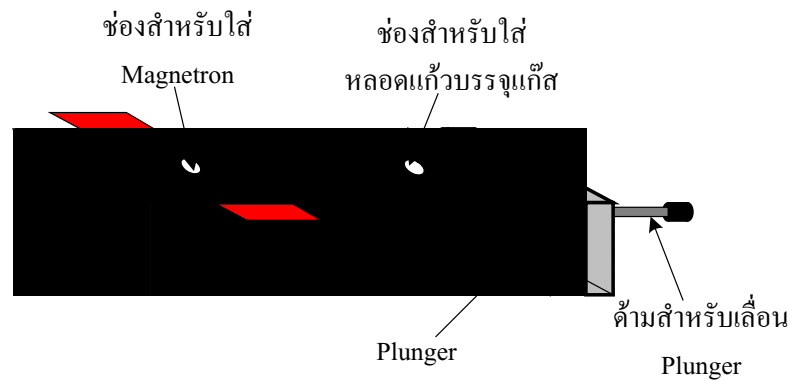


รูปที่ 120 Size Diagram of Waveguide Cavity Plasma Source

(a) Front View

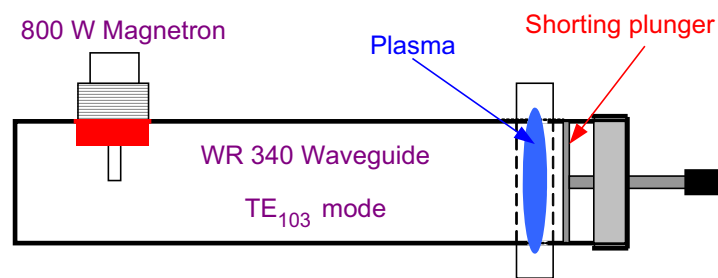
(b) Side View

(c) Top View

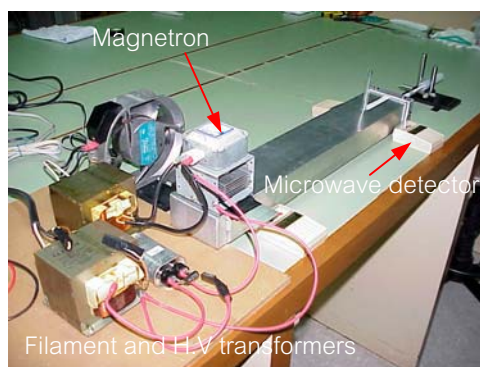


รูปที่ 121 Waveguide Cavity Plasma Source Diagram

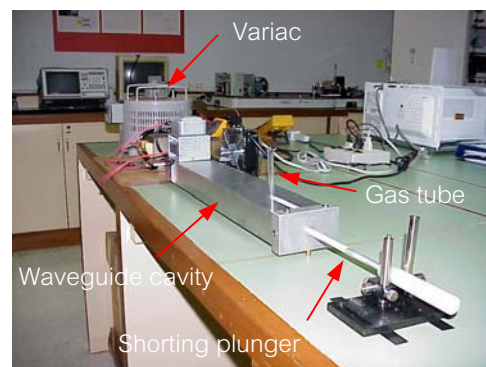
เมื่อทำการติดตั้ง magnetron และ หลอดบรรจุแก๊ส เข้ากับ waveguide cavity แล้ว มีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 122 สำหรับภาพถ่ายของ waveguide cavity plasma source แสดงดังรูปที่ 123



รูปที่ 122 Schematic Diagram of Microwave Induces Plasma



(a)



(b)

รูปที่ 123 Waveguide Cavity Plasma Source

(a) Magnetron , Filament and High Voltage Transformers

(b) Waveguide Cavity and Shorting Plunger

จากการทดลองสร้างพลาสมาด้วยหลอดบรรจุแก๊สแบบปิดขนาด $\varnothing$ 1 cm ความยาว 10 และ 15 cm ความดันระดับ 0.1 – 1 mbar พบว่า เมื่อทำการเลื่อน shorting plunger ให้เกิดจุดที่เป็น resonance ระบบที่สร้างขึ้นสามารถทำให้แก๊สถูก ionized กลายเป็นพลาสมาได้ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 124



รูปที่ 124 พลาสมาที่เกิดขึ้นภายในหลอดแก้ว ซึ่งเกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า waveguide cavity ที่สร้างขึ้นสามารถนำพาคลื่นไมโครเวฟมากระตุ้นทำให้แก๊สในหลอดถูก ionized กลายเป็นพลาสมาได้ ซึ่งจะได้นำหลักการและวิธีการเกิดพลาสมาด้วยวิธีดังกล่าวมาสร้างและพัฒนา Microwave Ion Source ต่อไป

สรุปผลการดำเนินงานวิจัยในช่วง Phase 1B

สรุปผลการวิจัยในระยะ 6 เดือน ที่ 1

1. ในด้านการทดลองระบบโพกัสนั้น ได้ผลการทดลองบางส่วนแต่ยังไม่สามารถสรุปผลได้ชัดเจนนัก ยังคงต้องดำเนินการศึกษาและปรับปรุงระบบต่อไป ทั้งในแง่ของระบบโพกัสและระบบ extraction ที่เหมาะสมกับระบบโพกัสที่จะพัฒนาขึ้น
2. ผลการคำนวณพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการโพกัสลำไอออนที่ต้องคำนึงแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ตัวระบบโพกัสเอง และลักษณะของลำไอออนที่เข้าสู่ระบบโพกัส
3. ในแง่ของระบบโพกัส ขนาดของเลนส์ทรงกระบอกทั้งความยาวและรัศมีจะมีผลต่อระยะโพกัสโดยตัวของมันเอง อย่างไรก็ตาม ระยะโพกัสของระบบสามารถควบคุมได้ด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ระบบเลนส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบเลนส์ที่มีลักษณะสมมาตรทั้งในด้านรูปร่างและการป้อนศักย์ไฟฟ้า การปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าของเลนส์ทรงกระบอกตัวกลางเพียงตัวเดียวก็สามารถควบคุมระยะโพกัสได้ตามต้องการ
4. ในแง่ของลักษณะของลำไอออนที่จะทำการโพกัส พบว่าลำไอออนที่สามารถโพกัสได้ดีควรมีขนาดของลำไอออนที่เล็กและมีการลู่ออก (divergence) ไม่มากนัก ดังนั้น ในการออกแบบระบบโพกัสควรมี Aperture ที่เหมาะสมเพื่อกำหนดขนาดและการลู่ออกของลำไอออนให้เหมาะสมด้วย
5. จากการคำนวณยังพบว่าพลังงานของลำไอออนที่เข้าสู่ระบบโพกัสก็มีผลต่อระยะโพกัสด้วย ดังนั้นลำไอออนที่จะถูกโพกัสควรมีการกระจายของพลังงานในช่วงแคบ ๆ จากการคำนวณพบว่า อนุภาคที่มีพลังงานต่างกัน 5% จะมีระยะโพกัสต่างกันชัดเจน
6. จากการคำนวณความเร็วของอนุภาคในระบบโพกัสพบว่า ระบบที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าในลักษณะสมมาตร ดังตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณนี้ อนุภาคอาจถูกเร่งหรือหน่วงให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ แต่เมื่อผ่านระบบโพกัสออกมาจะมีความเร็วไม่ต่างไปจากความเร็วเริ่มต้น ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานเพื่อการเซาะร่องชิ้นงาน พลังงานของลำไอออนที่เหมาะสมกับการใช้งานจะต้องกำหนดด้วยระบบ extraction ไม่ใช่ระบบโพกัส
7. ระบบโพกัสที่ใช้ในการทดลองที่ได้ดำเนินการยังไม่ได้ใช้ผลที่ได้จากการคำนวณนี้เนื่องจากการดำเนินการในงานในลักษณะขนานกันไม่ได้รอผลการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณจะถูกต่อยอดเมื่อทราบค่า parameter ของลำไอออนที่ถูกต้องเท่านั้น และในการคำนวณนี้ไม่ได้พิจารณาผลของ coulomb interaction ซึ่งจะใกล้เคียงความจริงเฉพาะกรณีที่มี ion current มีค่าต่ำมากเท่านั้น

8. ถึงแม้จะไม่สามารถกำหนด parameter ที่ถูกต้องของลำไอออนได้ การคำนวณก็ยังคงมีประโยชน์ในแง่การสร้างความเข้าใจในระบบโพกัสลำไอออน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการออกแบบสร้างในการดำเนินงานขั้นต่อไป

สรุปผลการวิจัยในระยะ 6 เดือน ที่ 2

1. แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้ในการศึกษาระบบโพกัสในช่วง 6 เดือนที่ 2 นี้เป็นแหล่งกำเนิดไอออนของบริษัท LK Technologies, Inc. Model NGI 3000 Ion Gun ซึ่งออกแบบไว้เพื่อใช้สำหรับทำความสะอาดผิวหน้าสารตัวอย่างในระบบสุญญากาศด้วยขบวนการ ion sputtering แหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ไม่มีระบบโพกัสลำไอออน จากการวัดพบว่าแหล่งกำเนิดไอออนนี้ให้กระแสไอออนประมาณ $5 \mu\text{A}$ ที่ beam energy 2 keV ที่ความดัน 2.0×10^{-4} mbar ด้วย emission current 20 mA มี beam divergence 0.13 rad (full angle) โดยมี beam width 5 mm ที่ระยะ 25 mm จากแหล่งกำเนิดไอออนและมี beam width 7 mm ที่ระยะ 40 mm
2. ระบบโพกัสที่ศึกษาเป็นชนิด 3 cylindrical electrostatic lens system (einzell lens) ประกอบด้วยเลนส์สแตนเลสทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ยาว 6 mm 3 ตัววางห่างกัน 2 mm ทำงานใน decelerating mode
3. การวัดการโพกัสของระบบทำโดยวัดขนาดของลำไอออนที่ระยะต่าง ๆ โดยใช้ slit ขนาด 1 และ 2 mm ปิดหน้า faraday cup แล้ววัดกระแสไอออนทุก ๆ ระยะ 1 และ 0.5 mm ที่เลื่อน faraday cup ผ่านแนวตัดขวางของลำไอออน จากนั้นนำค่ากระแสที่ได้มาพล็อตกับระยะที่เลื่อนแล้ววัดค่า FWHM เป็นขนาดของลำไอออน ซึ่งจะถูกต้องเมื่อลำไอออนมีลักษณะเป็น Gaussian beam จากการวัดเบื้องต้นพบว่าไม่ถูกต้อง แต่เพื่อให้ได้ผลการวัดระยะโพกัสในเบื้องต้นจึงใช้วิธีนี้
4. การวัดขนาดของลำไอออนที่ถูกต้องจะต้องใช้ pin hole แทนการใช้ slit แล้วทำการ scan 2 มิติในระนาบตัดขวางของลำไอออน ซึ่งอาจต้องเก็บข้อมูลถึง 5000 ข้อมูลต่อการวัดขนาดลำไอออนที่ระยะหนึ่ง ๆ จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบ scan และระบบบันทึกข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำในงานวิจัยช่วง 6 เดือนต่อจากนี้
5. จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ slit ขนาด 1 หรือ 2 mm และใช้ความละเอียดในการเลื่อน Faraday cup 1 หรือ 0.5 mm จะได้ผลการวัดไม่ต่างกันถ้า beam width ที่วัดมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของ slit
6. ผลการทดสอบระบบโพกัสที่ความดันต่ำ (5×10^{-5} mbar) พบว่าระบบสามารถโพกัสลำไอออนได้แต่เมื่อทำงานที่ความดันสูง (2.0×10^{-4} mbar) พบว่าระบบไม่สามารถโพกัสลำ

ไอออนได้ทั้งนี้เกิดเนื่องจากที่ความดันสูง mean free path จะมีค่าน้อยจึงมีการ scattering ของลำไอออนมาก

7. ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ทรงกระบอกหัวท้ายจะมีผลต่อขนาดของลำไอออนในการใช้งานค่าของศักย์ไฟฟ้านี้จะต้องมีค่าที่เหมาะสมสำหรับ beam energy ค่าต่าง ถ้า beam energy มีค่าสูงขึ้นจะต้องใช้โวลเตจที่สูงตามไปด้วย(เทียบกับโวลเตจที่เลนส์ทรงกระบอกตัวกลาง) แต่จะมีค่าเกิน extractor voltage ของแหล่งกำเนิดไอออนไม่ได้ เนื่องจากระบบเลนส์ที่ใช้งานนี้ทำงานใน decelerating mode ลำไอออนที่จะผ่านระบบเลนส์ได้จะต้องมีพลังงานสูงพอที่เอาชนะแรงผลักจากระบบเลนส์ได้ จากการทดลองพบว่ากระแสไอออนที่ผ่านระบบเลนส์ออกมา (วัดรวมที่ slit ด้วย) มีค่าลดลงเหลือประมาณ 3.5 μA (เมื่อไม่มีระบบโพกัสมีค่าประมาณ 5 μA) แสดงว่าในลำไอออนมีการกระจายของพลังงานค่าหนึ่งอนุภาคที่มีพลังงานต่ำจะถูกผลักไม่สามารถผ่านระบบเลนส์ได้ ทำให้กระแสไอออนที่วัดได้มีค่าลดลง ดังนั้นการกระจายพลังงานของอนุภาคในลำไอออนจึงมีพารามิเตอร์หนึ่งที่ต้องวัดในงานวิจัยช่วง 6 เดือนต่อจากนี้
8. ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเลนส์ทรงกระบอกตัวกลางจะมีผลในการควบคุมระยะโพกัส ถ้ามีค่ามากขึ้น(เป็นลบมากขึ้น) จะทำให้ระยะโพกัสยาวขึ้น
9. ในส่วนระบบกวาดลำไอออนได้ออกแบบให้ใช้โวลเตจ 0 – 10 โวลต์ ควบคุมโวลเตจในช่วง 0 – 5000 โวลต์ เพื่อป้อนให้กับเพลทอนาน 2 คู่ ที่ใช้เบี่ยงเบนลำไอออนในแนวตั้งและแนวนอน การกวาดสามารถควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
10. ระบบการกวาดที่ออกแบบและสร้างในเบื้องต้นนี้ใช้วงจรแปลงดิจิตอลเป็นแอนาล็อกขนาด 8 บิต จากการคำนวณพบว่ามีความละเอียดในการกวาดไม่สูงนักอาจต้องปรับปรุงวงจรโดยใช้วงจรแปลงดิจิตอลเป็นแอนาล็อกขนาด 12 บิต เพื่อให้มีความละเอียดในการกวาดสูงขึ้น

สรุปผลการวิจัยในระยะ 6 เดือน ที่ 3

1. แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้ในการศึกษาระบบโพกัสในช่วง 6 เดือนที่ 3 นี้ยังคงเป็นแหล่งกำเนิดไอออนของบริษัท LK Technology, Inc. Model NGI 3000 Ion Gun เช่นเดียวกับที่ใช้ในช่วง 6 เดือนที่ 2
2. เพื่อแก้ปัญหาการเกิด secondary electron ที่เกิดจากการวัดกระแสไอออนและเพื่อให้การวัด beam profile รวมทั้ง beam width มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น จึงได้มีการออกแบบ Faraday cup ใหม่และใช้ insulator support เป็น ceramic แทนการใช้ Teflon เพื่อลดการสะสมของประจุ

3. Faraday cup ที่ออกแบบใหม่จะมีปากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 5 mm เพื่อลดโอกาสที่ secondary electron จะหลุดออกจาก Faraday cup ลงให้น้อยที่สุด ด้านหน้าของ Faraday cup มี mask ที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm (ลดลงเป็น 1 mm เมื่อใช้วัดระยะโฟกัสของเลนส์) บัง Faraday cup ไว้เพื่อไม่ให้ลำไอออนเข้าชน Faraday cup โดยตรงและยังทำให้ resolution ของการวัด beam profile สูงขึ้นด้วย
4. เพื่อให้การวัดทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะดวกและรวดเร็ว ได้มีการออกแบบและสร้างระบบ detector scanning system ขึ้น สามารถวัด beam profile ที่ระยะ ต่าง ๆ ได้ ระบบสามารถควบคุมการ scan ให้ Faraday cup เคลื่อนที่ในแนวแกน x แกน y และ แกน z ด้วยคอมพิวเตอร์ โปรแกรมควบคุมการ scan ที่พัฒนาขึ้นสามารถกำหนดความละเอียดของการ scan ได้ถึง 0.1 mm และกำหนดขอบเขตพื้นที่การ scan ได้ถึง $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (ระบบ mechanic ออกแบบไว้ให้รองรับการทำงานที่ความละเอียดถึง $2 \text{ }\mu\text{m}$)
5. การวัดกระแสไอออนได้ปรับปรุงจากการวัดกระแสโดยตรงด้วยแอมป์มิเตอร์ซึ่งมีปัญหาเนื่องจากกระแสไอออนค่อนข้างต่ำค่าที่วัดได้จึงมีการกระเพื่อมมาก เป็นการวัดโวลเตจตกคร่อมตัวต้านทาน $100 \text{ k}\Omega$ แทน โดยมีตัวเก็บประจุ $10 \text{ }\mu\text{F}$ ทำหน้าที่เป็น filter ทำให้สามารถวัดกระแสไอออนระดับ $0.1 \text{ }\mu\text{A}$ ได้
6. ค่ากระแสไอออนที่วัดได้เมื่อ Faraday cup ถูก scan ในระนาบ xy จะถูกวิเคราะห์โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ให้สามารถแสดง profile ของลำไอออนที่ระนาบต่าง ๆ ได้ นอกจากจะแสดง profile ของลำไอออนแล้วโปรแกรมยังสามารถแสดงปริมาณกระแสไอออนรวมที่ระนาบนั้น ๆ ได้ด้วย นอกจากนี้ยังสามารถหาค่ากระแสสูงสุดและตำแหน่งที่มีกระแสสูงสุดรวมถึงขนาดของลำไอออนได้ด้วย
7. เมื่อใช้ระบบการวัดที่ออกแบบใหม่นี้ศึกษาสมบัติของลำไอออนพบว่า ที่ beam energy น้อย ลำไอออนจะมีลักษณะวงรีและมีการกระจายของไอออนไม่สม่ำเสมอ (ต่างจากข้อสมมติฐานเมื่อใช้ระบบการวัดแบบเก่าที่ใช้ในช่วง 6 เดือนที่ 2 และช่วงต้นของช่วง 6 เดือนที่ 3) เมื่อ beam energy มีค่าสูงขึ้น ลำไอออนจะเปลี่ยนไปมีลักษณะกลมมากขึ้น และมีการกระจายของไอออนสม่ำเสมอมากขึ้น
8. จากการศึกษพบว่า ขนาดของลำไอออนจะใหญ่ขึ้น ทั้งด้านยาว (major axis) และด้านกว้าง (minor axis) เมื่อ beam energy มีค่าสูงขึ้น
9. จากการศึกษา beam divergence พบว่า ด้านยาว (major axis) และด้านกว้าง (minor axis) มี divergence ไม่เท่ากัน ด้านยาวจะมี divergence สูงกว่า และยังพบอีกว่า beam divergence ของทั้งด้านยาวและด้านกว้างจะเพิ่มขึ้นเมื่อ beam energy สูงขึ้น
10. จากการศึกษา energy spread พบว่า แหล่งกำเนิดลำไอออนที่ใช้มี energy spread ประมาณ 20 % ของ beam energy ค่า energy spread นี้ถือว่าค่อนข้างสูง เนื่องจาก

แหล่งกำเนิดลำไอออนชนิดนี้ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการทำความสะอาดผิวหน้าของสารตัวอย่างในระบบสุญญากาศด้วยขบวนการ ion sputtering จึงมี beam divergence สูงและทำให้ energy spread สูงตามไปด้วย

11. ระบบโพกัสที่ใช้ในช่วง 6 เดือนที่ 3 นี้ ได้มีการออกแบบใหม่ทั้งหมด โดยเปลี่ยนจาก cylindrical lens เป็น disc lens ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแบบจาน 4 ขั้ว และใช้ ceramic support แทน Teflon โดยมี sleeve electrode ทำหน้าที่ลดขนาด divergence angle ของลำไอออนก่อนเข้าระบบโพกัส แทนการลดขนาดของ exit hole ที่ extractor electrode ซึ่งมีข้อดีคือสามารถบีบให้ลำไอออนให้มีขนาดเล็กลงโดยไม่ทำให้กระแสไอออนลดลงเลย
12. จากการศึกษาระบบโพกัสพบว่าระบบสามารถโพกัสลำไอออนได้ สามารถปรับระยะโพกัสของเลนส์ได้โดยการปรับโวลเตจของเลนส์ โดยระยะโพกัสจะสั้นลงเมื่อเพิ่มโวลเตจที่เลนส์ ในขณะที่เดียวกันขนาดของจุดโฟกัสก็จะเล็กลงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวโพกัสของเลนส์ยังเปลี่ยนแปลงตาม beam energy ด้วย โดยระยะโพกัสจะยาวขึ้นเมื่อ beam energy มีค่าสูงขึ้น
13. ลำไอออนที่ออกจากระบบโพกัสจะลู่เข้าจนมีขนาดเล็กที่สุดจากนั้นจะเริ่มบานออก จากการสังเกตพบว่าบริเวณที่เรียกว่าจุดโฟกัสนั้นจะไม่ใช่จุดที่ชัดเจนแต่จะเป็นระยะทางช่วงหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากลำไอออนมี energy spread ค่อนข้างสูง นั่นคือลำไอออนประกอบด้วยไอออนที่มีพลังงานหลายค่า ไอออนที่มีพลังงานต่างกันจะมีระยะโพกัสต่างกัน ดังนั้นจุดโฟกัสของลำไอออนจึงมีลักษณะเป็นแนวยาวตามแกน z หมายความว่า ระบบโพกัสจะทำงานได้ดีจะต้องมีแหล่งกำเนิดไอออนที่มี energy spread น้อย ๆ
14. ระบบกวาดลำไอออนที่ออกแบบนี้สามารถกวาดลำไอออนได้ด้วยความสะดวก 6.5 ไมโครเมตร ระบบควบคุมที่ออกแบบสามารถควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงการทำงาน 0 – 5000 V

สรุปผลการวิจัยในระยะ 6 เดือน ที่ 4

1. แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้ในการศึกษาระบบโพกัสในช่วง 6 เดือนที่ 4 นี้ยังคงเป็นแหล่งกำเนิดไอออนของบริษัท LK Technology, Inc. Model NGI 3000 Ion Gun เช่นเดียวกับที่ใช้ในช่วง 6 เดือนที่ 2 และ 3
2. จากการศึกษาลักษณะสมบัติของแหล่งกำเนิดไอออนเพิ่มเติมพบว่า การลดขนาดและลดการลู่ออกของลำไอออนจากแหล่งกำเนิดไอออนก่อนเข้าระบบโพกัสสามารถทำได้โดยการลดขนาดของ exit hole ของแหล่งกำเนิดไอออนลง แต่จะเป็นผลให้กระแสไอออนลด

- ลงด้วย ดังนั้นการใช้ sleeve electrode ช่วยในการลดขนาดและการรบกวนของลำไอออนแบบเดิมจึงเหมาะสมกว่าเพราะว่าไม่ทำให้กระแสไอออนลดลง
3. เมื่อ emission current ของแหล่งกำเนิดไอออนเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสไอออนเพิ่มขึ้นตามไปด้วยแต่จะไม่มีผลต่อขนาดของลำไอออน การรบกวนและ energy spread ของแหล่งกำเนิดไอออนแต่อย่างใดและเมื่อผ่านระบบโพกัสก็จะได้กระแสไอออนที่จุดโพกัสสูงขึ้นโดยไม่มีผลต่อระยะโพกัสและขนาดของจุดโพกัสแต่อย่างใด แต่เมื่อผ่านจุดโพกัสไปแล้วในกรณีที่ใช้ emission current สูงกว่า (ความหนาแน่นของกระแสไอออนสูงกว่า) ลำไอออนจะรบกวนมากกว่า
 4. การเพิ่มระยะห่างระหว่าง lens electrode และการเพิ่มความยาวโดยรวมของระบบเลนส์จะทำให้สามารถลดโวลเตจที่ใช้ในการโพกัสลงได้และสามารถลดขนาดของจุดโพกัสที่ระยะโพกัสไกล ๆ ได้ด้วย ข้อมูลจากผลการทดลองในขณะนี้ พบว่าระบบเลนส์ที่มีระยะห่างระหว่าง lens electrode 7,6,7 มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบโพกัสลำไอออนมากที่สุด
 5. การลดความดันของระบบสุญญากาศลงจะทำให้ระบบโพกัสทำงานได้ดีขึ้นคือสามารถเพิ่มระยะโพกัสและลดขนาดของจุดโพกัสลงได้ แต่จะเป็นผลให้กระแสไอออนลดลงเนื่องจากการลดความดันของระบบสุญญากาศของระบบที่ใช้นี้จะทำให้ความดันในแหล่งกำเนิดพลาสมาของแหล่งกำเนิดไอออนลดลงด้วย ดังนั้นในอนาคตการออกแบบระบบที่เหมาะสมจะต้องแยก plasma chamber ออกจาก main chamber โดยใช้ differential pump
 6. profile ของลำไอออนที่มีลักษณะไม่กลมนั้นเกิดจากความไม่สมมาตรภายในแหล่งกำเนิดไอออนเอง ไม่ได้เกิดจากระบบวัดหรือระบบโพกัส อย่างไรก็ตามการติดตั้งระบบเลนส์ที่คลาดเคลื่อนก็อาจเป็นสาเหตุให้ profile ของลำไอออนบิดเบี้ยวไปได้เช่นกัน
 7. การปรับปรุงระบบโพกัสจาก single focusing lens เป็น double focusing lens ทำให้สามารถเพิ่มระยะโพกัสให้ยาวขึ้นเป็น 85 mm หรือเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่าได้ โดยขนาดของจุดโพกัสยังคงเป็น 1 mm เท่าเดิม ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบวัด profile ของลำไอออนคือมี resolution ที่ 1 mm
 8. ระบบกวาดลำไอออนที่พัฒนาขึ้นซึ่งประกอบด้วย deflection plate สามารถเบี่ยงเบนลำไอออนได้ด้วยความไวประมาณ $2^{\circ}/100\text{ V}$
 9. จากการทดลองพบว่าระบบกวาดลำไอออนจะทำให้ profile ของลำไอออนผิดรูปไปเมื่อลำไอออนเบี่ยงเบนไปเป็นมุมที่มากขึ้นเกิดเนื่องจากผลสนามไฟฟ้าระหว่าง deflection plate กับ faraday cup ผลนี้สามารถลดลงได้เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่าง deflection plate กับ faraday cup ให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ก็ต่อเมื่อสามารถเพิ่มระยะโพกัสของระบบเลนส์ให้ได้ตามต้องการ

10. การลดกำลังของ magnetron สามารถทำได้โดยการลด high voltage ที่ anode ของ magnetron ลง ในขณะที่ยังคงจ่ายกระแสให้ filament เท่าเดิม จากการทดลองพบว่าสามารถลดกำลังของ magnetron จาก 800 W ลงเหลือ 4 W เมื่อลดโวลเตจของขด primary ของ high voltage transformer จาก 220 V เหลือ 145 V
11. จากการทดลองพบว่ากำลังของ magnetron จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของ magnetron ด้วย และเมื่อให้ magnetron ทำงานที่กำลังสูงในระดับหนึ่งแล้ว magnetron ยังคงสามารถผลิตคลื่นไมโครเวฟต่อไปได้ถึงแม้จะหยุดจ่ายกระแส filament แล้วก็ตาม ทั้งนี้เกิดเนื่องจากกระบวนการ self sustaining ภายในหลอด magnetron
12. จากการศึกษาในขั้นต้นพบว่าสามารถใช้ commercial waveguide WR340 มาพัฒนาเป็น waveguide cavity plasma source โดยทำให้เกิดการ resonance ของคลื่นไมโครเวฟที่โหมด TE_{103} ซึ่งจะสามารถทำให้ก๊าซอาร์กอนและนีออนที่ความดันประมาณ 0.1 – 1 mbar เกิดเป็นพลาสมาได้ ซึ่งจะสามารถพัฒนาต่อไปเป็น microwave ion source ต่อไปในอนาคตได้

ภาคผนวก ก

การศึกษาระบบฟอสล์ำไอออนโดยการคำนวณ

ภาคผนวก ก

การศึกษาระบบโพกัสลำไอออนโดยการคำนวณ (Focusing System Modeling)

ในการศึกษาระบบโพกัสลำไอออนของการวิจัยในช่วง phase 1B ที่ผ่านมานอกจากนี้ ก่อนที่จะทำการสร้างและออกแบบระบบการโพกัสลำไอออนด้วย Electrostatic Cylindrical Lens และ Disc Lens นั้น เพื่อให้มีความเข้าใจและเรียนรู้ถึงพฤติกรรมเคลื่อนที่อนุภาคภายในได้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากระบบเลนส์ ในเบื้องต้นจึงได้ทำการศึกษาระบบโพกัสโดยการคำนวณเส้นทางของลำไอออนใน Electrostatic Cylindrical Lens โดยโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมา ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

1. The Simulation of Ion Beam Trajectory in Focusing System

Equation of motion

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = qE_r = -q \frac{\partial V}{\partial r} \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = qE_z = -q \frac{\partial V}{\partial z} \quad (2)$$

relation :

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{dr}{dz} \frac{d^2 z}{dt^2} + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \frac{d^2 r}{dz^2} \quad (3)$$

$$\left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = v_z^2 = \frac{2(E_k - qV)}{m \left[\left(\frac{dr}{dz} \right)^2 + 1 \right]}$$

E_k = charge particle initial kinetic energy (J)

$$\left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = v_z^2 = \frac{2q}{m} \frac{(E_k - V)}{\left[\left(\frac{dr}{dz} \right)^2 + 1 \right]} \quad (4)$$

E_k = charge particle initial kinetic energy (eV)

From (1) and (3)

$$m \left[\frac{dr}{dz} \frac{d^2z}{dt^2} + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \frac{d^2r}{dz^2} \right] = -q \frac{\partial V}{\partial r} \quad (5)$$

From (2), (4) and (5)

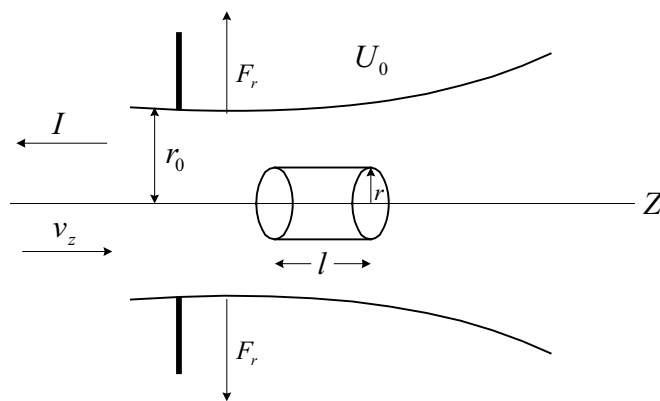
$$m \left[\frac{dr}{dz} \left(\frac{-q}{m} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{2q}{m} \frac{(E_k - V)}{\left[\left(\frac{dr}{dz} \right)^2 + 1 \right]} \frac{d^2r}{dz^2} \right] = -q \frac{\partial V}{\partial r}$$

$$-\frac{dr}{dz} \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{2}{m} \frac{(E_k - V)}{\left[\left(\frac{dr}{dz} \right)^2 + 1 \right]} \frac{d^2r}{dz^2} = -\frac{\partial V}{\partial r}$$

Equation of motion without space charge effect :

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \frac{\left[1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right]}{2(E_k - V)} \left[\frac{\partial V}{\partial z} \frac{dr}{dz} - \frac{\partial V}{\partial r} \right] \quad (6)$$

Space-Charge Effect



Gauss's Law :

$$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_v \rho_v dv$$

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_o} \int_v \rho_v dv$$

in the space

$$\oint_s \vec{E}_r \cdot d\vec{s} + \oint_s \vec{E}_z \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_o} \int_v \rho_v dv$$

use Ostrogradsky-Gauss theorem for the electric field intensity flow vector

$$2\pi r l E_r = \frac{1}{\epsilon_o} (\pi r^2 l \rho)$$

$$E_r = \frac{\rho}{2\epsilon_o} r$$
(7)

from

$$\rho = \frac{j}{v_z} = \frac{I}{\pi r_o^2 \left[\frac{2(E_k - V)}{m \left[1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right]} \right]^{1/2}}$$

electric field from space charge :

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{I}{2\pi \epsilon_o} \left[\frac{1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2}{\frac{2q}{m} (E_k - V)} \right]^{1/2} \frac{r}{r_o}$$
(8)

Equation of motion with space charge effect

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{\left[1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right]}{2(E_k - V)} \left[\frac{\partial V}{\partial z} \frac{dr}{dz} - \frac{\partial V}{\partial r} + E_r \right]$$
(9)

from (8)

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \frac{\left[1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2\right]}{2(E_k - V)} \left[\frac{\partial V}{\partial z} \frac{dr}{dz} - \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{I}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2}{\frac{2q}{m}(E_k - V)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{r}{r_0} \right]$$

Equation of motion with space charge effect :

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \frac{I}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{m}{2q}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2}{(E_k - V)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{r}{r_0} + \frac{\left[1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2\right]}{2(E_k - V)} \left[\frac{\partial V}{\partial z} \frac{dr}{dz} - \frac{\partial V}{\partial r} \right] \quad (10)$$

2. Calculation of Axially Symmetric Potential

Laplace's equation

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

Fourier-Bessel series normalized solution of cylindrical electrostatic lens :

$$V_{(r,z)} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_m \cos\left(\frac{k_m z}{L}\right) I_0\left(\frac{k_m r}{L}\right)}{I_0\left(\frac{k_m R}{L}\right)} \quad (11)$$

for 2-element lens

$$\begin{aligned}
 A_m = & \frac{2(-1)^m}{k_m} - \frac{2V_1}{k_m} \sin \frac{k_m Z_1}{L} + \frac{2}{k_m} \left[\sin \frac{k_m Z_3}{L} - \sin \frac{k_m Z_1}{L} \right] \\
 & - \frac{2}{k_m} \left[V_2 \left(\sin \frac{k_m Z_3}{L} - \sin \frac{k_m Z_2}{L} \right) + V_1 \left(\sin \frac{k_m Z_2}{L} - \sin \frac{k_m Z_1}{L} \right) \right] \\
 & - \frac{2}{k_m} \frac{V_2 - V_1}{Z_2 - Z_1} \left[\frac{L}{k_m} \left(\cos \frac{k_m Z_2}{L} - \cos \frac{k_m Z_1}{L} \right) + \left(Z_2 \sin \frac{k_m Z_2}{L} - Z_1 \sin \frac{k_m Z_1}{L} \right) \right] \\
 & + \frac{2Z_1}{k_m} \frac{V_2 - V_1}{Z_2 - Z_1} \left(\sin \frac{k_m Z_2}{L} - Z_1 \sin \frac{k_m Z_1}{L} \right)
 \end{aligned}$$

for N-element lens

$$\begin{aligned}
 A_m = & \frac{2(-1)^m}{k_m} + \frac{2}{k_m} \left[\sin \frac{k_m Z_{N+1}}{L} - \sin \frac{k_m Z_1}{L} \right] \\
 & - \frac{2}{k_m} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{V_{n+1} - V_n}{Z_{2n} - Z_{2n-1}} \left[\frac{L}{k_m} \left(\cos \frac{k_m Z_{2n}}{L} - \cos \frac{k_m Z_{2n-1}}{L} \right) \right] \\
 & - \frac{2}{k_m} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{V_{n+1} - V_n}{Z_{2n} - Z_{2n-1}} \left[Z_{2n} \sin \frac{k_m Z_{2n}}{L} - Z_{2n-1} \sin \frac{k_m Z_{2n-1}}{L} \right] \\
 & - \frac{2}{k_m} \sum_{n=1}^{N-1} \left[V_n - Z_{2n-1} \frac{V_{n+1} - V_n}{Z_{2n} - Z_{2n-1}} \right] \left[\sin \frac{k_m Z_{2n}}{L} - Z_1 \sin \frac{k_m Z_{2n-1}}{L} \right]
 \end{aligned}$$

from (11)

$$\frac{\partial V}{\partial r} = - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{k_m}{L}\right) A_m \cos\left(\frac{k_m Z}{L}\right) I_1\left(\frac{k_m r}{L}\right)}{I_0\left(\frac{k_m R}{L}\right)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{k_m}{L}\right) A_m \sin\left(\frac{k_m Z}{L}\right) I_0\left(\frac{k_m r}{L}\right)}{I_0\left(\frac{k_m R}{L}\right)}$$

equation (10) in general form

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = r'' = f(z, r, r')$$

where $r' = \frac{dr}{dz}$

or

$$r'' = \frac{I}{4\pi\epsilon_o} \left(\frac{m}{2q} \right)^{1/2} \frac{[1 + r'^2]^{3/2}}{\left[E_k - 1 + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_m \cos(\frac{k_m Z}{L}) I_o(\frac{k_m r}{L})}{I_o(\frac{k_m R}{L})} \right]^{3/2}} \frac{r}{r_o} \\ + \frac{[1 + r'^2]}{2 \left[E_k - 1 + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_m \cos(\frac{k_m Z}{L}) I_o(\frac{k_m r}{L})}{I_o(\frac{k_m R}{L})} \right]} \left[\frac{\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\frac{k_m}{L}) A_m \sin(\frac{k_m Z}{L}) I_o(\frac{k_m r}{L})}{I_o(\frac{k_m R}{L})} r' \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\frac{k_m}{L}) A_m \cos(\frac{k_m Z}{L}) I_1(\frac{k_m r}{L})}{I_o(\frac{k_m R}{L})} \right]$$

solve the equation of motion by using fourth-order Runge-Kutta method :

$$r_{n+1} = r_n + h \left[r'_n + \frac{1}{6} (k_1 + k_2 + k_3) \right]$$

$$r'_{n+1} = r'_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

where

$$k_1 = hf(z_n, r_n, r'_n)$$

$$k_2 = hf(z_n + \frac{h}{2}, r_n + \frac{h}{2} r'_n + \frac{h}{8} k_1, r'_n + \frac{k_1}{2})$$

$$k_3 = hf(z_n + \frac{h}{2}, r_n + \frac{h}{2} r'_n + \frac{h}{8} k_1, r'_n + \frac{k_2}{2})$$

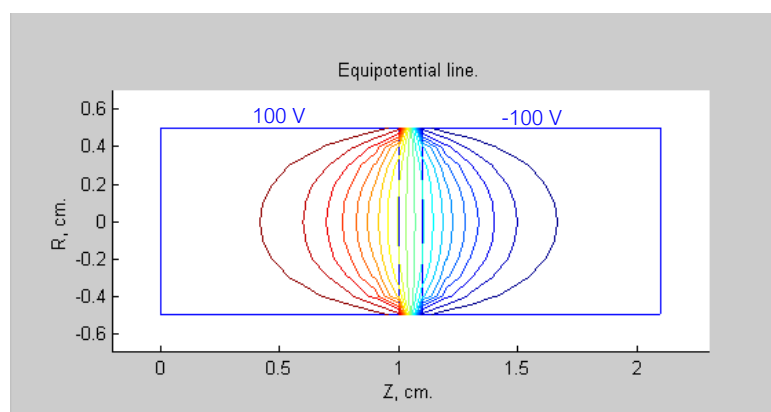
$$k_4 = hf(z_n + h, r_n + h r'_n + \frac{h}{2} k_3, r'_n + k_3)$$

Here n denotes the iteration step ($z = nh$, where h is the step width).

r_n and r'_n are the “reduced” radius and slope, respectively.

3. การทดสอบโปรแกรม

โปรแกรมคำนวณที่เขียนขึ้นได้ถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยการคำนวณ potential ในระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ทรงกระบอก 2 ชั้น ได้ผลการคำนวณเส้น equipotential line ดังรูปที่ 1 ซึ่งผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการวัดโดย electrolytic tank* นอกจากนี้ยังได้ทดสอบผลการคำนวณเส้นทางเดินของอิเล็กตรอนในระบบเลนส์ พบว่าได้ผลตรงกับเอกสารอ้างอิง** และในการศึกษาระบบโพกัสต่อไปนี้จะพิจารณาว่าลำไอออนประกอบด้วยอนุภาคของ Ar^+ เพียงอนุภาคเดียว (ไม่พิจารณาผลของ coulomb interaction) ตามคำแนะนำของ ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ (ที่ปรึกษาโครงการ)



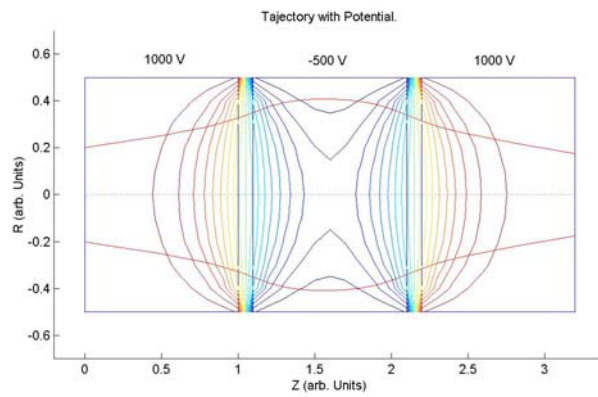
รูปที่ 1 Equipotential line of 2-element cylindrical electrostatic lens

- การศึกษาผลของขนาดเลนส์

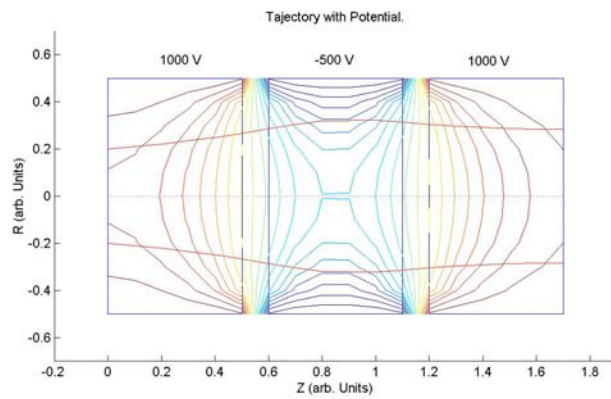
การคำนวณใช้ระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ทรงกระบอก 3 ชั้น แยกพิจารณาเป็น 3 ระบบ ดังรูปที่ 2 (a) , (b) และ (c) ในแต่ละระบบป้อนโวลเตจให้กับเลนส์ที่ 1-3 เป็น 1000 V, -500 V และ 1000 V ตามลำดับ ดังรูป ใช้โพกัสลำไอออนที่มีรัศมีของลำไอออน 0.2 หน่วย, beam divergence 0.1 rad (half angle), พลังงานจลน์เริ่มต้น 1100 eV ผลการคำนวณพบว่าเลนส์ที่มีขนาดสั้นลงหรือรัศมีใหญ่ขึ้นจะสามารถเบี่ยงเบนลำไอออนได้น้อยลงหรือทำให้ระยะโพกัสยาวขึ้นนั่นเอง

* A. Zhigarev, Electron Optics And Electron-Beam Devices, Mir Publishers, 1975

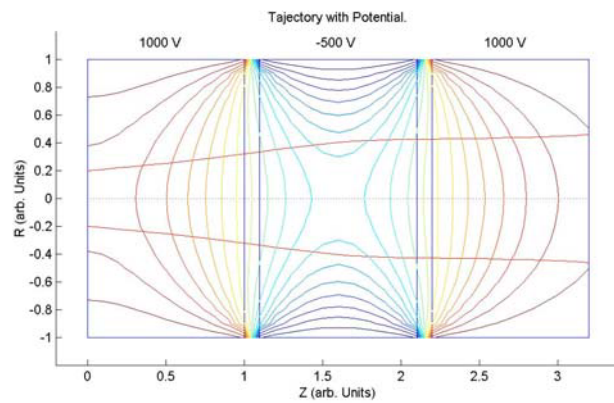
** E. Kisker, Rev. Sci. Instrum. 53(1), Jan. 1982



(a)



(b)



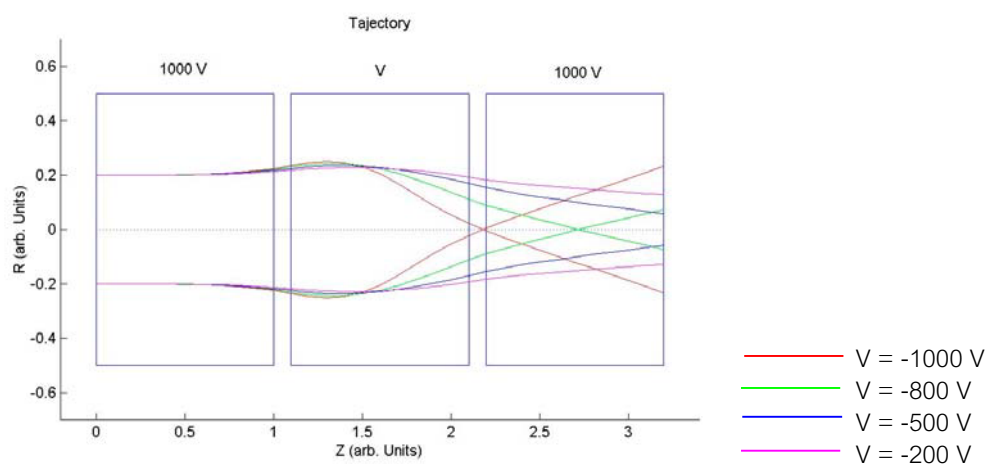
(c)

รูปที่ 2 ผลของขนาดเลนส์ต่อการโฟกัส

- (a) เลนส์มีความยาว 1 หน่วย รัศมี 0.5 หน่วย
- (b) เลนส์มีความยาว 0.5 หน่วย รัศมี 0.5 หน่วย
- (c) เลนส์มีความยาว 1 หน่วย รัศมี 1 หน่วย

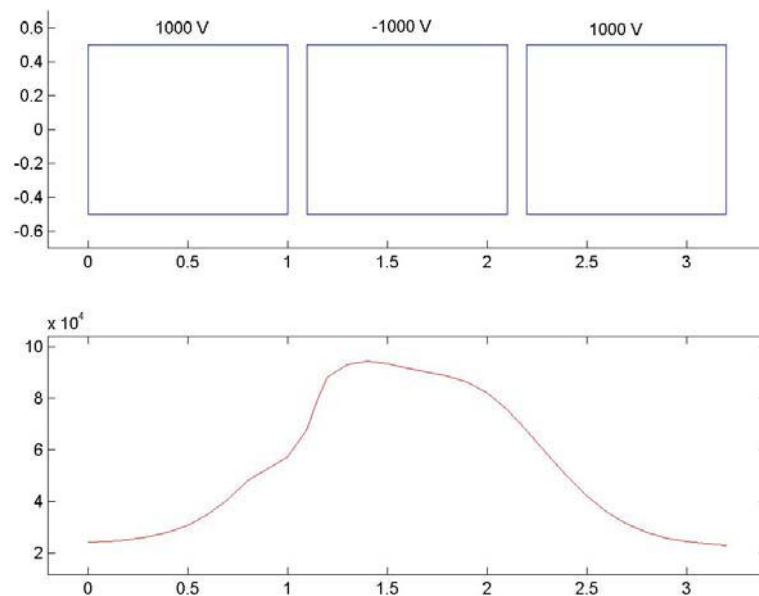
- การศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าของเลนส์

ในระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ทรงกระบอก 3 ชั้น เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าของเลนส์ทรงกระบอกที่ 1 และ 3 คงที่ 1000 V เมื่อลำไอออนที่มีรัศมีของลำไอออน 0.2 หน่วย, beam divergence 0 rad , พลังงานจลน์เริ่มต้น 1100 eV และพบว่าระยะโฟกัสของเลนส์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าของเลนส์ตัวกลางดังรูปที่ 3

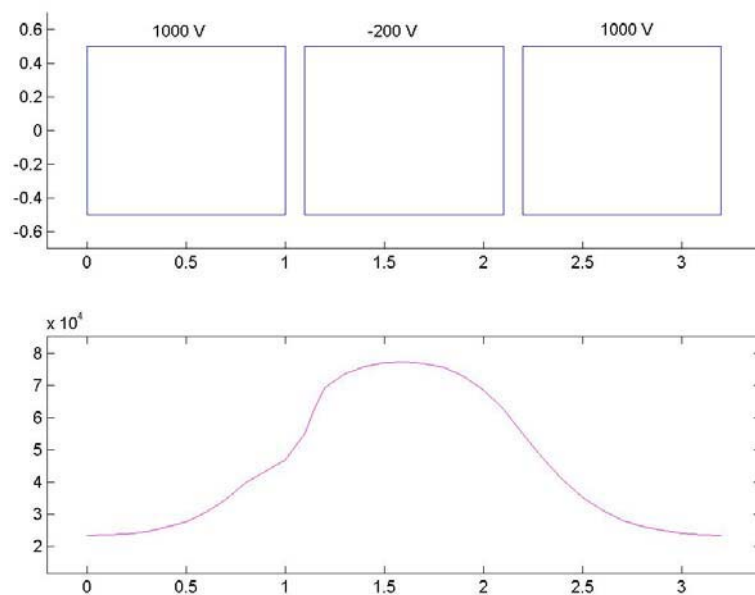


รูปที่ 3 ผลของศักย์ไฟฟ้าของเลนส์ต่อระยะโฟกัส

จากการคำนวณความเร็วของอนุภาค Ar^+ พบว่า อนุภาคจะถูกเร่งจนมีความเร็วสูงสุดเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์ตัวกลางจากนั้นจะถูกหน่วงด้วยสนามไฟฟ้าของเลนส์จนมีความเร็วลดลงเหลือเท่ากับความเร็วเริ่มต้นเมื่ออนุภาคเข้าสู่ระบบเลนส์ โดยความเร็วสูงสุดของอนุภาคจะขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าของเลนส์ตัวกลาง ดังรูปที่ 4



(a)



(b)

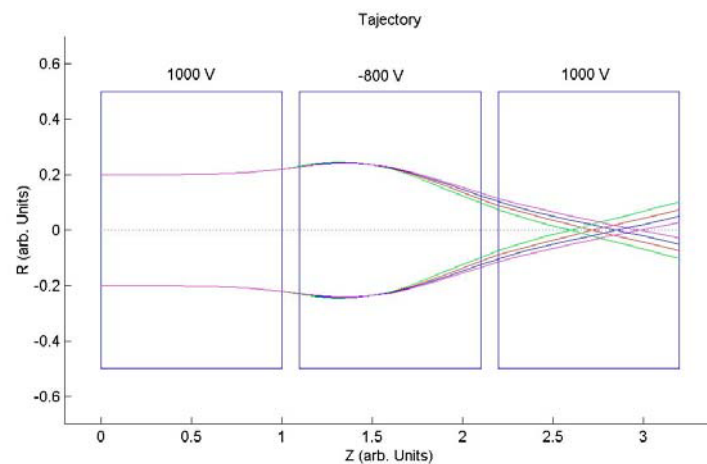
รูปที่ 4 ความเร็วของอนุภาคที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบเลนส์ หน่วยเป็น m/s

(a) เลนส์ตัวกลางมีศักย์ไฟฟ้า -1000 V

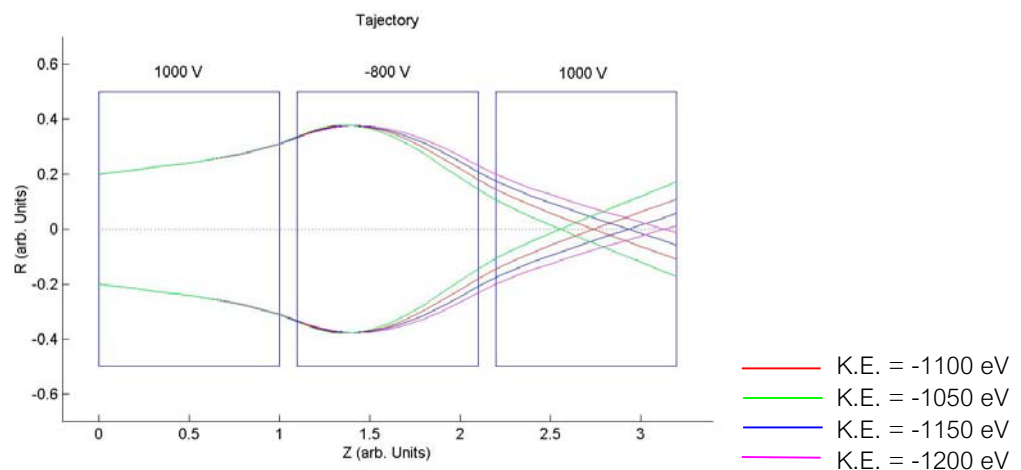
(b) เลนส์ตัวกลางมีศักย์ไฟฟ้า -200 V

- การศึกษาผลของพลังงานของลำไอออน

พลังงานจลน์ (K.E.) ของอนุภาคจะมีผลต่อระยะโฟกัสของเลนส์จากการคำนวณพบว่าเมื่อลำไอออนมีพลังงานสูงจะถูกเบี่ยงเบนโดยระบบเลนส์น้อยจึงมีระยะโฟกัสที่ยาวกว่าอนุภาคที่มีพลังงานต่ำ ในการคำนวณนี้ให้อนุภาคมีพลังงานเริ่มต้นต่างกันประมาณ 5% ดังรูปที่ 5 ดังนั้นในการออกแบบระบบจะต้องพยายามทำให้การกระจายพลังงานของอนุภาคในลำไอออนมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



(a)



(b)

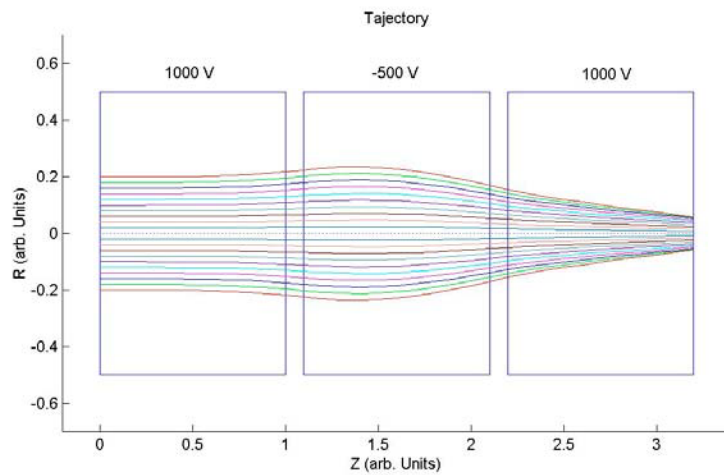
รูปที่ 5 ผลของพลังงานของอนุภาคต่อระยะโฟกัส

(a) รัศมีของลำไอออน 0.2 หน่วย beam divergence 0

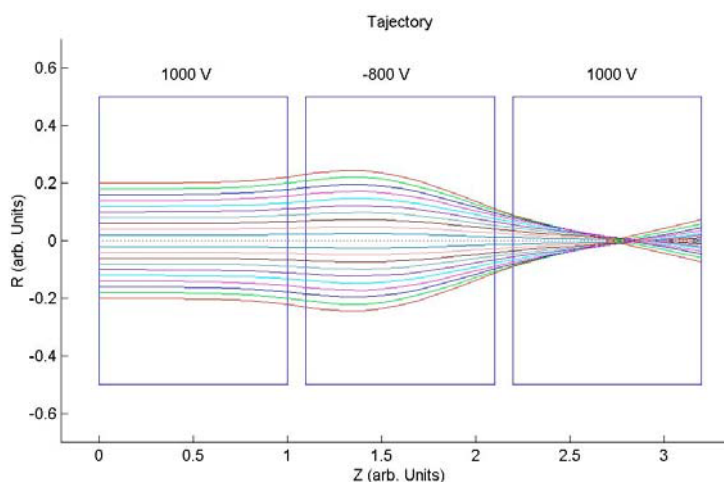
(b) รัศมีของลำไอออน 0.2 หน่วย beam divergence 0.08 rad (half angle)

- การศึกษาผลของขนาดของลำไอออน

ลำไอออนที่ beam divergence เท่ากันแต่มีขนาดของลำไอออนต่างกันจะมีระยะโฟกัสต่างกัน โดยลำไอออนที่มี divergence มาก ขนาดของลำไอออนจะมีผลต่อระยะโฟกัสมากกว่า จากผลการคำนวณเปรียบเทียบลำไอออนที่มี beam divergence 0 rad กับ 0.1 rad (half angle) พบว่าลำไอออนที่มี beam divergence 0 rad มีจุดโฟกัสใกล้เคียงกันมากเมื่อเทียบกับจุดโฟกัสของลำไอออนที่มี beam divergence 0.1 rad ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ดังนั้น ลำไอออนก่อนเข้าสู่ระบบโพกัสควรเป็นลำขนาน จึงจะสามารถโฟกัสให้เป็นจุดได้

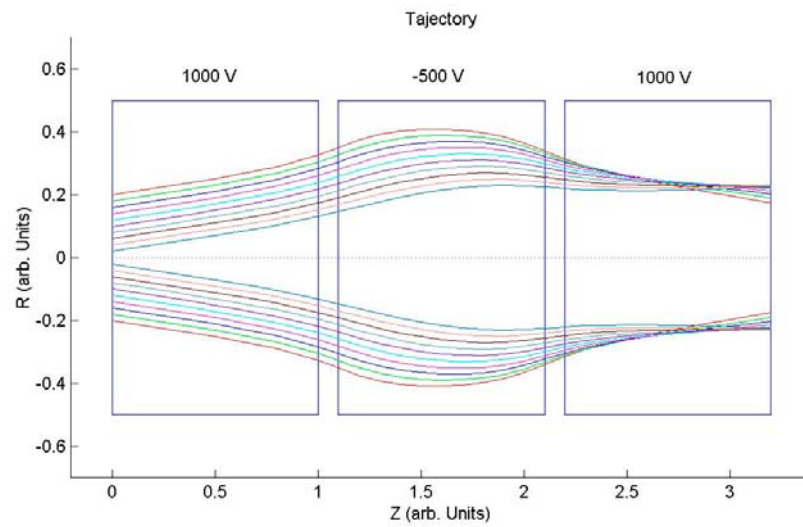


(a)

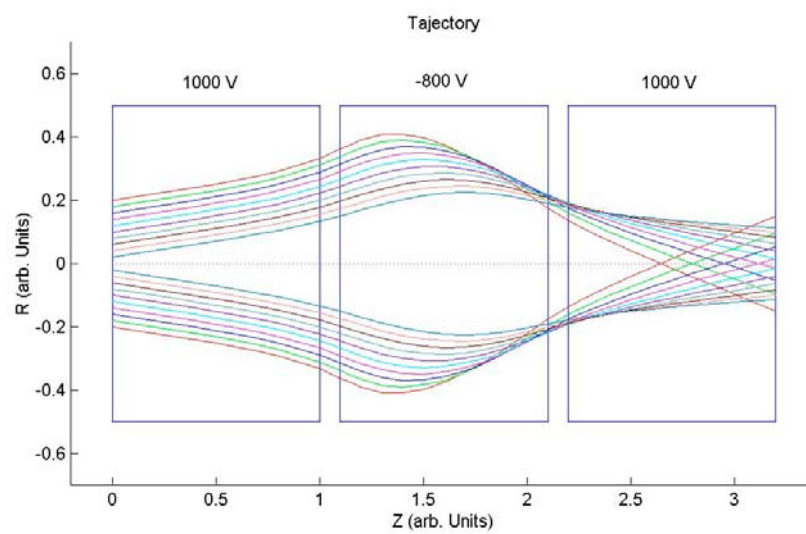


(b)

รูปที่ 6 ผลของขนาดของลำไอออนต่อระยะโฟกัสเมื่อ beam divergence = 0 เลนส์ตัวกลางมีศักย์ไฟฟ้า -500 V (a) และ -800 V (b)



(a)

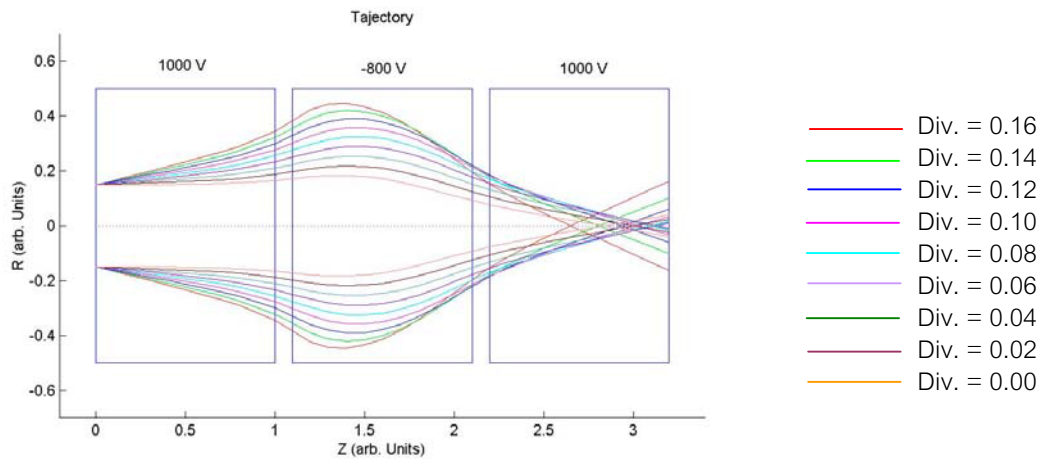


(b)

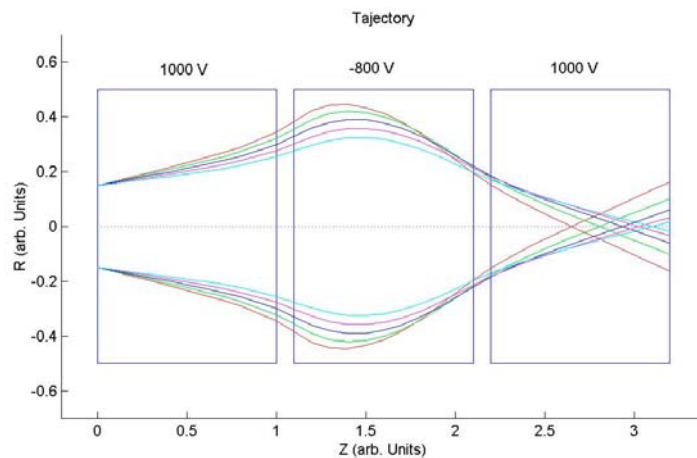
รูปที่ 7 ผลของขนาดของลำไอออนต่อระยะโฟกัสเมื่อ beam divergence = 0.1 rad เลนส์
ตัวกลางมีศักย์ไฟฟ้า -500 V (a) และ -800 V (b)

- การศึกษาผลของ beam divergence

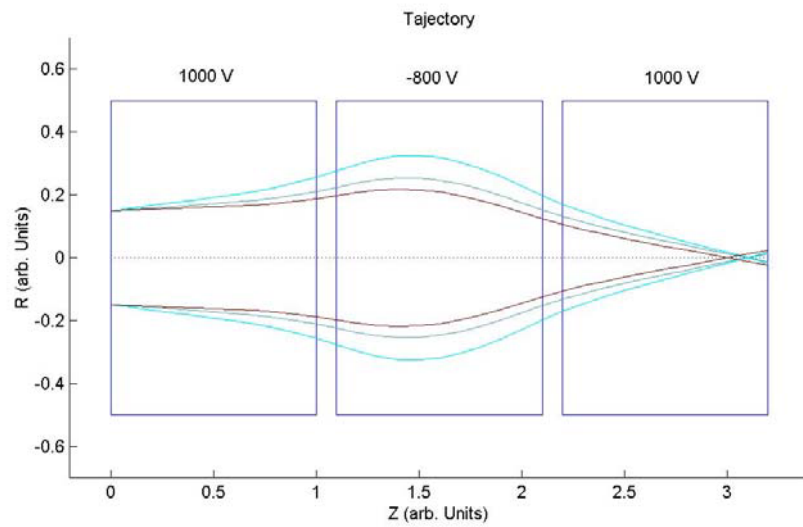
ลำไอออนที่มีรัศมีเท่ากันแต่มี beam divergence ต่างกันจะมีระยะโฟกัสต่างกันด้วย ดังรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาโดยละเอียดพบว่าในช่วง beam divergence ลดลงจาก 0.16 ถึง 0.08 พบว่าระยะโฟกัสจะยาวขึ้นเมื่อ beam divergence ลดลง แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของระยะโฟกัสจะน้อยลงเมื่อ beam divergence ลดลงมากขึ้น ดังรูปที่ 9 เมื่อ beam divergence มีค่าลดลงจาก 0.08 ถึง 0.02 ระยะโฟกัสมีค่าใกล้เคียงกันมากแต่มีแนวโน้มในทางลดลงเล็กน้อยตาม beam divergence ที่ลดลง ดังรูปที่ 10



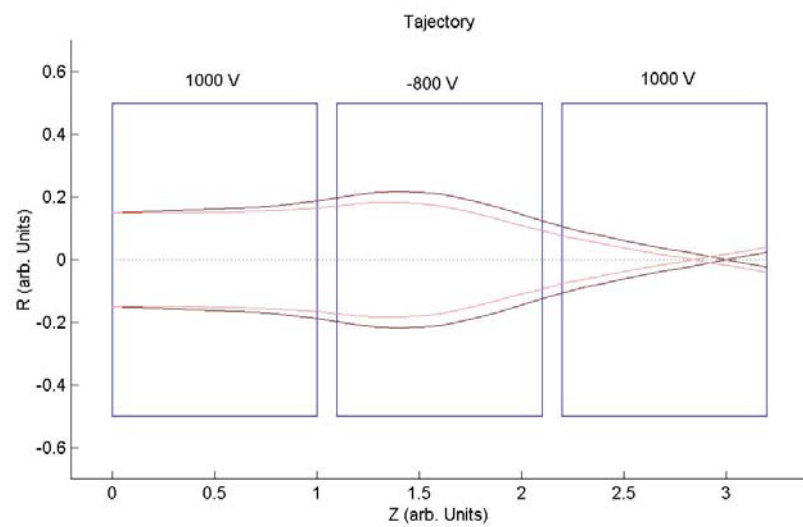
รูปที่ 8 ผลของ beam divergence ต่อระยะโฟกัส



รูปที่ 9 beam divergence ในช่วง 0.16 ถึง 0.08 rad มีผลต่อระยะโฟกัสมาก



(a)

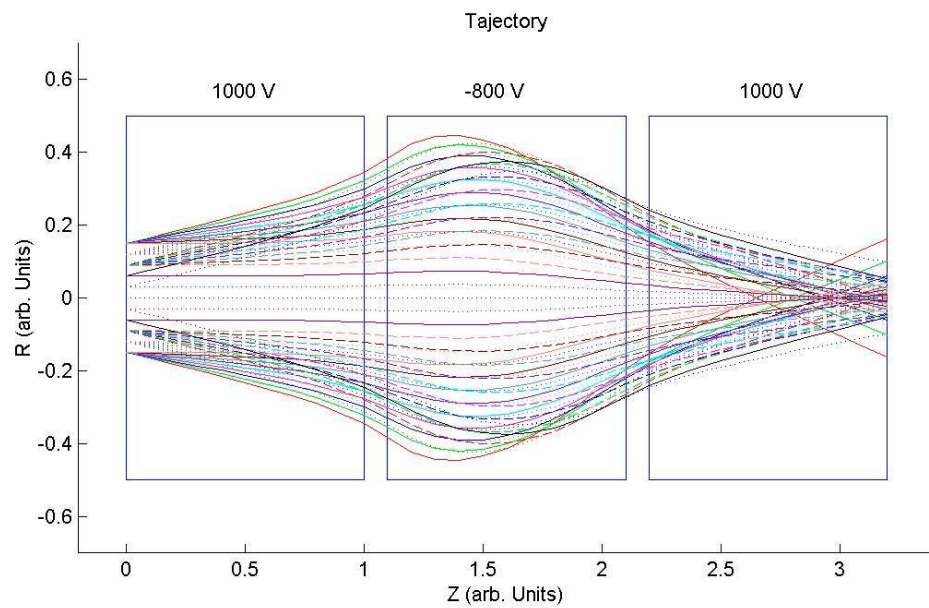


(b)

- รูปที่ 10 beam divergence ต่ำมีผลต่อระยะโฟกัสไม่มากนัก
 (a) beam divergence 0.08 – 0.02 rad (half angle)
 (b) beam divergence 0.02 – 0.00 rad (half angle)

- การศึกษาผลของ beam divergence และขนาดของลำไอออน

เมื่อพิจารณาผลของ beam divergence และขนาดของลำไอออนร่วมกัน ได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลของ beam divergence และขนาดของลำไอออน

ภาคผนวก ข

สัญญาเลขที่ RDG3/11/2541

โครงการวิจัย เรื่อง การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อการประยุกต์ใช้
ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัมป์แซนวิช” Phase 1A

ระยะเวลาโครงการ	สิงหาคม 2541 – มกราคม 2544
ชื่อหัวหน้าโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประยงค์ ดวงดี
หน่วยงาน	ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เสนอต่อ	โครงการพัฒนาเซลล์แสงแดดไทย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

โครงการ
การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออน
เพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัสแซนวิช”Phase 1A

หัวหน้าโครงการ

นักวิจัย

ผู้ช่วยนักวิจัย

ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี

ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาดีดดา

นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คำนำ

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเทคนิคโพกัสไอออนบีมเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัสเซนวิช” ที่รับผิดชอบโดย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนขึ้น 2 ชนิด ได้แก่ แหล่งกำเนิดไอออนชนิด microwave ion source ซึ่งป้อนแหล่งกำเนิดไอออนชนิดหนึ่งที่สามารถผลิตกระแสไอออนได้มากกว่า 10 mA มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดไอออนหลักของโครงการ ส่วนแหล่งกำเนิดไอออนอีกชนิดหนึ่งที่พัฒนาขึ้น คือ hollow cathode magnetron ion source ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถสร้างได้ง่ายและรวดเร็วกว่า มีจุดประสงค์ในการสร้างเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดไอออนสำหรับการศึกษาระบบ ion optics อันได้แก่ ระบบ ion extraction และระบบ ion beam focusing แต่เนื่องจาก microwave ion source เป็นระบบที่ต้องอาศัยเทคนิคการออกแบบและสร้างที่ซับซ้อนกว่า จึงต้องใช้เวลาดำเนินการมาก เพื่อให้การดำเนินการสามารถบรรลุเป้าหมายได้ตามเวลาที่กำหนด จึงได้มอบหมายงานส่วนนี้ให้สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี กลุ่มบริษัทพรีเมียร์ เป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการ

รายงานผลการวิจัยฉบับนี้ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่ดำเนินการที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และส่วนที่ 2 ดำเนินการที่สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี กลุ่มบริษัทพรีเมียร์

การพัฒนาเทคนิคโพกัสลำไอออน
เพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัมเชนวิช” Phase 1A

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออน 2 ชนิด ได้แก่ Hollow Cathode Magnetron Ion Source และ Microwave Ion Source มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดไฮโดรเจนแคโทดแมกนีตรอนหรือไมโครเวฟและส่วนที่เป็นระบบสร้างลำไอออน แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดไฮโดรเจนแคโทดแมกนีตรอน ประกอบด้วยขั้วแอโนดทรงกระบอกและขั้วแคโทดซึ่งเป็นตะแกรงทรงกระบอก โดยขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้จะสวมอยู่ด้วยกันและวางอยู่ในสนามแม่เหล็กก้ำชดิสซาร์จะเกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง การเกิดก้ำชดิสซาร์จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ในส่วนของระบบสร้างลำไอออนเรียกกันว่า ตัวดึงไอออน โดยทั่วไป ระบบการดึงไอออนจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่เจาะเป็นรูสำหรับให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านออกมาสู่ภายนอกได้และมีการป้อนสนามไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วไฟฟ้านั้นเพื่อเป็นการเร่งไอออนให้วิ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา แหล่งกำเนิดไอออนที่พัฒนาขึ้นสามารถให้กระแสไอออนมากกว่า 1.5 mA (ความหนาแน่นกระแสมากกว่า 45 mA/cm^2) นอกเหนือจากนี้ยังได้มีการศึกษาระบบโพกัสลำไอออนบางส่วนด้วย

Development of Focused Ion Beams for Groove – Cutting “Club Sandwich” Solar Cell Phase 1A

Abstract

Two type of ion sources have been developed : Hollow Cathode Magnetron and Microwave Ion Sources. The ion sources consist of two important parts. They are hollow cathode magnetron or microwave plasma source and ion beam formation system. Hollow cathode magnetron discharge is formed in a coaxial cylindrical diode in the presence of an axial magnetic field. The coaxial cylindrical diode consists of a cylindrical anode and cylindrical mesh cathode. Increasing magnetic field increase plasma intensity. The ion beam formation system is called ion extractor. The extractor system consists of a perforated acceleration electrode and the applied high voltage. The developed ion source can produce ion current of greater than 1.5 mA (equivalent to 45 mA/cm^2 current density). In addition, an ion focusing system has also been studied.

รายงานผลการวิจัย
ส่วนที่ 1

รายงานผลงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง

การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออน

เพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัสแซนวิช” Phase 1A

1. ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ ได้แก่

1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ

ระบบปั๊มสุญญากาศ ทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากระบบ จะต้องเลือกขนาดของปั๊มให้มีความเหมาะสม มีอัตราการปั๊มสูงพอที่จะสามารถรักษาความดันให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานได้ ระบบปั๊มสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ตัวได้แก่ diffusion pump และ rotary pump

diffusion pump สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ รุ่น Diffstak 160/700 ของบริษัท Edwards มี pumping speed 700 l/s ซึ่งเป็นอัตราเร็วของการปั๊มที่ปากของตัวปั๊ม ในการใช้งานจะมีการต่อท่อเชื่อมระหว่างตัวปั๊มกับ vacuum chamber เป็นผลให้อัตราการปั๊มที่แท้จริงที่เรียกว่า effective pumping speed ของระบบมีค่าลดลง ซึ่งสามารถคำนวณ ได้โดย

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C}$$

เมื่อ	S_e	=	effective pumping speed
	S_p	=	pumping speed ของ diffusion pump
	C	=	conductance ของท่อ

สำหรับงานวิจัยนี้ ท่อต่อระหว่าง vacuum chamber กับตัว diffusion pump มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 mm มีความยาว 10 cm จากตารางของ conductance จะได้ว่าท่อมีค่า conductance = $130/0.1 = 1300$ l/s ดังนั้น

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{700} + \frac{1}{1300}$$

$$S_e = 455 \text{ l/s}$$

สำหรับ rotary pump การคำนวณ pumping speed สามารถทำได้ดังนี้

$$S_{\text{rot}} \geq \frac{Q_{\text{max}}}{\text{CBP}}$$

เมื่อ S_{rot} = pumping speed ของ rotary pump
 Q_{max} = maximum throughput
 CBP = critical backing pressure

Q_{max} หาได้จาก pump curve โดยทั่วไปที่ความดัน 10^{-2} mbar pumping speed = 60 l/s ดังนั้น
 $Q_{\text{max}} = (60 \text{ l/s})(10^{-2} \text{ mbar}) = 0.6 \text{ mbar.l/s}$ สำหรับ CBP เป็นคุณสมบัติของน้ำมันที่ใช้กับ pump ในที่
 เลือกใช้น้ำมันเบอร์ 704EU ของ Edwards มีค่า CBP = 0.8 mbar ดังนั้น

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

ดังนั้นเลือกใช้ Rotary Vane Pump รุ่น RV12 ของบริษัท Edwards ซึ่งมี pumping speed $12 \text{ m}^3/\text{hr}$

ในการออกแบบ ion source เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จะต้องทดลองปรับ flow rate ของก๊าซที่ป้อนให้กับ ion source ดังนั้นต้องคำนวณว่า เมื่อเพิ่ม flow rate แล้วระบบสุญญากาศที่ออกแบบไว้ยังสามารถรักษาระดับความดันได้หรือไม่

เมื่อ อัตราการ feed ก๊าซ = 5 sccm

$$\text{throughput, } Q = \frac{(20/1000 \text{ l/min})(1013 \text{ mbar})}{(60 \text{ s/min})} = 0.3377 \text{ mbar.l/s}$$

$$\text{ดังนั้น ความดันในระบบสุญญากาศ} = \frac{Q}{S_e} = \frac{0.3377 \text{ mbar.l/s}}{455 \text{ l/s}} = 1.75 \times 10^{-4} \text{ mbar}$$

เมื่อ อัตราการ feed ก๊าซ = 10 sccm ความดันในระบบสุญญากาศ = 3.5×10^{-4} mbar

เมื่อ อัตราการ feed ก๊าซ = 15 sccm ความดันในระบบสุญญากาศ = 5.5×10^{-4} mbar

เมื่อ อัตราการ feed ก๊าซ = 20 sccm ความดันในระบบสุญญากาศ = 7×10^{-4} mbar

จากการคำนวณพบว่า ระบบสุญญากาศในการทดลองนี้สามารถรองรับการ feed ก๊าซได้ใน
 อัตราถึง 15 sccm

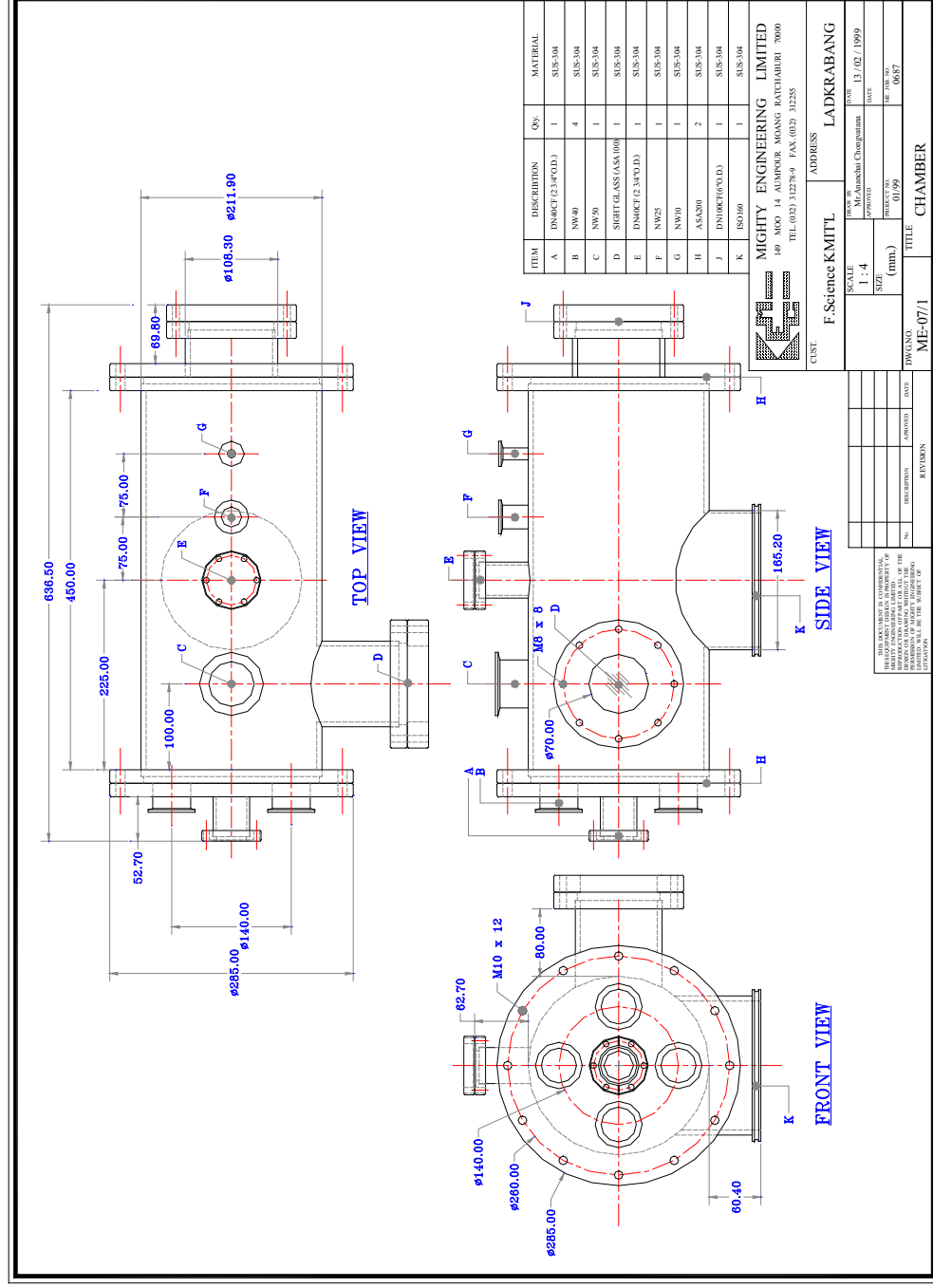
1.2 Vacuum Chamber

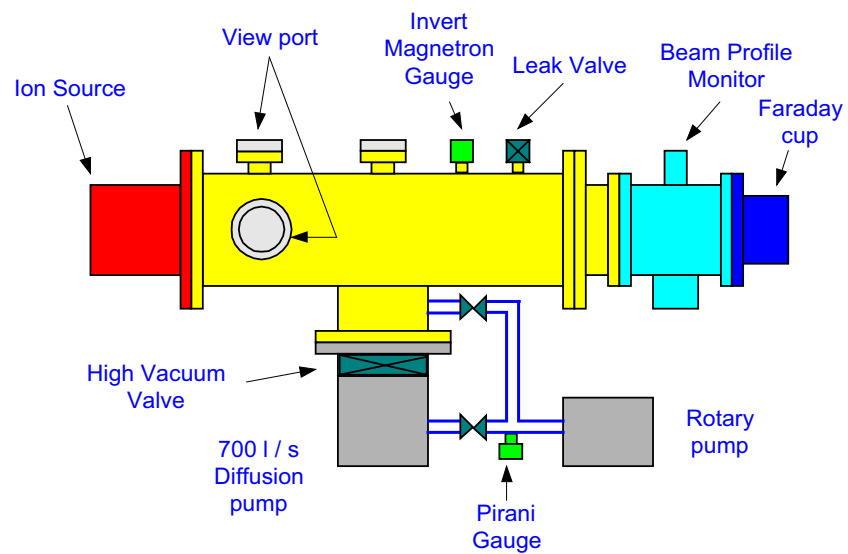
Vacuum Chamber เป็นบริเวณที่ให้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง จะต้องออกแบบให้มีปริมาตรเหมาะสมกับระบบปั๊มสุญญากาศ และมีรูปร่างเหมาะสำหรับที่จะติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดที่มีรวมถึงอุปกรณ์ที่อาจมีในอนาคตด้วย

สำหรับการวิจัยนี้ vacuum chamber ทำด้วย stainless steel มีลักษณะเป็นทรงกระบอกในแนวนอน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.19 cm ยาว 45 cm ที่ปลายทั้งสองเป็นหน้าแปลนขนาด ASA200 โดยในแนวยาวสามารถต่อเพิ่มได้ถ้าจำเป็น ปลายด้านหนึ่งถูกปิดด้วยหน้าแปลนที่มี port สำหรับติดตั้งขั้วไฟฟ้าขนาด NW40 จำนวน 4 ช่อง และขนาด DN40CF สำหรับติดตั้ง Ion Source จำนวน 1 ช่อง ปลายอีกด้านหนึ่งปิดด้วยหน้าแปลนลดขนาด โดยลดจาก ASA200 ไปเป็น DN100CF สำหรับติดตั้งเครื่องวัดขนาดลำไอออน จำนวน 1 ช่อง ด้านบนของ chamber มี port ขนาด NW25 และ NW10 สำหรับติดตั้งหัววัดความดันและ leak valve ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีช่องมอง (sight glass) ขนาด NW50 และ ASA100 ที่ด้านบนและด้านข้างของ chamber ตามลำดับ รายละเอียดของ chamber แสดงไว้ในแบบ DWG. NO. ME-07/1

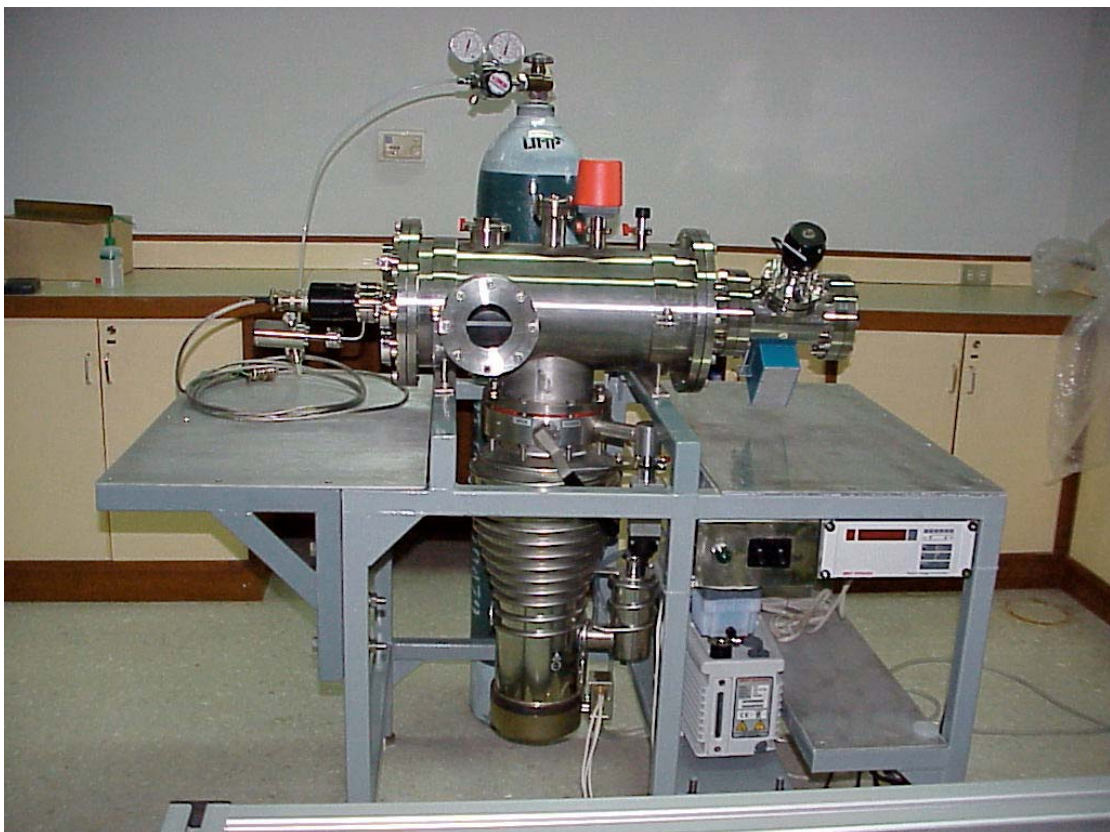
ระบบสุญญากาศนี้ใช้หัววัดความดันของบริษัท Edwards 2 ชนิด ได้แก่ Pirani Gauge 1 ตัว ใช้วัดความดันในช่วงไม่ต่ำกว่า 10^{-3} mbar และใช้ Invert Magnetron Gauge 1 ตัว สำหรับวัดความดันในช่วง 10^{-3} - 10^{-7} mbar

โครงสร้างของระบบสุญญากาศสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1 แหล่งกำเนิดไอออนจะติดตั้งทางด้านซ้ายของ chamber ในการศึกษาระบบ focusing system นั้น ลำไอออนที่ถูกโพสส์ด้วยเลนส์ไฟฟ้าจะถูกวัดขนาดและกระแสไอออนด้วย เครื่อง Beam Profile Monitor และ Faraday Cup ที่ติดตั้งอยู่ทางด้านขวาของ chamber ตามลำดับ ระบบสุญญากาศที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว แสดงดังรูปที่ 2





รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบสุญญากาศ



รูปที่ 2 ระบบสุญญากาศ

1.3 Beam Profile Monitor

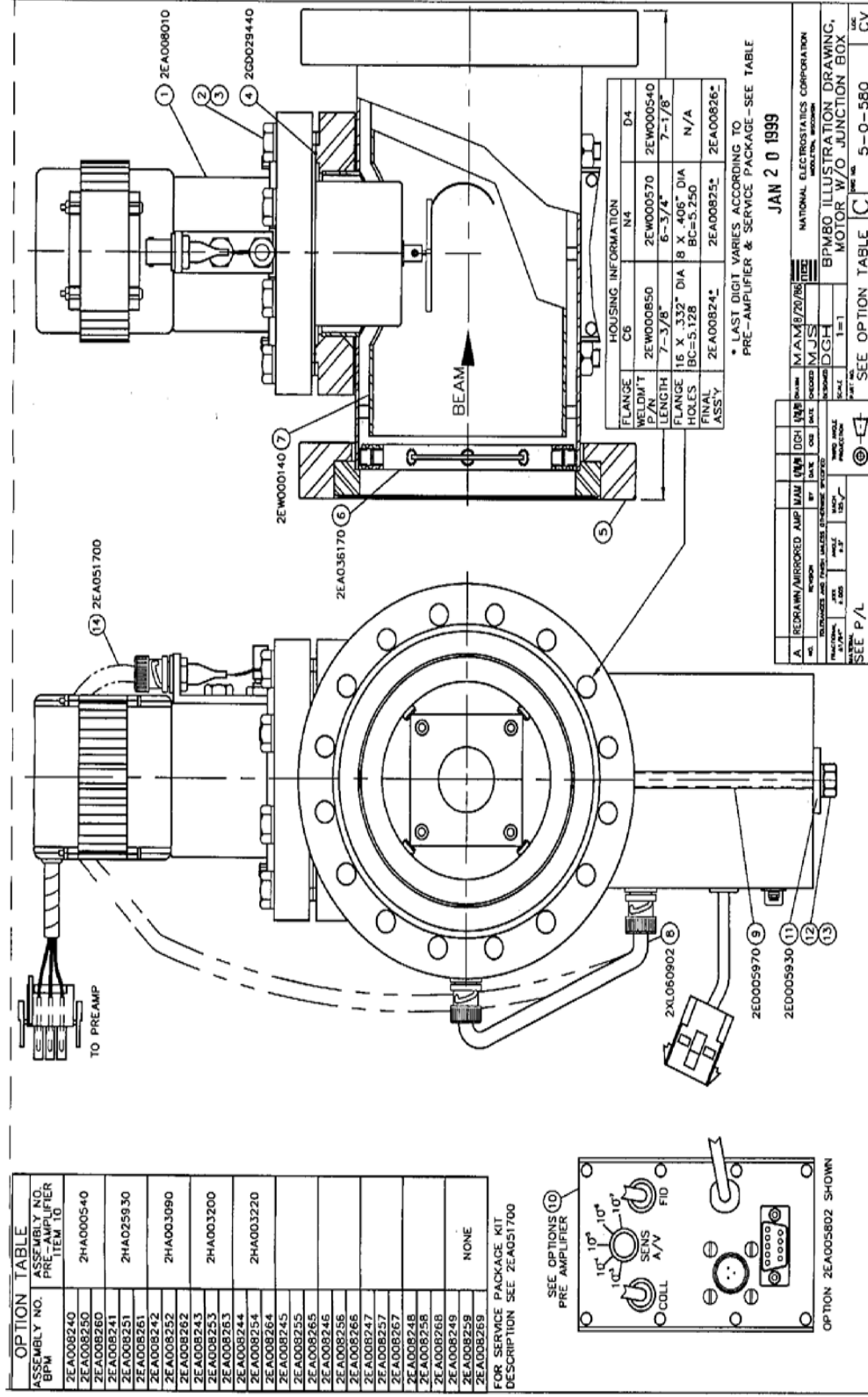
การวัดผลที่เกิดขึ้นต่อขนาดของลำไอออนเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของโวลเตจที่ป้อนแก่ระบบเลนส์ไฟฟ้าที่ใช้ในการโฟกัส ทำโดยใช้เครื่อง Beam Profile Monitor รุ่น BPM80 ของบริษัท National Electrostatics Corporation (NEC) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ออกแบบมาเพื่อใช้วัด intensity distribution และ ตำแหน่งของลำไอออน ใช้งานได้ทั้งไอออนบวกและไอออนลบ รวมทั้งลำอิเล็กตรอนด้วย

Beam Profile Monitor ที่แสดงดังรูปที่ 3 มีโครงสร้างดังแสดงใน DWG. NO. 5-0-580 เส้นลวดที่ติดอยู่ที่ปลายของแกนมอเตอร์ ขณะลวดหมุนอยู่ในระบบสุญญากาศจะบิดตัวเป็น helix (มอเตอร์สามารถขับแกนหมุนในระบบสุญญากาศโดยใช้ Magnetic Coupling) เส้นลวดจะหมุนรอบแกนของ helix ด้วยอัตราเร็ว 19 รอบต่อวินาที ในขณะที่เส้นลวดหมุนแต่ละรอบ เส้นลวดจะตัดผ่านลำไอออน ในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน ถ้าจัดให้แกนของ helix ทำมุม 45° กับลำไอออน เส้นลวดจะตัดแกน x และแกน y ของลำไอออนในแต่ละรอบของการหมุน

ในขณะที่เส้นลวดเคลื่อนที่ผ่านลำไอออน จะเกิด secondary electron ขึ้น กระแสของ secondary electron ที่ถูกวัดได้จะเป็นสัดส่วนกับ beam intensity ในขณะนั้น ๆ สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกแสดงทางจอออสซิลโลสโคป เมื่อปรับแกนเวลาของออสซิลโลสโคปให้สัมพันธ์กับการหมุน สัญญาณที่แสดงทางจอภาพจะแสดงถึงขนาดตัดขวางตามแกน x และ แกน y ของลำไอออน และขนาดของสัญญาณ (ขนาดทางแกนตั้งของออสซิลโลสโคป) จะสัมพันธ์กับ beam intensity นอกจากนี้ ผลที่แสดงทางจอสโคปยังบอกให้ทราบว่าตำแหน่งของลำไอออนอยู่ที่ center หรือห่างออกไปเท่าใด ทำให้สามารถใช้เครื่อง Beam Profile Monitor นี้ ศึกษา ระบบ beam scanning ได้ด้วย

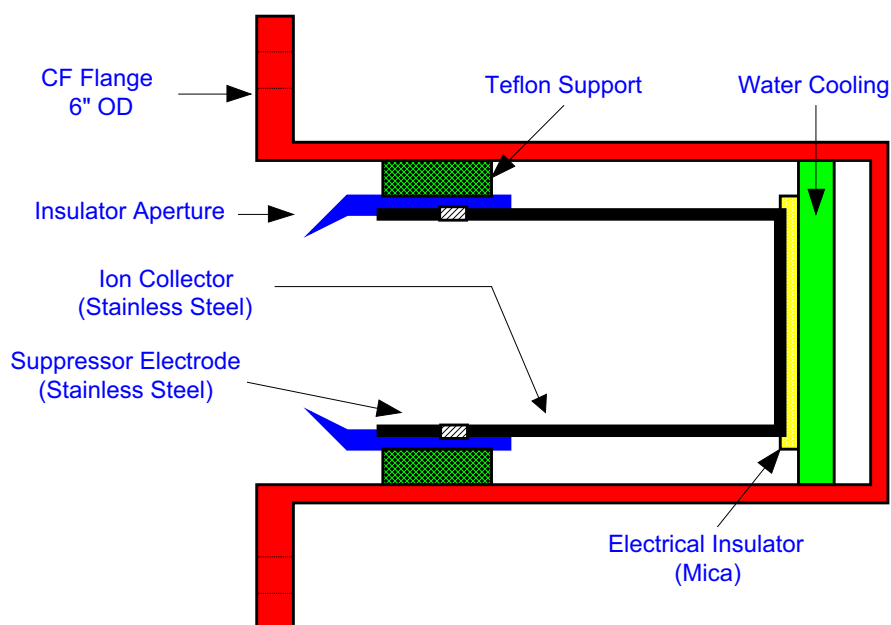


รูปที่ 3 Beam Profile Monitor



1.4 Faraday Cup

Faraday Cup เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดกระแสไอออน ในงานวิจัยนี้ Faraday Cup ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างดังรูปที่ 4 ส่วนของ Ion Collector มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำด้วย stainless Steel เพื่อเป็นการลดผลจาก secondary electron จึงออกแบบให้ ทรงกระบอกมีความยาวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง ในที่นี้ออกแบบให้ทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm และยาว 10 cm นอกจากนี้ เพื่อเป็นการลดผลจาก secondary electron ให้มากที่สุด จึงออกแบบให้มี suppressor electrode เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสำหรับผลัก secondary electron ที่เกิดจากการชนของลำไอออนกับ Ion Collector ทำให้กระแสไอออนที่วัดได้ถูกต้องมากขึ้น



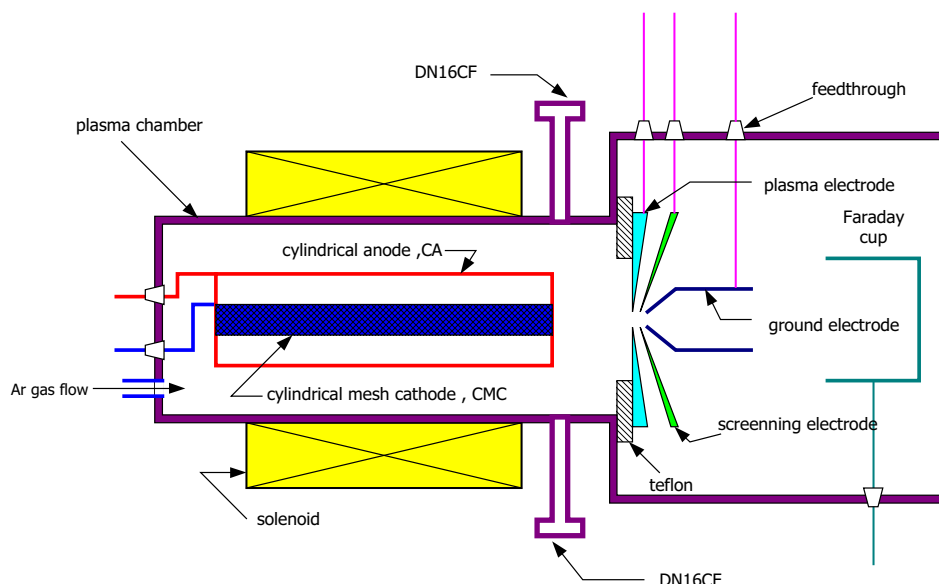
รูปที่ 4 โครงสร้างของ Faraday Cup

2. Ion Source

แหล่งกำเนิดไอออนที่ได้ศึกษาและออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่ Hollow Cathode Magnetron Ion Source ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถสร้างได้ง่ายและรวดเร็ว จุดประสงค์ในการสร้างเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดไอออนสำหรับการศึกษาระบบ ion extraction และระบบ ion beam focusing

Hollow Cathode Magnetron Ion Source

Hollow Cathode Magnetron Ion Source (HOCAM) มีโครงสร้างเป็น coaxial cylindrical diode ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วย cylindrical mesh cathode (CMC) วางอยู่ภายใน cylindrical anode (CA) และมีสนามแม่เหล็กทิศทางตามแนวแกนของ diode เมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมของก๊าซที่ถูกกระตุ้นกลับสู่ ground state จะปล่อยโฟตอน ($\lambda = 50-70$ nm) โฟตอนนี้จะกระตุ้นให้เกิด photoelectron จาก CMC photoelectron ที่เกิดขึ้นนี้จะเคลื่อนที่ภายใต้แรงจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน เป็นผลให้เกิดการ excitation และ ionization ของก๊าซ ซึ่งเป็นขบวนการเกิด gas discharge ของ HOCAM



รูปที่ 5 โครงสร้างของ Hollow Cathode Magnetron Ion Source

HOCAM ion source ที่สร้างขึ้นนี้มีโครงสร้างแสดงไว้ในแบบ DWG. NO. ME-07/2 โครงสร้างภายนอกเป็นทรงกระบอก 2 ชั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 72 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 52 mm ยาว 150 mm ทำด้วย stainless steel ทำหน้าที่เป็น plasma chamber ระหว่างชั้นของทรงกระบอก มี jacket ให้น้ำเย็นเข้าออกโดยรอบขนาด 5.5 mm เพื่อช่วยระบายความร้อนอันเกิดจาก plasma และความร้อนที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ทางด้านท้ายของทรงกระบอกเป็นหน้าแปลน stainless steel ขนาด DN63CF มีขั้วไฟฟ้า (electrical feedthrough) stainless steel ที่ทนแรงดันไฟฟ้าได้ 500 V, 10 A จำนวน 2 ขั้ว ผ่านเข้าไปใน plasma chamber เพื่อต่อกับขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกทั้งสอง ภายใน plasma chamber ซึ่งต้องต่อกับแหล่งจ่ายไฟปรับค่าได้ระหว่าง 200 - 500 โวลต์ และที่หน้าแปลนด้านท้ายนี้เช่นกัน มีช่องสำหรับปล่อยก๊าซเฉื่อย (ในงานวิจัยนี้จะใช้ก๊าซอาร์กอน) เข้าไปใน plasma chamber โดยออกแบบให้มีหัวต่อกับระบบท่อก๊าซเป็นแบบ swagelok ขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว ปริมาณก๊าซนี้จะถูกควบคุมอย่างละเอียดด้วย Needle Valve และเครื่อง Mass Flow Controller

ช่วงกลางของทรงกระบอกถูกพันไว้ด้วยลวดทองแดงอาบยาเบอร์ 13 เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้แก่ plasma chamber เส้นลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.80 mm ความต้านทาน 6.76 Ω ต่อκιโลเมตร จำนวน 780 รอบ ในช่วงยาว 75 mm เมื่อพันเสร็จขดลวดมีความต้านทานทั้งสิ้น 1.82 Ω นอกจากนี้ ด้านข้างของทรงกระบอกยังมี port ขนาด DN16CF 2 port ไว้ต่อกับระบบปั๊ม 1 port เพื่อควบคุมความดันภายใน plasma chamber ส่วน port ที่เหลือไว้ต่อกับ pressure gauge เพื่อศึกษาความดันภายใน plasma chamber

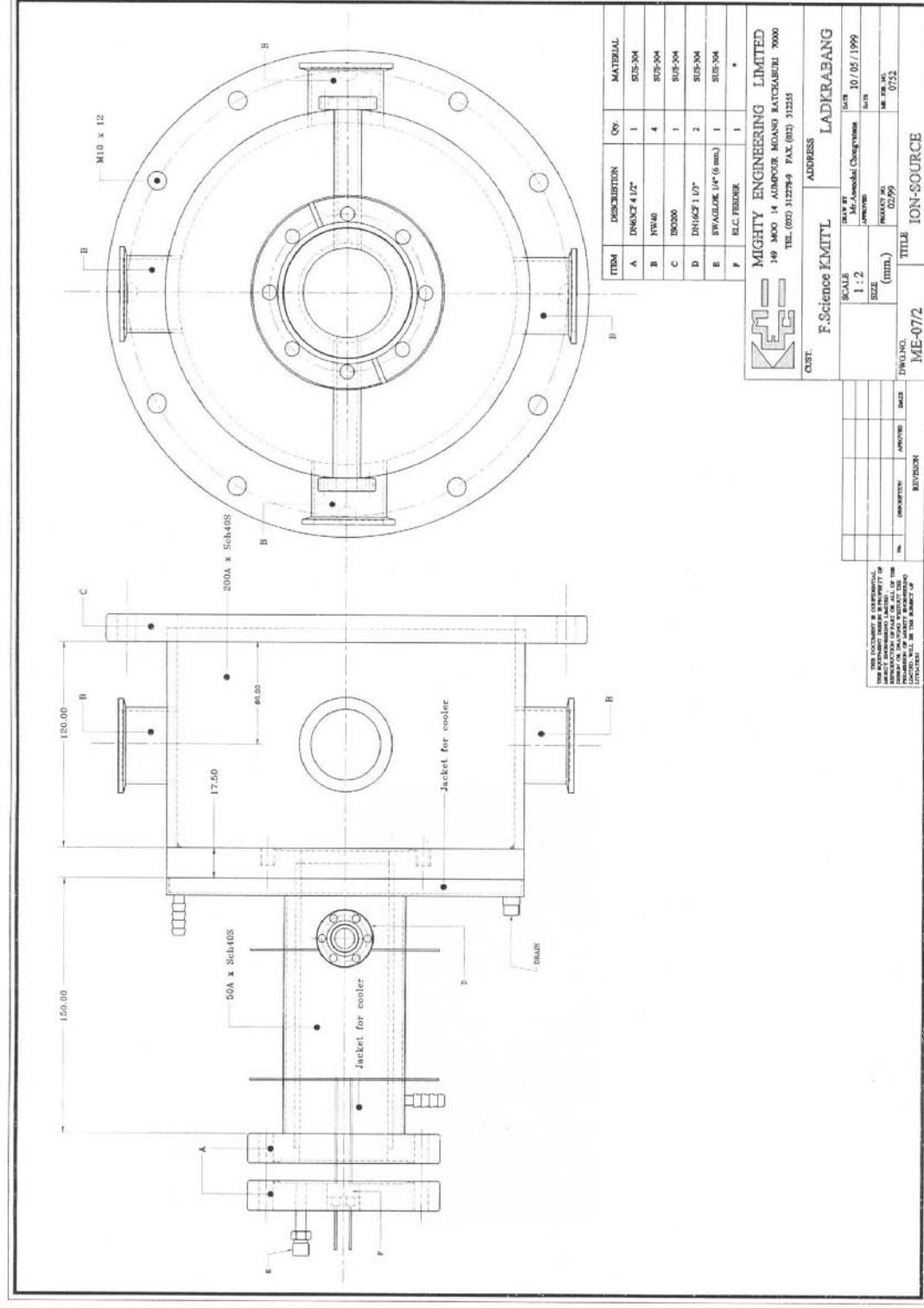
ด้านหน้าของ plasma chamber ถูกออกแบบให้ขยายเป็นแปลนขนาด ASA200 เพื่อให้สามารถต่อเข้ากับระบบสุญญากาศได้ ที่ช่วงหน้านี้ออกแบบให้มี port ขนาด NW40 จำนวน 4 port สำหรับติดตั้งขั้วไฟฟ้าที่จะต้องต่อกับ extractor และ focusing system แต่ละ port จะมีขั้วไฟฟ้า stainless steel ที่ทนแรงดันไฟฟ้าได้ 5 kV, 30 A จำนวน 4 ขั้ว

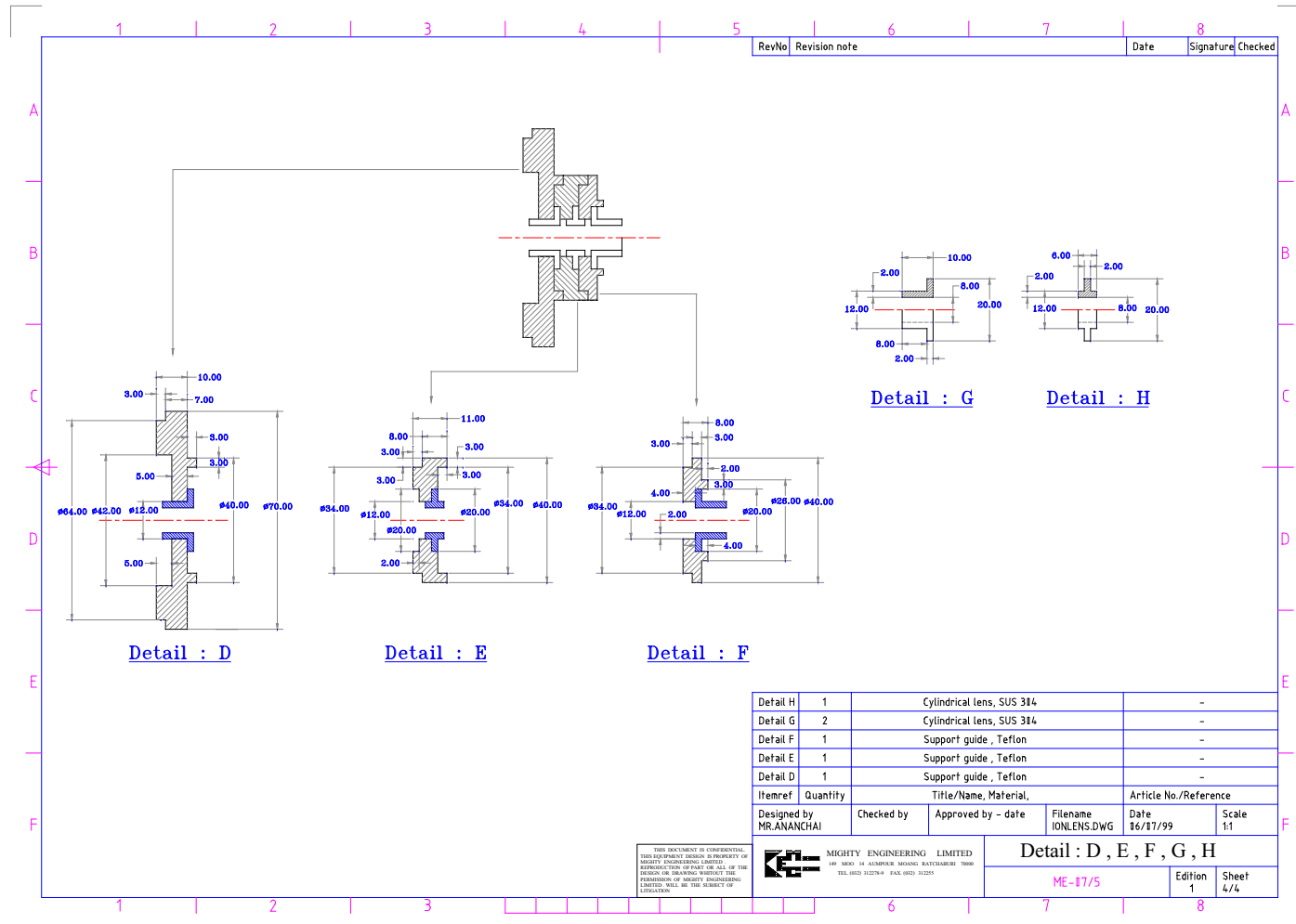
ภายใน plasma chamber มีขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก 2 อันสวมทับกันอยู่ในลักษณะของ coaxial cylindrical electrode มีโครงสร้างแสดงไว้ในแบบ DWG. NO. ME-07/7 ทรงกระบอกนอกทำหน้าที่เป็น anode ทำด้วย stainless steel ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 23 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 17 mm ยาว 100 mm ส่วนอันในทำหน้าที่เป็น cathode เป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 mm ยาว 100 mm ทำจากตะแกรงลวด stainless steel โดยลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm มีความถี่ 8 เส้นต่อเซนติเมตร ขั้วไฟฟ้าทั้งสองยึดติดกันและวางอยู่กึ่งกลางภายใน plasma chamber ด้วย teflon support

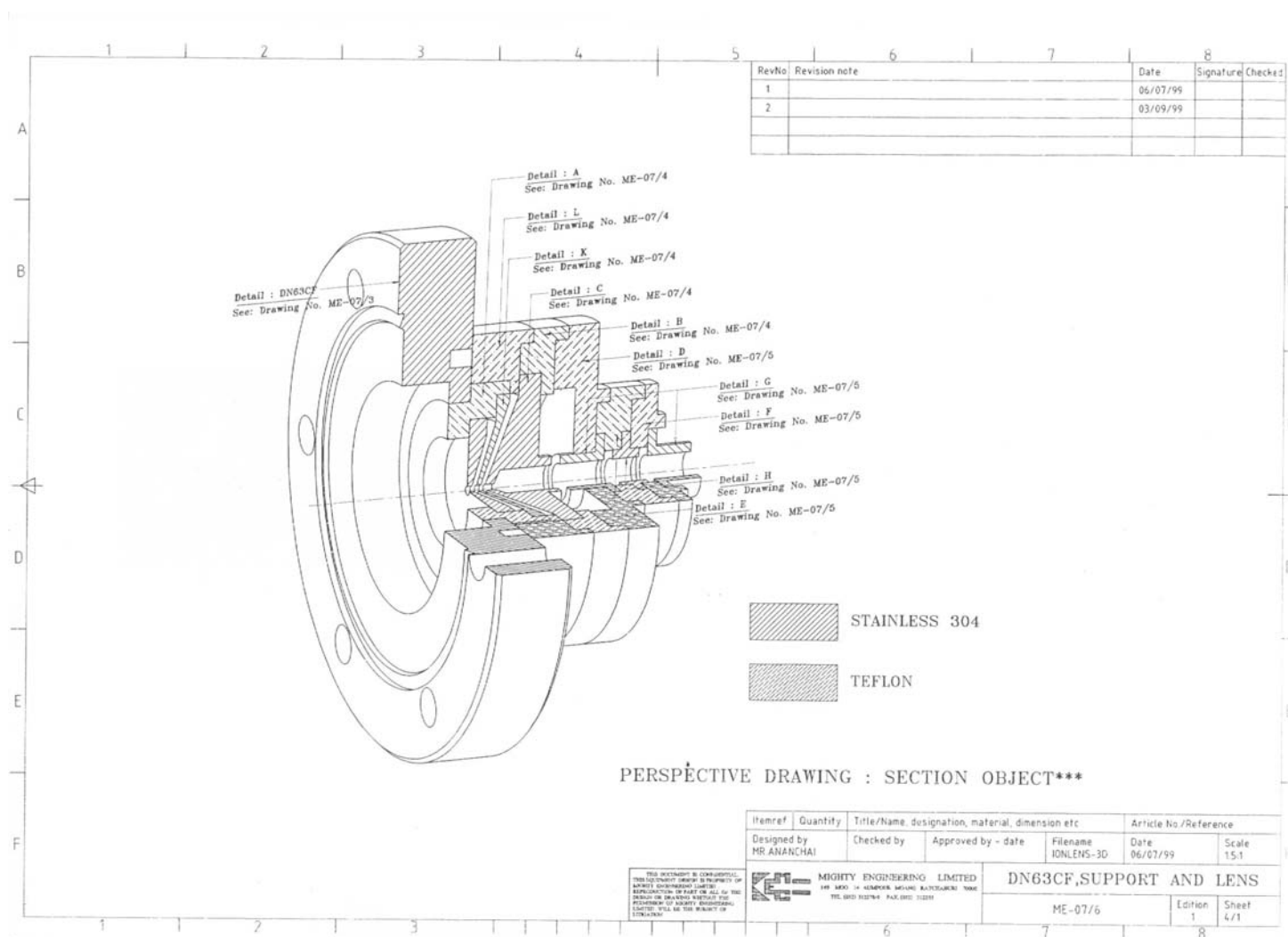
ด้านหน้าของ plasma chamber ถูกปิดด้วยหน้าแปลน stainless steel ขนาด DN63CF และมีช่องว่างตรงกลางสำหรับติดตั้งระบบ extraction โดยมีโครงสร้างแสดงไว้ดังแบบ DWG. NO. ME-07/3 ระบบ extraction ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ชั้นแรกอยู่ใกล้พลาสมามากที่สุด ด้านที่ติดกับพลาสมามีลักษณะแบบราบ อีกด้านหนึ่ง ปาดเป็นมุมเฉียง 75.0° มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

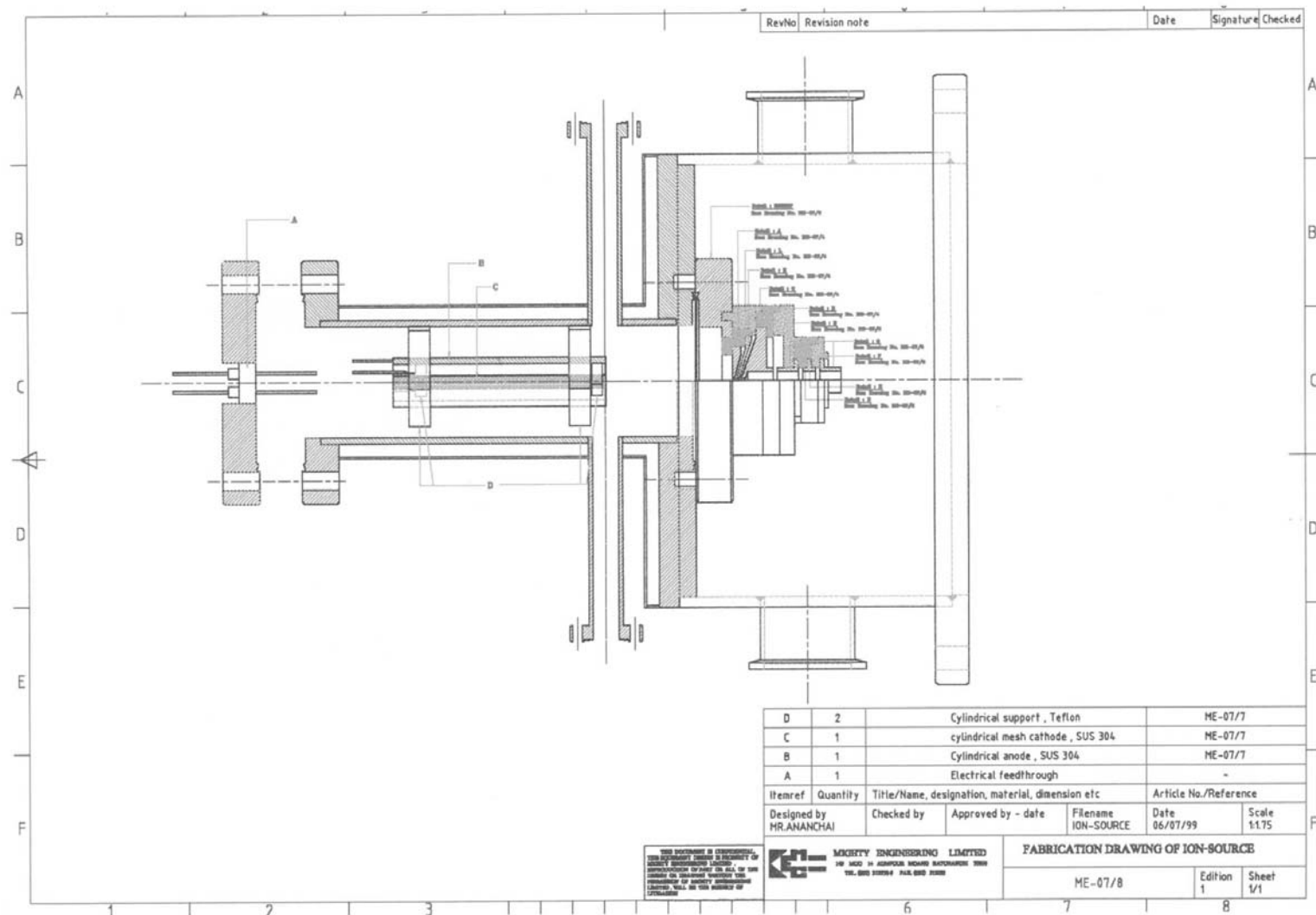
กลาง 2.0 mm ทำหน้าที่เป็น plasma electrode หรือ outlet electrode ถัดจาก plasma electrode เป็น screening electrode ทำหน้าที่ผลักอิเล็กตรอนไม่ให้วิ่งตามไอออนบวกออกมา ถัดมาเป็น ground electrode ซึ่งถูกออกแบบให้เป็น pierce electrode ทำด้วยสแตนเลส มีโครงสร้างแสดง ด้านติดกับ screening electrode ปาดเป็นมุมเฉียง 70.0° มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 mm เช่นกัน อีกด้านหนึ่ง ปาดเป็นมุมเฉียง 67.5° แล้วขยายรูออกให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6.0 mm โครงสร้างของขั้วไฟฟ้าและ teflon support แสดงไว้ดังแบบ DWG. NO. ME-07/4 เมื่อประกอบเข้าด้วยกันด้วย teflon support รูของ electrode ทั้งสามจะอยู่ห่างกัน 1.0 mm

ต่อจาก extractor ออกมาเป็นระบบเลนส์ ในขั้นนี้เลือกออกแบบเป็นเลนส์ทรงกระบอก (cylindrical lens) 3 ชั้น ทำด้วย stainless steel มีโครงสร้างแสดงไว้ดังแบบ DWG. NO. ME-07/5 ทั้ง 3 ชั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.0 mm เลนส์ 2 ชั้นนอกมีความยาวเท่ากันคือ 10.0 mm ส่วนชั้นกลาง มีความยาว 6.0 mm ระบบเลนส์ ถูกยึดให้ห่างกัน 2.0 mm ด้วย teflon support เมื่อประกอบระบบเลนส์เข้ากับ extractor และ plasma electrode จะมีลักษณะดังแบบ DWG. NO. ME-07/6 เมื่อประกอบทั้ง coaxial cylindrical electrode, plasma electrode, extractor และระบบเลนส์เข้าด้วยกันจะได้ ion source ที่มีลักษณะดังแบบ DWG. NO. ME-07/8





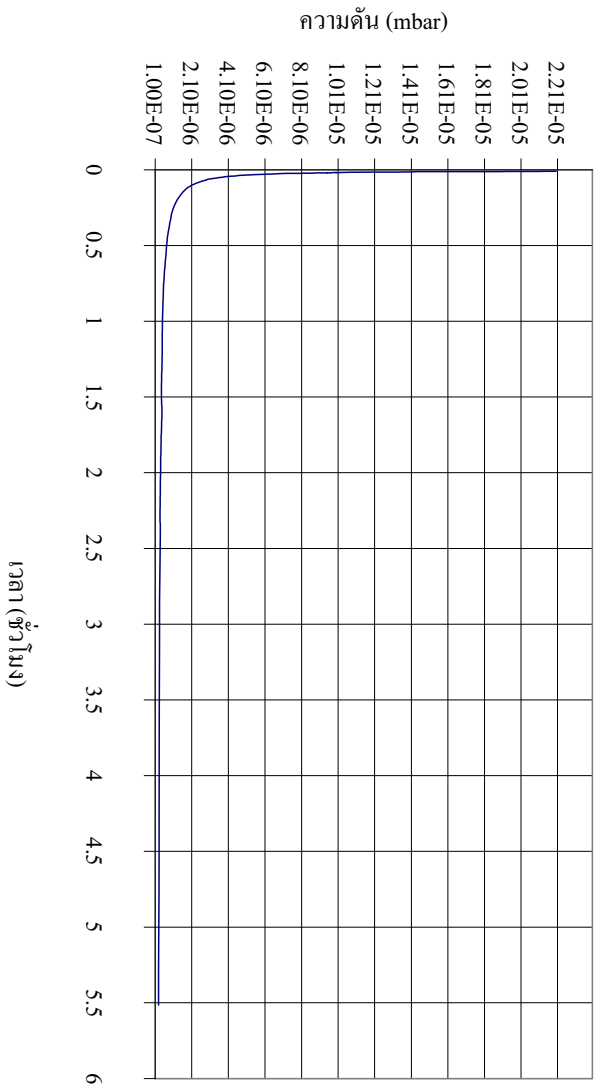




2.1 การทดสอบระบบสุญญากาศ

หลังจากการแก้ไขปัญหาการรั่วของระบบสุญญากาศเรียบร้อยแล้วพบว่าระบบสามารถทำให้ความดันได้ถึง 10^{-7} mbar ซึ่งเป็นขีดจำกัดของระบบปั๊มชนิดนี้ จึงสรุปได้ว่าระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ได้

การวัดความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลาที่ใช้ในการปั๊มจะทำได้ในกรณีที่ยังไม่ได้ติดตั้งระบบ extraction โดยการเปิดปั๊มทิ้งไว้วันละ 6-7 ชั่วโมง เป็นเวลา 4 วันติดต่อกัน เพื่อให้เกิดการ out gas สิ่งที่ได้ว่า ระบบสุญญากาศจะถึงความดันต่ำสุดด้วยเวลาที่น้อยลงเรื่อย หลังจากนั้นก็ทำการปรับที่ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดัน ผลการทดลองปรากฏว่า ความดันจะลดลงจนต่ำกว่า 10^{-7} mbar ภายในเวลา 20 นาที หลังจากเปิดแล้ว จากนั้นความดันจะลดลงอย่างช้า ๆ จนมีความดันต่ำกว่า 3.5×10^{-7} mbar ภายในเวลา 3 ชั่วโมง และระบบสุญญากาศนี้สามารถทำความดันได้ถึง 2.9×10^{-7} mbar (2.2×10^{-7} Torr) ในเวลาประมาณ 5.5 ชั่วโมง โดยความดันในระบบมีค่าลดลงตามเวลาได้แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความดันในระบบสุญญากาศลดลงตามเวลา

เมื่อติดตั้งระบบ extraction เข้ากับ plasma chamber จะทำให้ตอนนี้ plasma chamber กับ vacuum chamber ถูกเชื่อมก่อนกันด้วยรูขนาดเพียง 2 มิลลิเมตร เท่านั้น เมื่อเริ่มปั๊มจึงทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่าง chamber ทั้ง 2 อย่างมาก กล่าวคือความดันภายใน vacuum chamber มีค่าประมาณ 10^{-7} mbar (อ่านค่าความดันด้วย Penning Gauge ของ บริษัท Edward) ใน

ขณะที่ความดันภายใน plasma chamber จะมีค่าประมาณ 10^{-4} mbar (อ่านค่าความดันด้วย Penning Gauge ของ บริษัท Edward เช่นกัน) ซึ่งค่าความดันภายใน plasma chamber ระดับนี้ถือว่าค่าสูงเกินไปที่จะใช้งานได้ เพื่อให้ความดันภายใน plasma chamber มีค่าต่ำลงทำได้โดยการทำ bypass ระหว่าง port ขนาด DN16CF ของ plasma chamber กับ diffusion pump หลังการทำ bypass สามารถทำให้ความดันภายใน plasma chamber ได้ถึงระดับ 10^{-5} mbar ในขณะที่ความดันภายใน vacuum chamber มีค่าอยู่ที่ระดับ 10^{-7} mbar

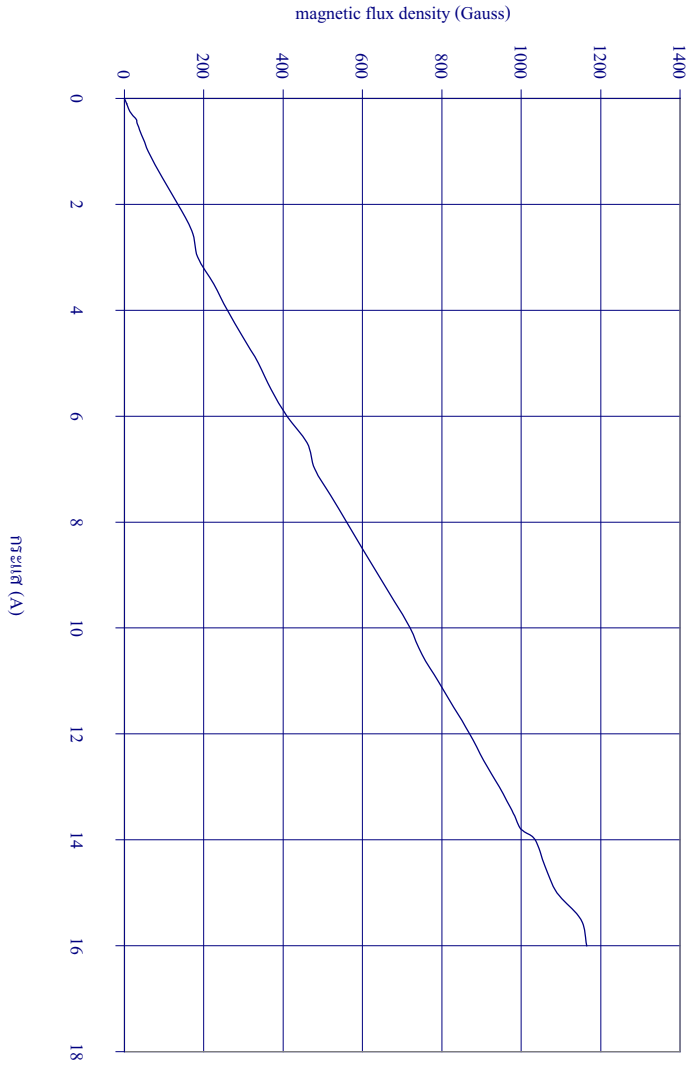
2.2 การทดสอบสนามแม่เหล็กของ ion source

การทดสอบสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหลอดที่พันรอบ ion source ทำโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟชนิดกระแสคงที่ (constant current source) ปรับค่ากระแสได้สูงสุด 15 A แล้วทำการวัดสนามแม่เหล็กที่จุดกึ่งกลางของ plasma chamber ด้วย gauss meter ของ Yokogawa Type 3251 Model 325100 ใช้ gauss probe Model 3252 01 โดยในขณะทำการทดลองได้เปิดน้ำหล่อเย็นให้กับ plasma chamber ด้วย แต่ใช้น้ำจากท่อประปา อุณหภูมิประมาณ 28°C สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงสุด 1165 เกาส์ เมื่อป้อนกระแส 16 A ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับกระแสแสดงในรูปที่ 7

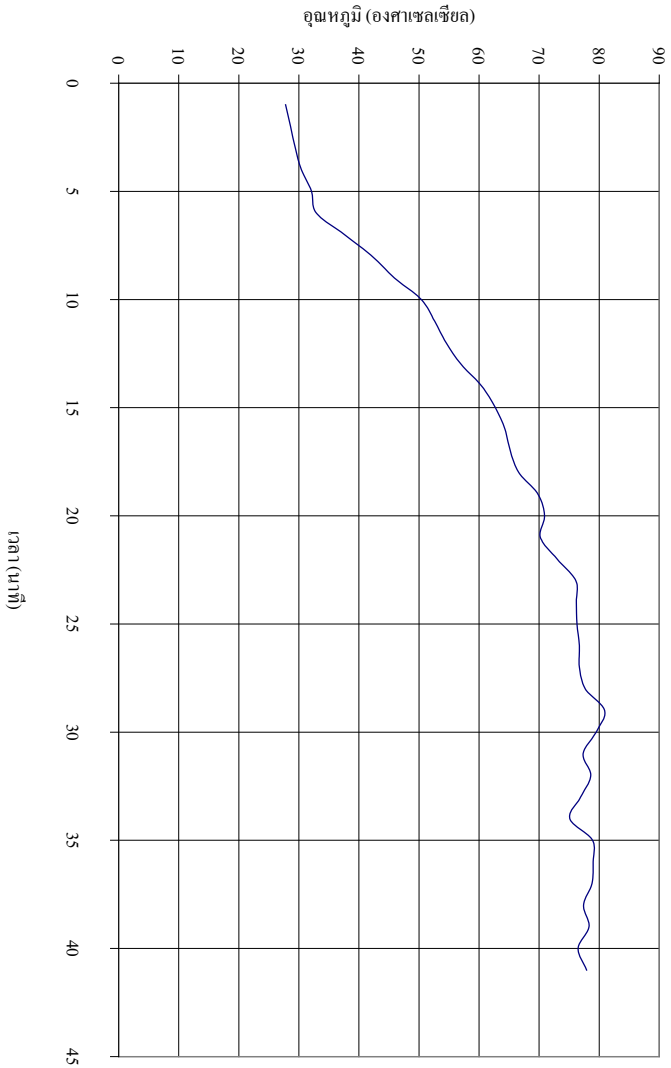
ข้อจำกัดในการสร้างสนามแม่เหล็กคือความร้อนในหลอดแม่เหล็ก เนื่องจากระหว่างชั้นของหลอดไม่มีการระบายความร้อน จึงเกิดความร้อนสะสมในหลอดมาก ดังนั้นถ้าป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่หลอดมากเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่หลอดได้

ความร้อนของหลอดได้ถูกวัดด้วย thermocouple โดยใช้ thermocouple แต่ละที่ด้านข้างของหลอดบริเวณนั้นกลาง ๆ แล้วป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่หลอด 9 A ซึ่งจะได้สนามแม่เหล็ก 640 เกาส์ พบว่าอุณหภูมิของหลอดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิประมาณ 80°C ในเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 8 แต่เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่หลอด 14.5 A จะได้สนามแม่เหล็ก 1060 เกาส์ พบว่าอุณหภูมิของหลอดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าประมาณ 80°C ในเวลาประมาณ 15 นาที และยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ดังแสดงในรูปที่ 9

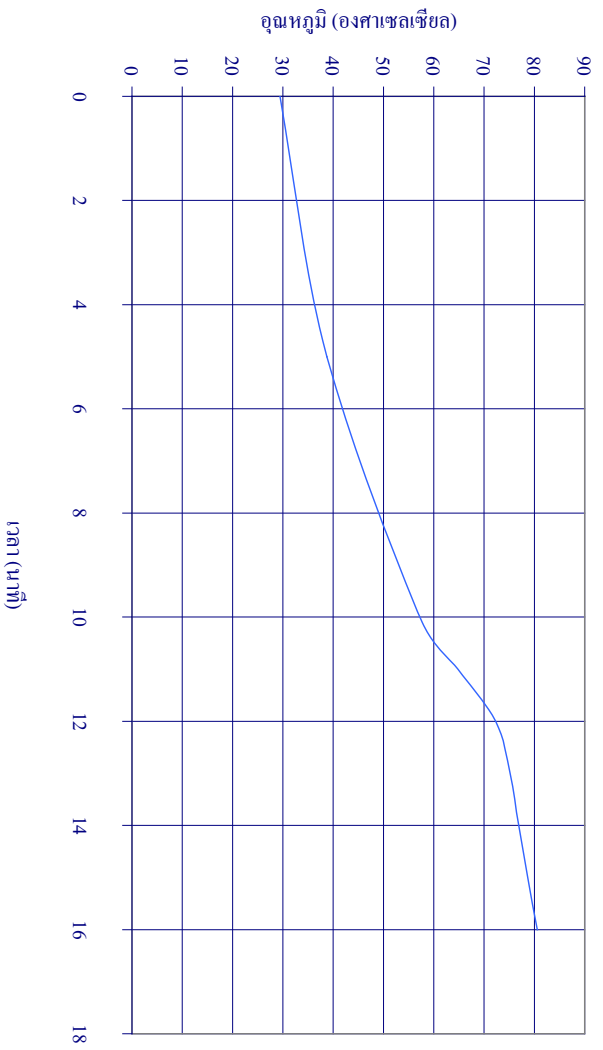
จากการทดสอบสรุปได้ว่า ถ้าอุณหภูมิผิวของหลอดที่ทำการวัดได้ค่า 80°C นั้น ภายในของหลอดที่จุดกึ่งกลางจะต้องมีอุณหภูมิสูงกว่านี้มาก แต่อย่างไรก็ตามยังคงไม่เกิดความเสียหายแก่หลอด ดังนั้นถ้าต้องการใช้สนามแม่เหล็กต่ำกว่า 600 เกาส์ จะสามารถใช้งานได้โดยไม่จำกัดเวลา แต่ถ้าต้องการใช้สนามไฟฟ้าถึง 1000 เกาส์ จะใช้งานได้ไม่เกิน 15 นาที



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กใน plasma chamber กับกระแส



รูปที่ 8 อุณหภูมิของหลอดเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อป้อนกระแส 9 A

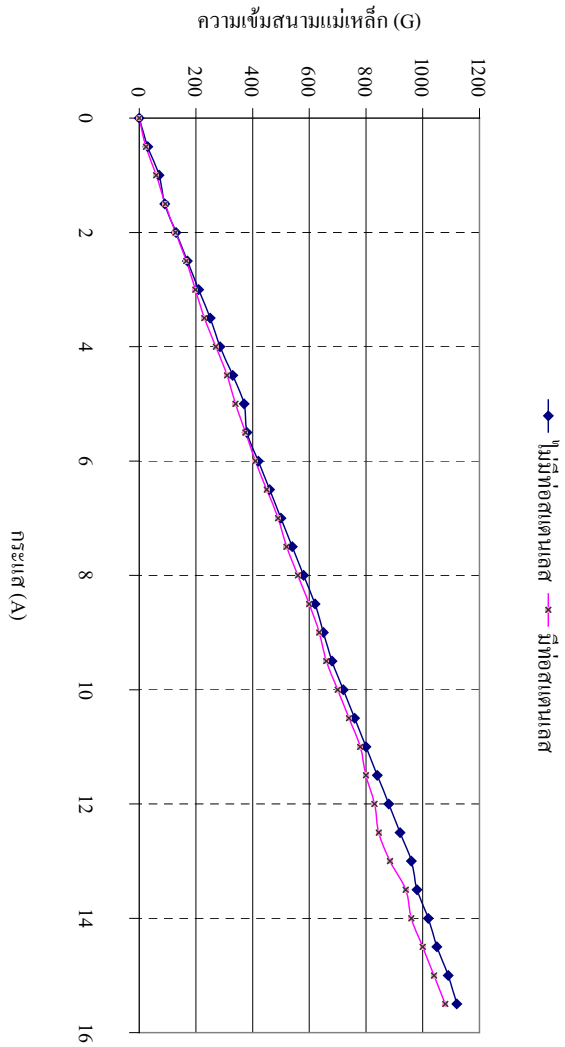


รูปที่ 9 อุมหภูมิของหลอดเปลี่ยแปลงตามเวลาเมื่อป้อนกระแส 14.5 A

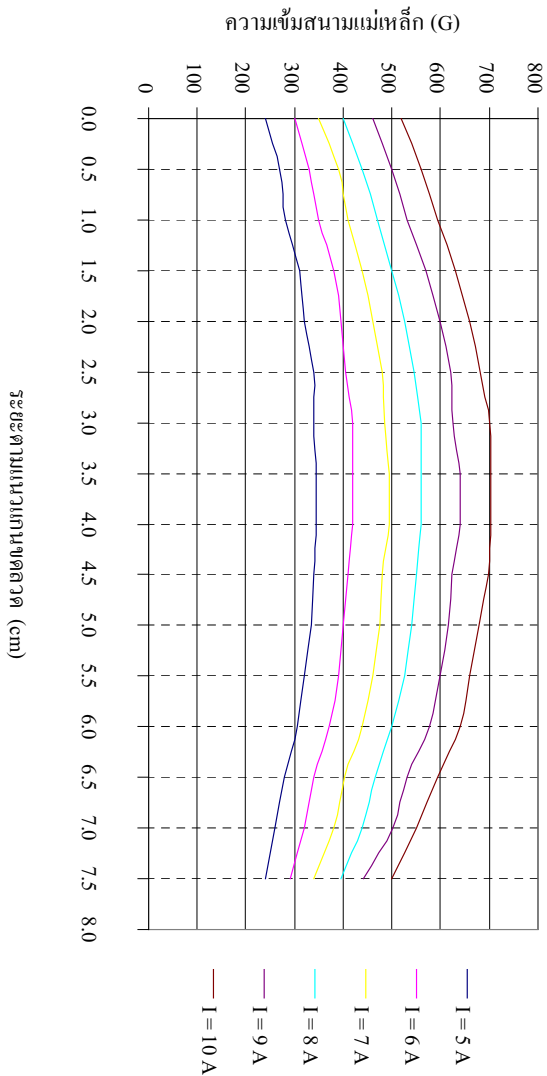
- การทดสอบการลดทอนสนามแม่เหล็ก

การวัดสนามแม่เหล็กภายใน plasma chamber ดังกล่าวข้างต้น กระทำในขณะที่ยังไม่ได้ติดตั้งขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกสเตนเลสของ Hollow Cathode Magnetron Ion Source เนื่องจากพลาสมาจะเกิดภายในขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกสเตนเลสที่ทำหน้าที่เป็น anode ดังนั้นจึงต้องวัดสนามแม่เหล็กภายในขั้วไฟฟ้านี้ว่าถูกลดทอนลงหรือไม่

การศึกษาทำโดยนำท่อสเตนเลส อีกท่อหนึ่งสวมเข้าไปภายใน plasma chamber แล้วทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กภายในท่อสเตนเลส ผลการทดลองแสดงดังกราฟในรูปที่ 10 จากกราฟจะเห็นว่า ท่อสเตนเลสนั้น ไม่มีผลต่อการลดทอนค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นในการสร้างสนามแม่เหล็กให้แก่ ion source จึงยังคงใช้ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับกระแสที่วัดไว้แล้วดังรูปที่ 7 ในตอนต้นได้ โดยเราสามารถทราบค่าสนามแม่เหล็กของ ion source ได้จากกระแสที่ป้อนให้แก่หลอดนั่นเอง นอกจากนี้ยังได้วัดสนามแม่เหล็กตามแนวแกนของหลอด พบว่าสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางและจะลดลงที่บริเวณปลายทั้งสองด้านดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 10 สานามแม่เหล็กในท่อสแตนเลส



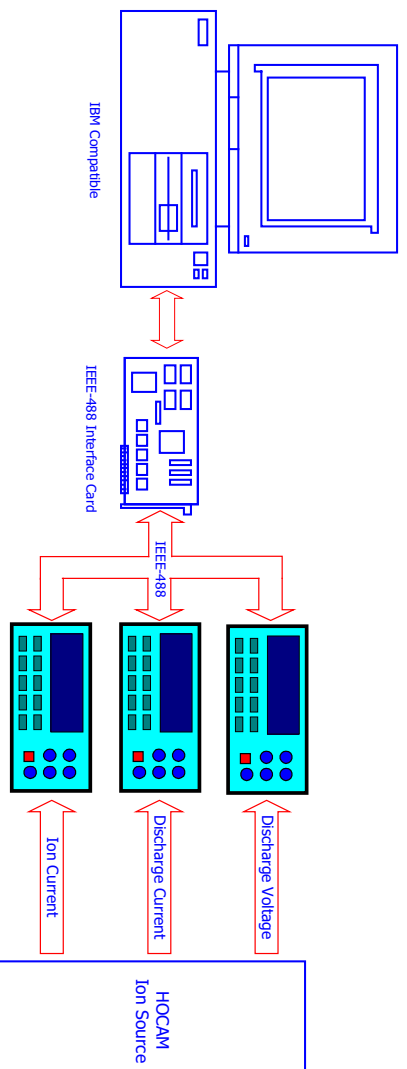
รูปที่ 11 สานามแม่เหล็กตามแนวแกนขดลวด

2.3 การทดสอบ Hollow Cathode Magnetron (HOCAM) Ion Source

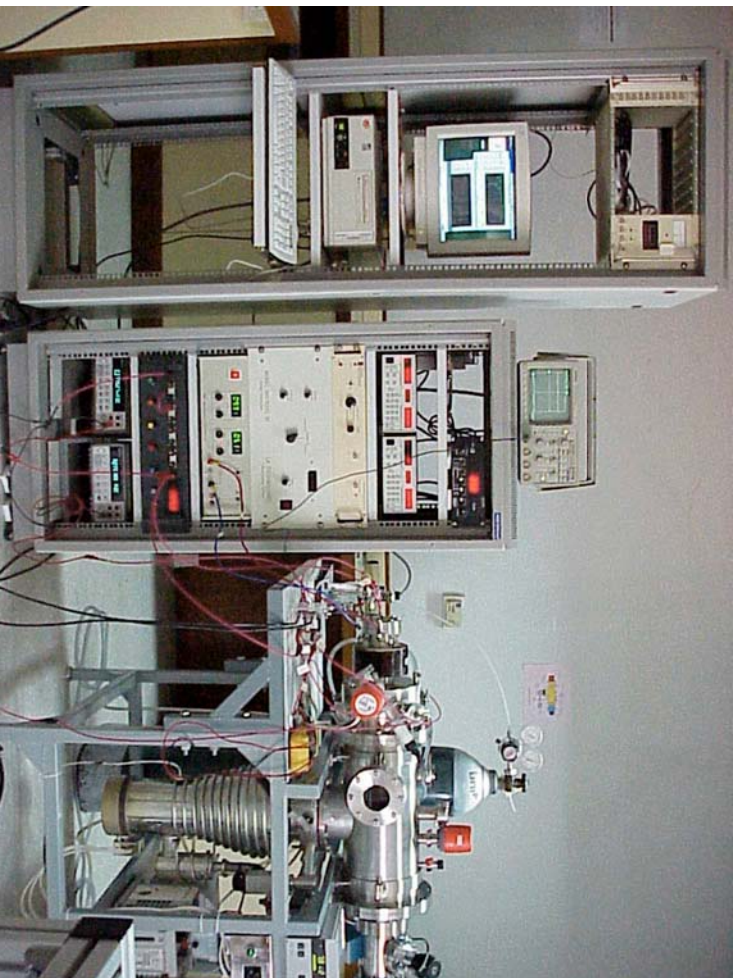
การทดสอบการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออน ทำโดยการศึกษา characteristic ของแหล่งกำเนิดไอออน ได้แก่ การหาความสัมพันธ์ของ discharge current , discharge voltage และ ion current ที่สภาวะต่างๆ ตลอดจนการศึกษาสถิติสภาพของระบบด้วย

2.4 การจัดระบบการวัดด้วยคอมพิวเตอร์

การทดลองเพื่อศึกษา characteristic ของแหล่งกำเนิดไอออน ทำโดยการเก็บข้อมูลของ discharge current , discharge voltage และ ion current ด้วยดิจิทัลมิเตอร์ ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น HP34401A ข้อมูลถูกส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์ ผ่านระบบสายข้อมูล IEEE488 Bus โปรแกรมควบคุมการวัดเขียนขึ้นด้วย Graphical Programming Language HP VEE 5.0 ของบริษัท Hewlett Packard ระบบการวัดด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับการวิจัยนี้ได้แสดงดังรูปที่ 12 และ 13



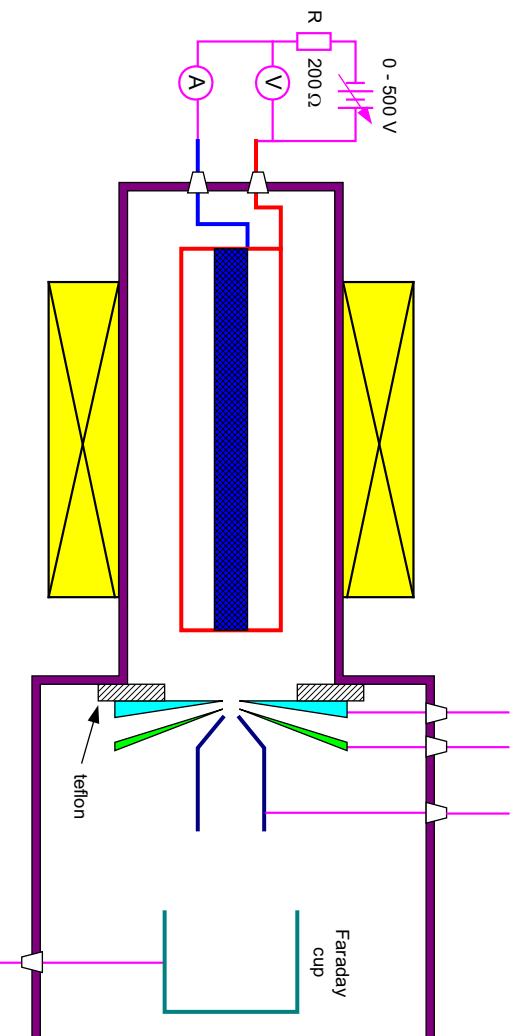
รูปที่ 12 บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด



รูปที่ 13 การจัดเครื่องมือของระบบการวัด

2.5 การทดสอบการเกิด plasma discharge

การทดลองเพื่อศึกษาการเกิด discharge ภายใน ion source นั้นกระทำโดยจัดเครื่องมือวัด ดังรูปที่ 14 จากนั้นป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าใน plasma chamber ในอัตราการไหลที่ต้องควบคุม โดยชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งประกอบด้วย needle valve และ mass flow controller รอกัดรู้เพื่อให้ความดันภายใน chamber ทั้งสองคงที่ จากนั้นป้อนไฟฟ้าตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้ระหว่าง 0 - 500 โวลต์ ให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองของ HOCAM (CA และ CMC) แล้วจึงทำการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงจากแหล่งจ่ายไฟกระแสคงที่ (constant current source) ให้กับขดลวดแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยในขณะทำการทดลองได้เปิดน้ำหล่อเย็นให้กับ plasma chamber ด้วย (ใช้น้ำประปาที่อุณหภูมิน้ำเข้า 29°C)



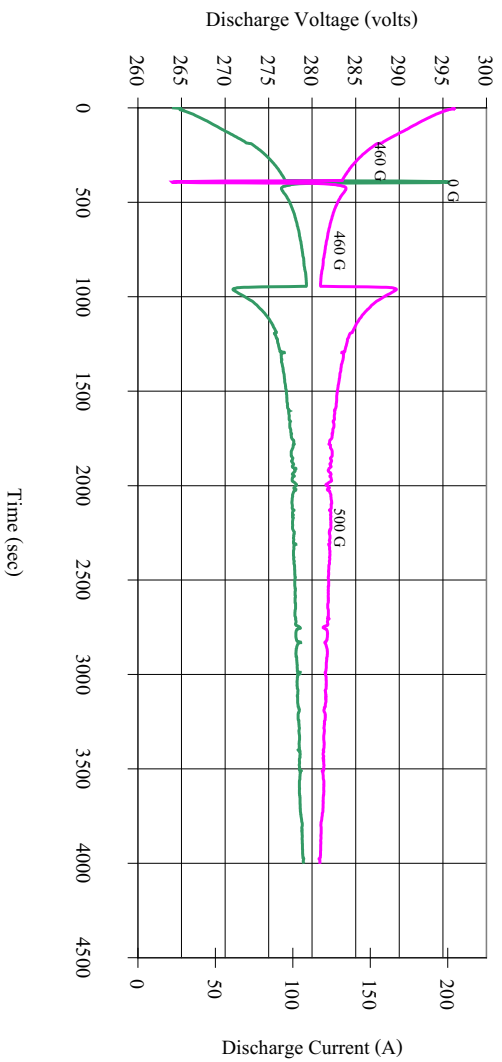
รูปที่ 14 การศึกษาการเกิด plasma discharge

ผลการทดสอบการเกิด discharge ครั้งแรกได้สร้างความเสียหายให้กับแหล่งจ่ายไฟปรับค่าได้ เนื่องจากเมื่อเกิดการ discharge จะเกิดกระแสไหลมากกว่าที่แหล่งจ่ายไฟจะรับได้ การแก้ไขทำให้การต่อตัวต้านทาน $200\ \Omega$ $90\ \text{W}$ อนุกรมเข้ากับวงจร เพื่อทำหน้าที่จำกัดกระแส โดยในขณะที่โวลเตจที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าของ HOCAM ยังไม่สูงพอที่จะเกิดการ discharge ก็จะไม่มีการไหลในวงจร โวลเตจตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าเป็น 0 โวลต์ ส่วนที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว CA และ CMC จะมีค่าเท่ากับโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟ เมื่อปรับโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟให้สูงขึ้นจนสามารถทำให้เกิดการ discharge ได้ ก็จะเกิดกระแสไหลในวงจร ทำให้มีโวลเตจตกคร่อมตัวต้านทานสูงขึ้น และโวลเตจตกคร่อมขั้ว CA และ CMC จะมีค่าลดลง เป็นผลให้ discharge current ลดลงอยู่ในค่าจำกัดค่าหนึ่งที่ทำให้การ discharge สามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง

หลังจากได้ตัวต้านทานจำกัดกระแสแล้วก็สามารถทดสอบการเกิด discharge ได้ การทดสอบในขั้นตอนนี้ เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาสัณยภาพของการเกิด discharge โดยการวัด discharge current ที่เปลี่ยนไปตามเวลา เริ่มต้นด้วยการป้อนก๊าซด้วยอัตรา $4.7\ \text{sccm}$ ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 300 โวลต์ ป้อนสนามแม่เหล็กขนาด 460 และ $580\ \text{G}$ ซึ่งทำให้ได้โดยการป้อนกระแสให้แก่วงจรแม่เหล็กขนาด 6.5 และ $8\ \text{A}$ ตามลำดับ ผลของ discharge current และ discharge voltage ที่เปลี่ยนไปตามเวลาแสดงดังรูปที่ 15

จากรูปจะเห็นว่า discharge current และ discharge voltage ซึ่งเป็นโวลเตจที่ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า CA และ CMC ของ HOCAM มีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ เมื่อ discharge current มีค่าสูงขึ้น discharge voltage จะมีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากมีโวลเตจไปตกคร่อมที่ตัวต้านทานจำกัดกระแสมากขึ้น

Discharge Voltage and Discharge Current VS Time at 4.7 sccm , 460 G and 560 G



รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงของ discharge voltage และ discharge current

เมื่อให้สนามแม่เหล็กมีค่า 460 G จะมี discharge current ประมาณ 200 mA และจะลดลงตามเวลาอย่างรวดเร็ว และเมื่อทดลองหยุดป้อนสนามแม่เหล็ก พบว่า discharge current มีค่าลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ นั่นคือแทบไม่มีการ discharge ถ้าไม่มีสนามแม่เหล็ก และเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กตั้งเดิมก็จะเกิดการ discharge ต่อไป โดยกระแสยังคงลดลงตามเวลา เมื่อทดลองเพิ่มสนามแม่เหล็กเป็น 580 G พบว่า discharge current จะเพิ่มขึ้นทันที และมีค่าลดลงตามเวลาต่อไป แต่เมื่อเวลาผ่านไป discharge current จะเริ่มคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง

หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบการเกิด discharge อีกหลายครั้ง โดยเปลี่ยนอัตราการป้อนก๊าซ และความเข้มสนามแม่เหล็ก สรุปลงได้ว่า ในกรณีที่มีอัตราการป้อนก๊าซต่ำ จะทำให้ได้ discharge current ที่มีค่าต่ำด้วย ส่วนความเข้มของสนามแม่เหล็กมีผลต่อการเกิด ionization ของก๊าซเป็นอย่างมาก ในกรณีที่เราไม่ได้ป้อนสนามแม่เหล็กให้กับ HOCAM ion source ค่าของ discharge current จะมีค่าอยู่ในระดับ μA เท่านั้น แต่ถ้าวเราป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปจนถึงค่าที่ทำให้เกิด ionization แล้ว ก็จะมีผลทำให้เกิด discharge current เกิดขึ้นในระดับถึง 100-200 mA และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็ก

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเพิ่มเดิมอีก 3-4 ครั้ง พบว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้า CA และ CMC เมื่อถอดระบบออกดูพบว่า teflon ที่เป็นตัว support ระหว่าง plasma chamber กับ CA อันที่อยู่ใกล้กับระบบ extractor มีรอยไหม้เล็กน้อยตรงบริเวณที่ติดกับผนังของ CA แต่ teflon support อีกอันหนึ่งยังมีส่วนพาทเหมือนเดิม ส่วน teflon ที่เป็นตัว support ระหว่าง CA กับ CMC

ได้รับความเสียหายอย่างมากทั้งตู้ และที่ CMC มีขนาดเล็กติดอยู่ คาดว่าน่าจะเกิดจากการเผาไหม้ของ teflon เนื่องจากโดยปกติ teflon จะทนความร้อนได้ถึงประมาณ 200° C การที่ teflon ใหม แสดงว่าอุณหภูมิของ CMC จะต้องสูงกว่า 200° C แน่แน่นอน นอกจากนี้เมื่อสังเกตภายใน plasma chamber จะเห็นว่ามียอคราเป็นวงแหวนสีรุ้ง ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นถึงรูปที่

16



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 16 ความเสียหายที่เกิดขึ้นแก่ HOCAM ion source

(a) และ (b) รอยไหม้ของ teflon support

(b) CMC มีเจม่วาสีดำจับอยู่

(d) รอยคราเป็นวงสีรุ้งที่ผนังด้านในของ plasma chamber

จากการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด พบว่าเมื่อทำการปั๊มก๊าซด้วยอัตรามากกว่า 1.0 sccm จะทำให้ความดันภายใน plasma chamber มีค่ามากกว่า 10^{-3} mbar ซึ่งทำให้ไม่สามารถอ่านค่าความดันภายใน plasma chamber ได้ด้วย Penning Gauge ของบริษัท Edward ซึ่งโดยทั่วไป Penning Gauge จะอ่านความดันได้ในช่วง 10^{-7} - 10^{-2} mbar แต่ถ้าเราใช้แก๊สอ่านความดันในช่วง 10^{-2} - 10^{-3} mbar นาน ๆ และบ่อยครั้ง จะทำให้เกิดขมำบริเวณหัววัดได้ เป็นเหตุให้แก๊สอ่านค่าความดันผิดพลาดได้

เมื่อไม่สามารถอ่านความดันภายใน plasma chamber ได้ด้วย Penning Gauge ของบริษัท Edward จึงได้นำ Pirani Gauge ของบริษัท Balzers ซึ่งเป็นทรูกันซ์ที่มีอยู่เดิมในภาควิชา เกจชนิดนี้สามารถอ่านความดันได้ในช่วง $8 \times 10^{-4} - 10^3$ mbar มาต่อเข้าไปในบริเวณเดียวกันกับที่ต่อ Penning Gauge ผ่านทางท่อแยก 4 ทาง ดังนั้นในขณะนี้ความดันภายใน plasma chamber สามารถอ่านได้ด้วยเกจ 2 ตัว คือ Penning Gauge สำหรับความดันในช่วงที่ต่ำกว่า 10^{-3} mbar ซึ่งเป็นการทดลองโดยการปั๊มก๊าซอัตราน้อยกว่า 1.0 sccm และ Pirani Gauge สำหรับความดันในช่วงสูงกว่า 10^{-3} mbar ซึ่งมีเกจปั๊มก๊าซด้วยอัตรามากกว่า 1.0 sccm

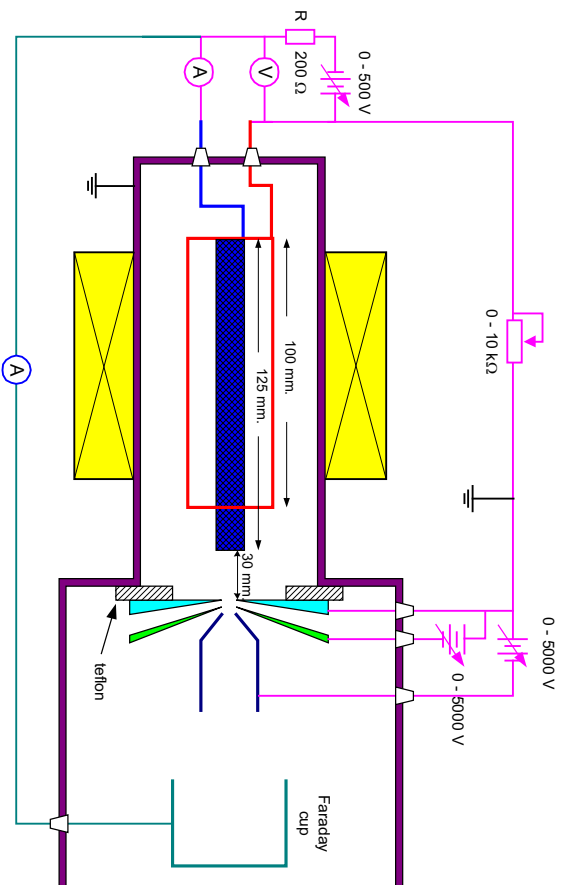
หลังจากที่ได้แก้ไขความเสียหายที่เกิดขึ้น HOCAM โดยการทำความสะอาดและเปลี่ยน teflon support ใหม่แล้ว ก็ได้ทดสอบการเกิด discharge อีกครั้ง เมื่อทดลองได้ไม่นานก็เกิดการไหม้ของ teflon support เช่นเดิม นอกจากนี้ยังมีการขาดของ CMC อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 17 จึงได้มีการออกแบบตัว support ระหว่าง CA และ CMC โดยใช้ ceramic พร้อมกับปรับรูปร่างของ CMC ให้ยาวขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 18 ทำให้ CMC อยู่ห่างจาก plasma electrode น้อยลงจาก 57 mm เหลือ 30 mm เพื่อเป็นการเพิ่ม plasma density บริเวณ plasma electrode ให้มากขึ้นดังรูป 19 แต่จากการทดลองโครงสร้างใหม่นี้ ปรากฏว่าเกิดการ sputtering สูงทำให้มีโลหะมาเคลือบที่ electrode มาก และ teflon support ก็มีรอยไหม้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 20 จึงมีแนวคิดว่าควรเพิ่มความยาวของ CA ให้เท่ากับ CMC ดังรูปที่ 21



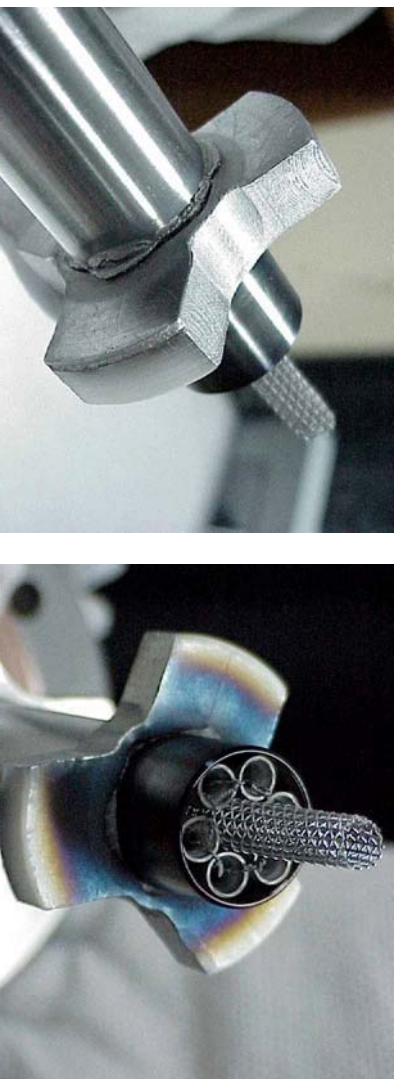
รูปที่ 17 ความเสียหายที่เกิดขึ้นหลังการทดลอง



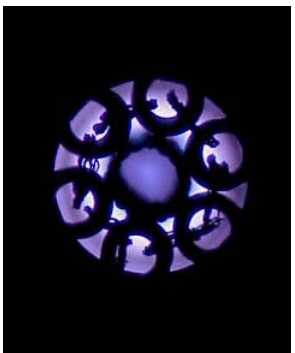
รูปที่ 18 ออกแบบ CMC ให้ยาวขึ้น และ support ด้วย ceramic



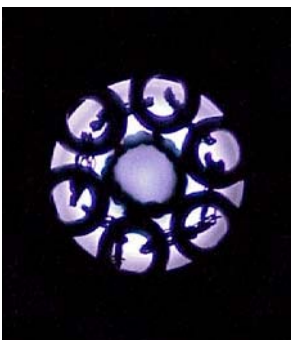
รูปที่ 19 CMC อยู่ใกล้ plasma electrode มากขึ้น



รูปที่ 20 การเกิด sputtering ทำให้มีโลหะเคลือบ



(a)



(b)

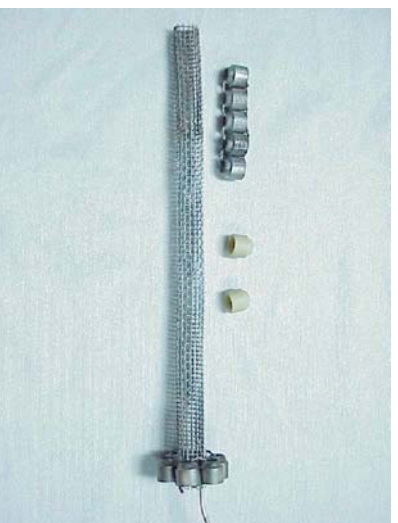


(c)

รูปที่ 23 ความสว่างและสีของพลาสมา

- (a) discharge current 30 mA
- (b) discharge current 70 mA
- (c) discharge current 100 mA

หลังจากทดลองใช้งานใช้สักระยะหนึ่ง รวมเวลาการใช้งานประมาณ 10 ชม. พบว่าพลาสมามีความสว่างน้อยลงอย่างมากจนกระทั่งดับลงในที่สุด เมื่อสังเกตดู discharge voltage พบว่ามีค่าเป็นศูนย์ จึงถอดแหล่งจ่ายไฟออกแล้ววัดความต้านทานระหว่างขั้ว CA และ CMC ของแหล่งกำเนิดโอะออน พบว่ามีความต้านทานเป็นศูนย์ แสดงว่าเกิดการลัดวงจรของขั้วไฟทั้งสอง จึงปิดระบบและนำขั้วไฟมาตรวจสอบ พบว่าสาเหตุของการลัดวงจรเกิดเนื่องจากมีโอะอะมาเคลือบที่ตัว ceramic support ที่อยู่ระหว่างขั้วไฟทั้งสอง ทำให้เห็นสีของ ceramic เปลี่ยนเป็นสีเงินแทนที่จะเป็นสีขาวอมเหลืองอย่างปกติ ดังรูปที่ 24 จากการวิเคราะห์สาเหตุพบว่าโอะอะนี้คือ stainless steel ที่หลุดจากขั้ว CMC จากการขบวนการ sputtering เนื่องจากโครงสร้างของแหล่งกำเนิดชนิด HOCAM นี้ โอะอะอบวกในพลาสมาจะถูกเร่งด้วยขั้วลบของ CMC เพื่อเข้าสู่ศูนย์กลางของขั้ว CMC จึงเกิดการชนกับ CMC เกิดขบวนการ sputtering ดังกล่าว



รูปที่ 24 Ceramic support ที่ถูกเคลือบด้วยโอะอะ

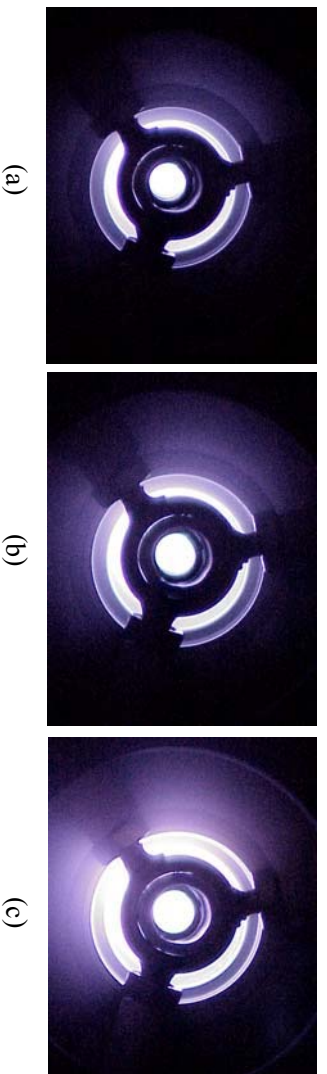
เปรียบเทียบกับ 2 ชิ้น ตรงกลางที่ไม่ถูกเคลือบ

การแก้ไขปัญหาคำทำโดยออกแบบชุด support ขั้ว CMC ใหม่ ไม่ให้มีส่วนที่สัมผัสกับขั้ว CA ชุด support ที่ออกแบบใหม่นี้ มีลักษณะดังรูปที่ 25 โดยการสวมท่อ ceramic ที่ปลายทั้งสองของ CMC แล้วจึงใช้สวมชุด support ส่วนที่เป็นวงแหวนที่บ่ท่อ ceramic แล้วใช้ส่วนที่ขึ้นขาทั้งสามค้ำกับผนังด้านในของ plasma chamber



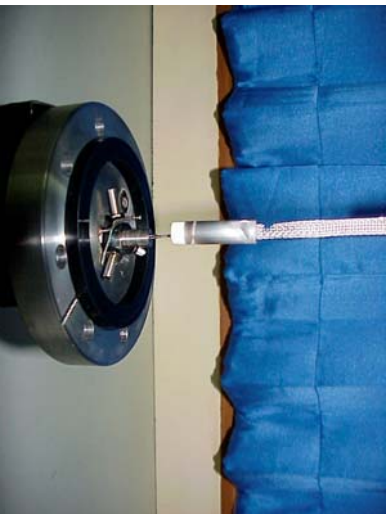
รูปที่ 25 ชุด support ขั้ว CMC

เมื่อติดตั้งระบบเรียบร้อยแล้วจึงทำการทดสอบการเกิด plasma discharge อีกครั้ง พบว่าการเกิดพลาสมาเป็นไปตามยติ ดังรูปที่ 26 แต่เมื่อใช้งานไปได้ประมาณ 20 ชม. พบว่า discharge current เริ่มลดลงเรื่อยและไม่สามารถทำให้เพิ่มขึ้นถึงแม้จะเพิ่มสามารถแต่กลับมากแล้วก็ตาม เมื่อถอดขั้วไฟฟ้าออกพบว่า ขั้ว CMC ซึ่งเป็นตะแกรงลวด stainless steel มีการสึกกร่อนจนเห็นลวดบางลงมากและมีบางส่วนขาดเป็นรู นอกจากนั้นยังมีโลหะไปเคลือบอยู่ที่ผิวด้านในของขั้วไฟฟ้าตรงกระบอก CA จำนวนมากด้วย ดังรูปที่ 27



รูปที่ 26 ความสว่างของพลาสมา

- (a) discharge current 55 mA
- (b) discharge current 70 mA
- (c) discharge current 140 mA



รูปที่ 27 การสักร้อนของขั้ว CMC และมีโลหะมาเคลือบที่ขั้ว CA

การสักร้อนของขั้ว CMC เกิดเนื่องจากขบวนการ sputtering ดังที่กล่าวข้างต้น จากตารางแสดงค่า sputter yield พบว่า stainless steel เมื่อถูกชนด้วยไอออนของอาร์กอนจะมี sputter yield 1.26 ที่พลังงาน 600 eV หมายความว่าเมื่อไอออนของอาร์กอน 1 อนุภาคเข้าชนจะทำให้มีอนุภาคของ stainless steel หลุดออก 1.26 อนุภาค ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ทำขั้ว CMC เพราะจะทำให้มีอายุการใช้งานสั้น

การแก้ไขทำได้โดยเปลี่ยนไปใช้วัสดุชนิดอื่นที่มี sputter yield ต่ำกว่า จากตารางแสดงค่า sputter yield พบว่า โลหะที่เหมาะสม ได้แก่ ทังสเตน เนื่องจากมี sputter yield เพียง 0.62 แต่เนื่องจากทั้งสแตนเลสที่หาได้ในประเทศไทยจะนำมาใช้สำหรับใช้เป็นลวดเชื่อม ซึ่งมีขนาดใหญ่และแข็งแรงไม่สามารถนำมาใช้ทำ CMC ได้ จึงหันมาใช้ลวด Kanthal ซึ่งเป็นลวดที่ใช้ทำลวดความร้อนแทน เนื่องจากลวดชนิดนี้ประกอบของทังสเตนเป็นหลักและมีส่วนผสมของ NiChrome อยู่เล็กน้อย (NiChrome เป็นโลหะผสม : 60% Ni, 15% Cr และ 25% Fe ถึงแม้ Ni, Cr และ Fe จะมี sputter yield สูงก็ตาม แต่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อย)

ในการทำขั้ว CMC จากลวด Kanthal ใช้ทดลองทำเป็นลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ทำเป็นเกลียวด้วยลวดทั้งขนาดเล็กและใหญ่ มีระยะห่างระหว่างเกลียวกว้างและแคบ และนำมาสานเป็นตะแกรงดังแสดงในรูปที่ 28 เป็นต้น เมื่อทดลองนำไปใช้งานพบว่า โครงสร้างของ CMC ที่เป็นเกลียวจะใช้งานได้ไม่นาน เนื่องจากเวลาเกิด plasma discharge จะมีความร้อนค่อนข้างสูง เป็นผลให้ ขั้ว CMC ที่เป็นเกลียวนั้นมีการงอตัวมากจนกระทั่งไปแตะกับส่วนของ CA ได้ จึงไม่สามารถใช้งานได้ แต่โครงสร้างของ CMC ที่นำลวด Kanthal มาสานเป็นตะแกรงจะสามารถใช้งานได้นานโดยไม่เสียรูป จึงได้ใช้โครงสร้างแบบนี้ในการทดลองต่อมา จากการทดสอบการใช้งานพบว่า ขั้วไฟฟ้าแบบนี้มีอายุการใช้งานจนถึง 80 – 100 ชม. ก่อนที่จะเกิดการ sputtering จนเส้นลวดขาด



รูปที่ 28 CMC แบบต่าง ๆ ที่จากลวด Kanthal

ตารางแสดงค่า Sputter Yield

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

2.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ discharge current

จากผลการศึกษาพบการเกิด plasma discharge ดังรูปที่ 15 พบว่า discharge current มีค่าลดลงตามเวลา โดยเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีค่า 460 G จะมี discharge current ประมาณ 200 mA และจะลดลงตามเวลาอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กเป็น 580 G พบว่า discharge current จะเพิ่มขึ้นทันที และมีค่าลดลงตามเวลาต่อไป แต่เมื่อเวลาผ่านไป discharge current จะเริ่มคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง ทำให้เข้าใจในเบื้องต้นว่าค่าไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดออออนขณะนี้เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว และหวังว่าเมื่อเปิดเครื่องต่อไปจะได้ discharge current เท่านี้เมื่อต้องการทำงานไว้ที่สภาวะเดียวกัน แต่เมื่อใช้งานจริงผลที่ปรากฏไม่เป็น ไปอย่างทีคาด กล่าวคือตอนเริ่มต้นจะมี discharge current สูงและลดลงตามเวลาเช่นเดิม ผลลักษณะนี้เกิดขึ้นทุกครั้งที่ใช้งาน จึงมีคำถามว่าอะไรเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผลเช่นนี้

ในการหาสาเหตุ ได้ตั้งข้อสมมติฐานไว้ 2 ข้อ

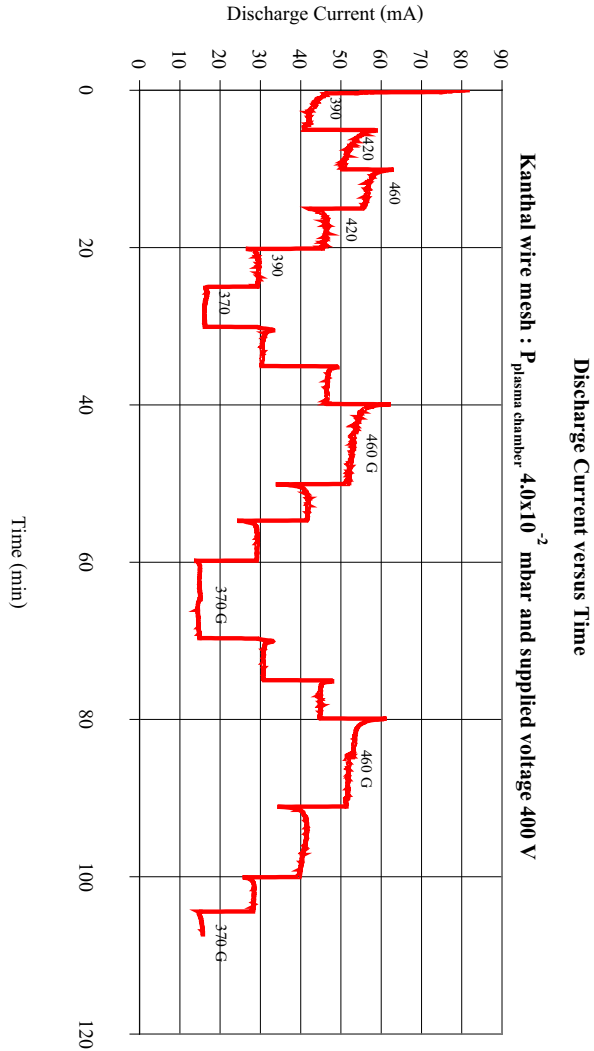
1. เกิดจากการเสื่อมสภาพของขั้ว CMC
2. เกิดจากอุณหภูมิของก๊าซที่เปลี่ยนไป

การเสื่อมสภาพของขั้ว CMC อันเนื่องจากการสึกหรอนหรือสิ่งแปลกปลอมมาเคลือบที่ผิวอาจเป็นสาเหตุให้ discharge current ลดลงได้ ในกรณีที่อุณหภูมิของก๊าซสูงขึ้นจะทำให้ mean free path มีค่ามากขึ้น ดังนั้นโอกาสในการชนกันแล้วทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นออออนจึงลดลง ทำให้ discharge current ลดลงได้

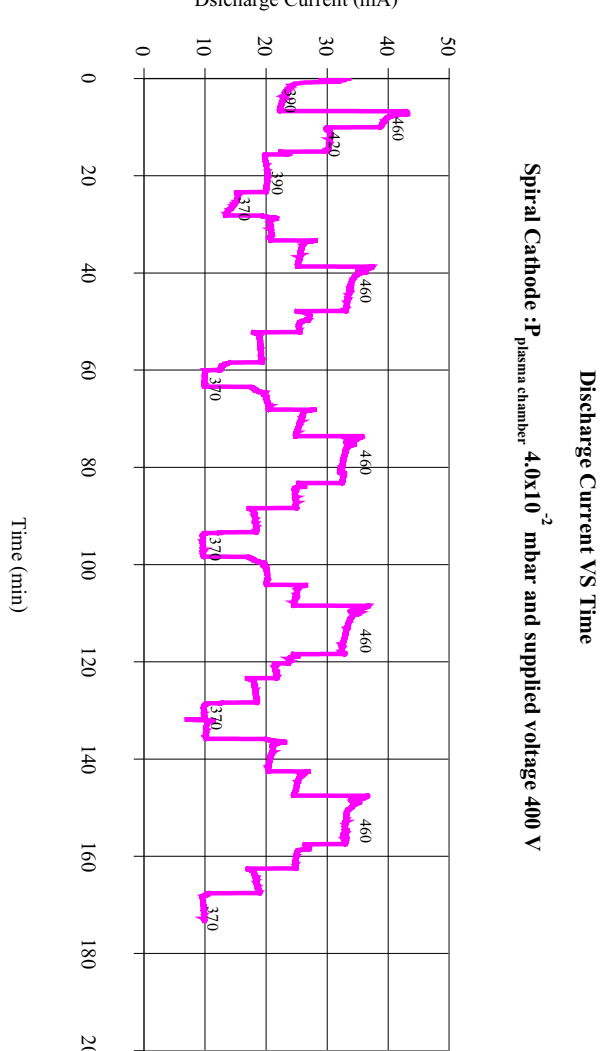
- การศึกษาการเสื่อมสภาพของขั้ว CMC

ในการทดสอบข้อสมมติฐานที่ว่า discharge current ลดลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพของ CMC นั้น ที่ปรึกษาโครงการ (ดร.วิโรจน์ ต้นตราวรณ) แนะนำให้ทำการทดลองโดยการวัดค่า discharge current เป็นช่วง ๆ ช่วงละ 5 นาที โดยแต่ละช่วงให้ใช้สนามแม่เหล็กคงที่ เริ่มช่วงแรกให้ใช้สนามแม่เหล็กน้อยสุด และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงต่อไป จนถึงค่าสูงสุดที่ต้องการ จากนั้นให้ลดสนามแม่เหล็กลงเป็นช่วง ๆ จนถึงค่าต่ำสุด ถือเป็น 1 รอบ ทำเช่นนี้ต่อเนื่องอย่างน้อย 3 รอบ ถ้าค่า discharge current ในช่วงขาขึ้นและช่วงขาลงใน 1 รอบ มีค่าไม่เท่ากันและเมื่อเทียบกับผลการวัดรอบถัดไปแล้ว ถ้า discharge current มีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ แสดงว่า มีการเสื่อมสภาพของขั้ว CMC จริง

การทดลองทำโดยใช้แหล่งกำเนิดออออน HOCAM ที่มีขั้ว CMC ที่ทำจากลวด Kanthal ฐานเป็นตะแกรง ในขณะทดลองความดันภายใน plasma chamber 4.0×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจระหว่าง CA กับ CMC 400 V สนามแม่เหล็กที่ใช้ในแต่ละชั้น คือ 370 G, 390 G, 420 G และ 460 G ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 29(a) นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองโดยใช้ขั้ว CMC ที่ทำจากลวด Kanthal พื้นเป็นเกลียว ในสภาวะเดียวกัน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 29(b)



(a)



(b)

รูปที่ 29 ค่า discharge current เปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็ก

(a) ขั้ว CMC มีโครงสร้างเป็นตะแกรง

(b) ขั้ว CMC มีโครงสร้างเป็นเกลียว

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับ discharge current ในขณะเพิ่มและลดปริมาณแม่เหล็กพบว่ามีความใกล้เคียงกันมากเมื่อใช้สนามแม่เหล็กเท่ากัน และในแต่ละรอบการวัดยัง ได้ผลไม่เปลี่ยนแปลงอีกด้วย ถึงแม้จะใช้เวลาในการวัดรวมทั้งสิ้นเกือบ 2 ชั่วโมงก็ตาม จึงสรุปได้ว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขั้ว CMC เนื่องจากการเสื่อมสภาพหรือถ้ามีผลน้อยมากต่อการลดลงของ discharge current ในช่วงเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงที่ทำการทดลอง

- การศึกษาผลของอุณหภูมิ

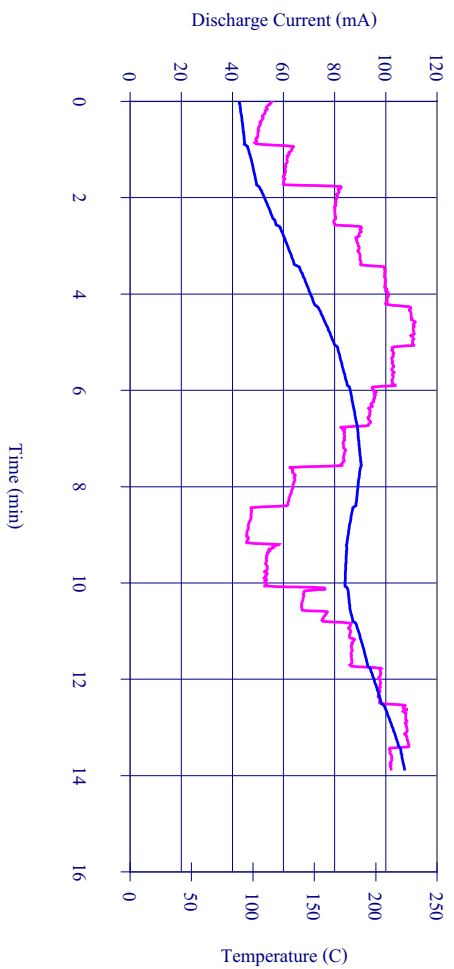
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของ discharge current จะต้องมีการวัดอุณหภูมิของก๊าซในขณะที่เกิด discharge แต่เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซกับขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับก๊าซนั้นถือว่ามีความคล้ายกัน ในการทดลองนี้จึงได้ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิในที่นี้ใช้ thermocouple type K และกับขั้วด้านในของขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก CA และต่อผ่านออกมายังเครื่องวัดซึ่งอยู่นอก plasma chamber ผ่านทาง electrical feedthrough ดังรูปที่ 30 จากนั้นจึงทำการวัดอุณหภูมิและ discharge current ในขณะทีความดันภายใน plasma chamber มีค่า 3.5×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจระหว่างขั้ว CA กับ CMC 400 V สนามแม่เหล็ก 370 G

จากผลการทดลองดังรูปที่ 31(a) พบว่า เมื่อมีการควบคุมให้ discharge current มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง โดยการควบคุมสนามแม่เหล็ก จะมีผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตาม discharge current ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าก่อนที่จะเกิด discharge ก๊าซมีอุณหภูมิ 146°C (เกิดจากการทดลองก่อนหน้านี้) เมื่อเริ่มต้นเกิด plasma discharge โดยให้สนามแม่เหล็กคงที่ จะมี discharge current สูงขึ้นทันทีเป็นประมาณ 160 mA ในขณะนั้นอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้น จากนั้นภายในเวลาเพียงประมาณ 20 วินาที discharge current ก็ลดลงจนมีค่าคงที่ ที่ประมาณ 50 mA ในขณะทีอุณหภูมิก็มีความเท่ากัน และเมื่อ plasma discharge หยุดลง อุณหภูมิก็เริ่มลดลงด้วย ดังรูปที่ 31(b)



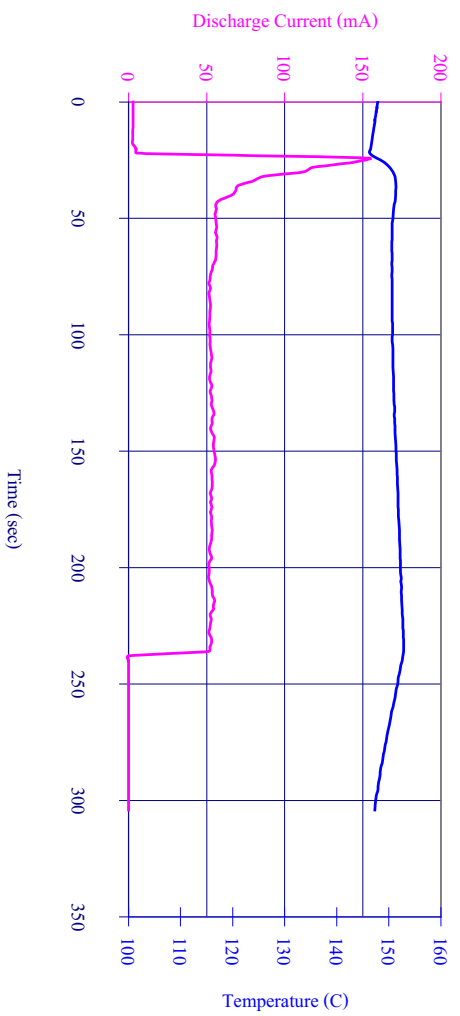
รูปที่ 30 การติดตั้ง thermocouple เพื่อวัดอุณหภูมิของก๊าซ

Discharge Current and Temperature versus Time



(a)

Discharge Current and Temperature VS Time
P_{plasma chamber} 3.5x10⁻² mbar , 370 G and 400 V



(b)

รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ของ discharge current กับอุณหภูมิ

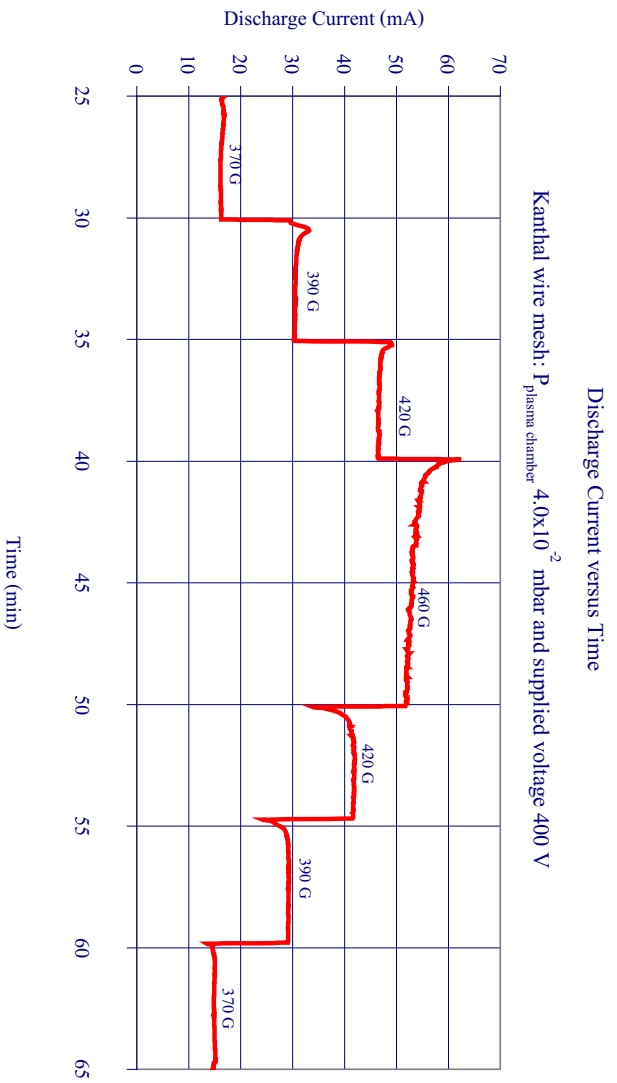
(a) เมื่อเปลี่ยนสนามแม่เหล็กขึ้นลง

(b) เมื่อเปลี่ยนสนามแม่เหล็กคงที่

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อ discharge current มีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิของก๊าซก็จะสูงขึ้นด้วยและอุณหภูมิจะลดลงเมื่อ discharge current มีค่าต่ำลง แต่เนื่องจากข้อไฟฟ้าทรงระบอบ CA มีความหนาและความยาวค่อนข้างมากจึงมีมวลมาก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงเกิดขึ้นช้ากว่าการเปลี่ยนแปลงของ discharge current เล็กน้อย และในกรณีที่ให้สนามแม่เหล็กที่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของก๊าซยังไม่เข้าสู่ภาวะคงตัว เช่น ในกรณีที่เริ่มมีค่าสูงขึ้น discharge current จะมีค่าสูงต่อเมื่ออุณหภูมิของก๊าซเข้าสู่ภาวะคงตัว discharge current จึงมีค่าลดลงและมีค่าคงที่ด้วย อธิบายได้ว่า ในขณะที่มีอุณหภูมิของก๊าซยังต่ำอยู่ mean free path จะมีค่าสูงด้วย ดังนั้น โอกาสในการชนกันแล้วทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออนจึงมีน้อยลง เป็นผลให้ discharge current มีค่าต่ำลง เมื่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนของ plasma ทำให้ mean free path เริ่มมีค่าสูงด้วย ดังนั้น โอกาสในการชนกันแล้วทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออนจึงมีน้อยลง เป็นผลให้ discharge current มีค่าต่ำลง เมื่ออุณหภูมิคงที่ mean free path ก็มีค่าคงที่ด้วย จึงทำให้ discharge current มีค่าคงที่

ในกรณีของผลการทดลองในรูปที่ 31 (b) พบว่า discharge current มีค่าลดลงสูงค่าคงที่อย่างรวดเร็ว ซึ่งต่างจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ เช่น กรณีที่รูปที่ 15 ที่กว่า discharge current จะมีค่าลดลงสูงค่าคงที่กินเวลาราว 15 - 20 นาที ทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิเริ่มต้นของก๊าซ (ของช่วง CA) ในกรณีในรูปที่ 31 (b) อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าสูง ต่างจากอุณหภูมิเริ่มต้นของก๊าซ (ของช่วง CA) ในการทดลองรูปที่ 15 นั้น อุณหภูมิเริ่มต้นเป็นอุณหภูมิห้อง จึงใช้เวลานานกว่าในการเข้าสู่ภาวะสมดุล

นอกจากนี้ เมื่อนำผลการทดลองในรูปที่ 29(a) มาขยายดูในรายละเอียดของการวัด 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 32 พบว่า ในช่วงขาขึ้น เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็ก discharge current จะเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด โดยจะมีค่าสูงแล้วจึงลดลงสู่ค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นคงได้กล่าวข้างต้น แต่เมื่อถึงกตกผลเมื่อมีการลดสนามแม่เหล็ก พบว่า discharge current จะลดลงอย่างทันทีทันใดเช่นกัน แต่จะมีค่าต่ำกว่าปกติก่อนที่จะเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าคงที่ อธิบายได้ว่า เมื่อลดสนามแม่เหล็กลงทันทีทันใด อุณหภูมิของก๊าซไม่ได้ลดลงทันที เมื่ออุณหภูมิยังสูงอยู่ discharge current จึงเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิเริ่มค่อยลดลง discharge current จึงมีค่าสูงขึ้นและมีค่าคงที่ในที่สุด



รูปที่ 32 การเปลี่ยนแปลงของ discharge current กับสนามแม่เหล็ก

ผลจากการทดลองข้างต้นทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้มากขึ้น จนสามารถควบคุมการทำงานให้มีเสถียรภาพ การทดลองและการวัดต่าง ๆ มีความน่าเชื่อถือและสามารถทำซ้ำได้ ตลอดจนสามารถแก้ไขปัญหต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรอื่น ๆ อีกที่มีผลต่อการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ ได้แก่ สนามแม่เหล็กและความดันภายใน plasma chamber เป็นต้น จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาพฤติกรรมของแหล่งกำเนิดไอออนเพิ่มเติม

2.7 การศึกษาผลของความดันและสนามแม่เหล็ก

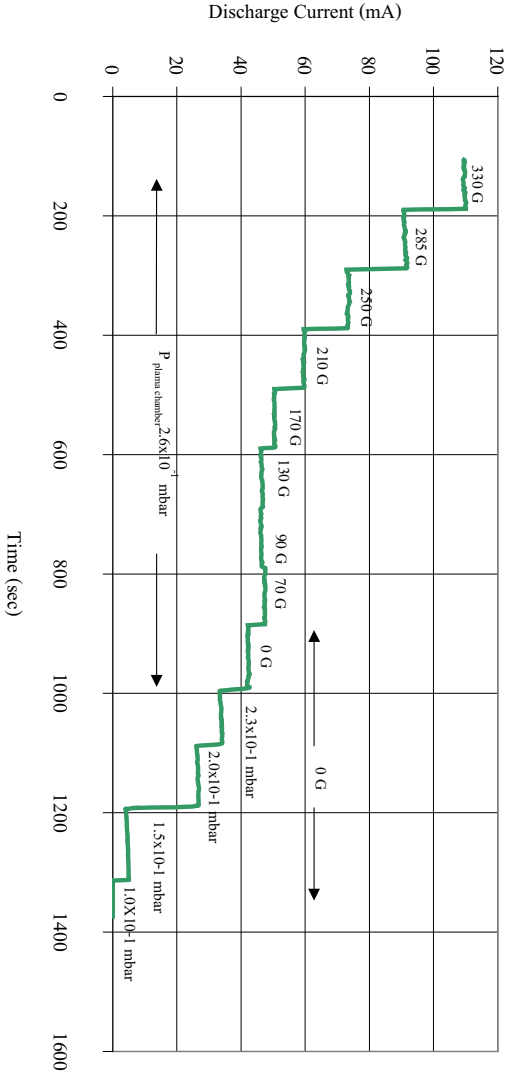
การศึกษาค้นคว้าความดันและสนามแม่เหล็กที่มีต่อการเกิด plasma discharge มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาว่า ถ้าป้อนโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงให้แก่ระหว่างขั้ว CA และ CMC คงที่ค่าหนึ่งแล้ว (discharge voltage ซึ่งหมายถึงโวลเตจตกคร่อมระหว่างขั้ว CA และ CMC จะเปลี่ยนแปลงตาม discharge current ถึงแม้จะป้อนโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงมีค่าคงที่ เนื่องจากมีตัวต้านทาน 200 Ω 90 W ต่ออนุกรมอยู่) ความดันและสนามแม่เหล็กจะมีผลอย่างไรต่อ discharge current การทดลองทำโดยป้อนโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรง 400 V แล้ววัด discharge current เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันใน plasma chamber และสนามแม่เหล็ก

จากการทดลองพบว่า ที่ความดันคงที่ค่าหนึ่ง discharge current จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น และที่สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง discharge current จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดัน

และโดยทั่วไปถ้าความดันอยู่ในระดับ 10^{-2} mbar จะต้องใช้สนามแม่เหล็กสูงกว่า 200 G จึงจะเริ่มเกิด plasma discharge ี่ได้ แต่ถ้าเป็นความดันสูงเช่นในระดับ 10^{-1} mbar ขึ้น ้ไป plasma discharge สามารถดำรงอยู่ได้โดยไม่ต้องใช้สนามแม่เหล็ก หมายความว่าถ้า ไม่ใช้สนามแม่เหล็กก่อนก็จะไม่เกิด plasma discharge แต่ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกระตุ้นให้เกิด plasma discharge ขึ้นก่อนแล้วจึงลดสนามแม่เหล็กลงจนเป็นศูนย์ plasma discharge ก็ยังคงเกิดต่อไปได้ ดังผลการทดลองในรูปที่ 33 จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อความดันใน plasma chamber มีค่าคงที่ 2.6×10^{-1} mbar discharge current จะมีค่าลดลงตามสนามแม่เหล็ก และเมื่อสนามแม่เหล็กลดลงจนเป็นศูนย์ ยังคงมี discharge current ประมาณ 40 mA แต่จะมีค่าลดลงเมื่อความดันลดลงและจะเป็นศูนย์ที่ความดัน 1.0×10^{-1} mbar

ปรากฏการณ์ เหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจาก mean free path มีค่าแปรผกผันกับความดัน ที่ความดันสูง mean free path จะมีค่าน้อยโอกาสในการชนแล้วเกิด plasma discharge มากกว่าที่ความดันต่ำ และสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวช่วยให้อิเล็กตรอนวิ่งวงเป็นเกลียว ซึ่งเป็นการเพิ่มทางเดินของอิเล็กตรอน ทำให้มีโอกาสในการชนแล้วเกิด plasma discharge มากกว่าเมื่อ ไม่มีสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าความดันสูงถึงระดับหนึ่ง mean free path จะมีค่าน้อย ประกอบกับในสภาพที่เกิด plasma discharge อยู่ก่อนแล้วจึงมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มากพอที่จะเกิดการชนอย่างต่อเนื่องต่อไป จึงทำให้เกิด plasma discharge ต่อไปได้ เมื่อลดความดันลง mean free path จะยาวขึ้นเรื่อยในที่สุด โอกาสในการชนแล้วเกิด plasma discharge จะมีน้อยกว่าการเกิด recombination การเกิด plasma discharge จึงยุติลง

Effect of Pressure and Magnetic Field on Discharge Current



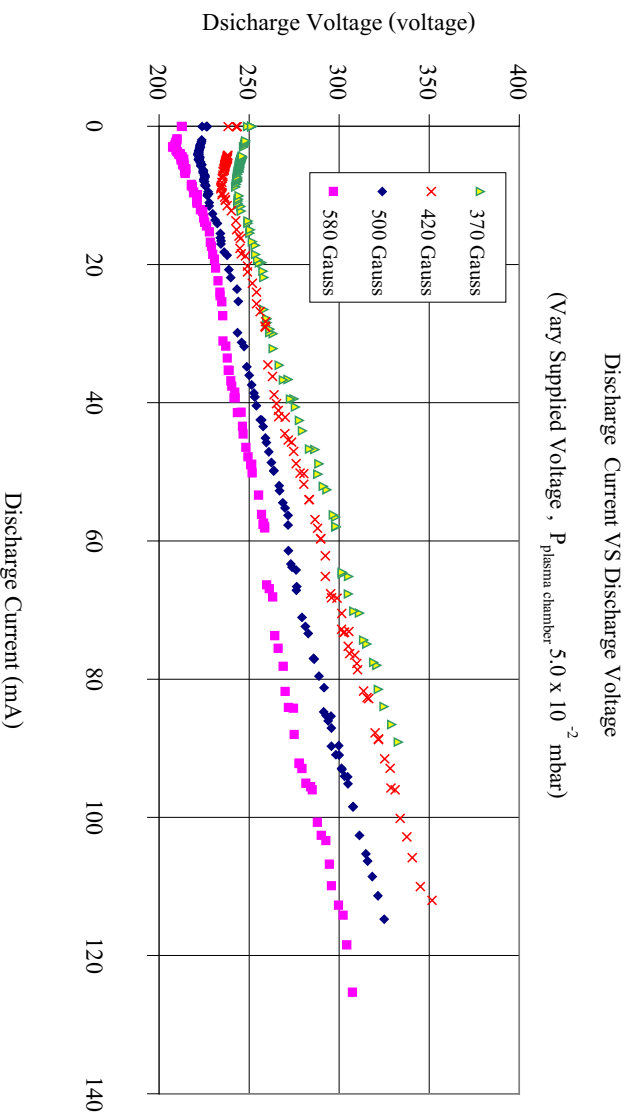
รูปที่ 33 ผลของความดันและสนามแม่เหล็กต่อ discharge current

- การศึกษา I-V Characteristic

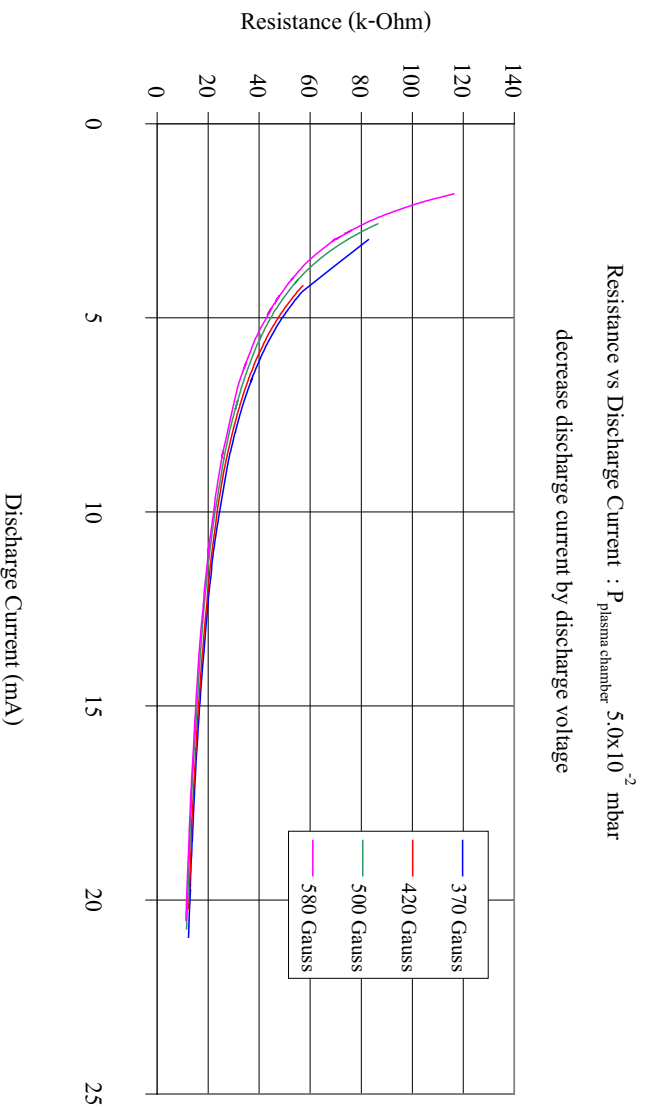
การศึกษา I-V characteristic มีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง discharge current กับ discharge voltage ที่ความดันและสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

- ความดันคงที่

การทดลองทำโดยใช้ความดันคงที่ 5.0×10^{-2} mbar เมื่อให้สนามแม่เหล็กคงที่ค่าหนึ่ง เช่น 370 G เพิ่มโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงจนกระทั่งเกิด discharge current ประมาณ 100 mA วัดค่า discharge current และ discharge voltage ในขณะทีลดโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงลงเรื่อย ๆ จน discharge current เป็นศูนย์ จากนั้นเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กแล้วทำการทดลองเช่นเดิม ใ้ผลการทดลองดังรูปที่ 34 นำค่า discharge current และ discharge voltage มาคำนวณหาความต้านทานของพลาสมา จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 35 จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ไม่พบความเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามสนามแม่เหล็กอย่างเด่นชัด ยกเว้นเมื่อ discharge current มีค่าต่ำกว่า 10 mA เท่านั้น



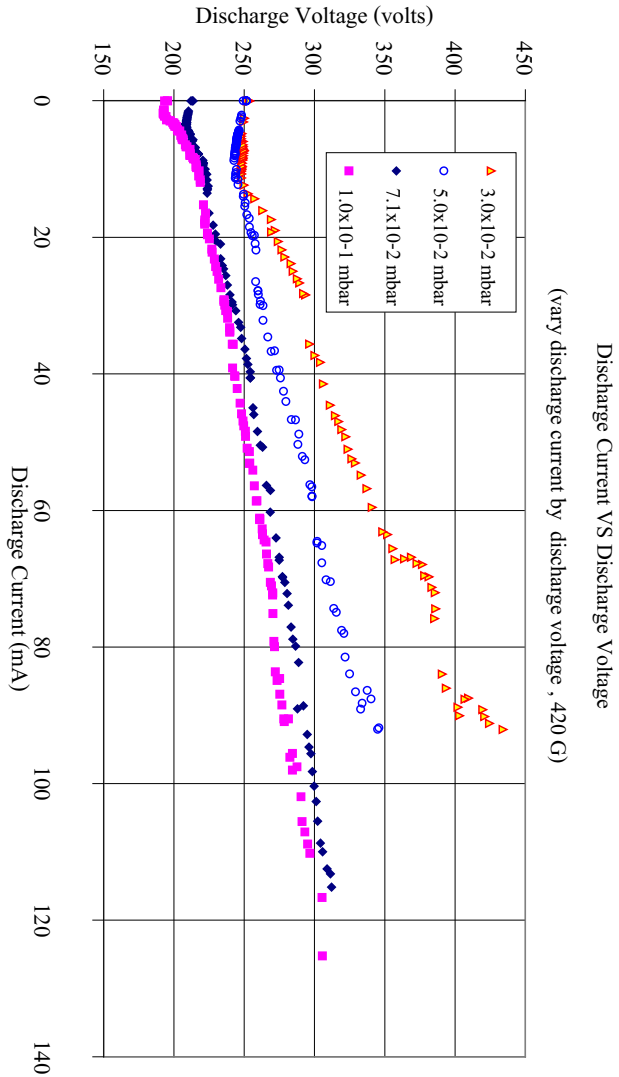
รูปที่ 34 I-V Characteristic เมื่อความดันคงที่



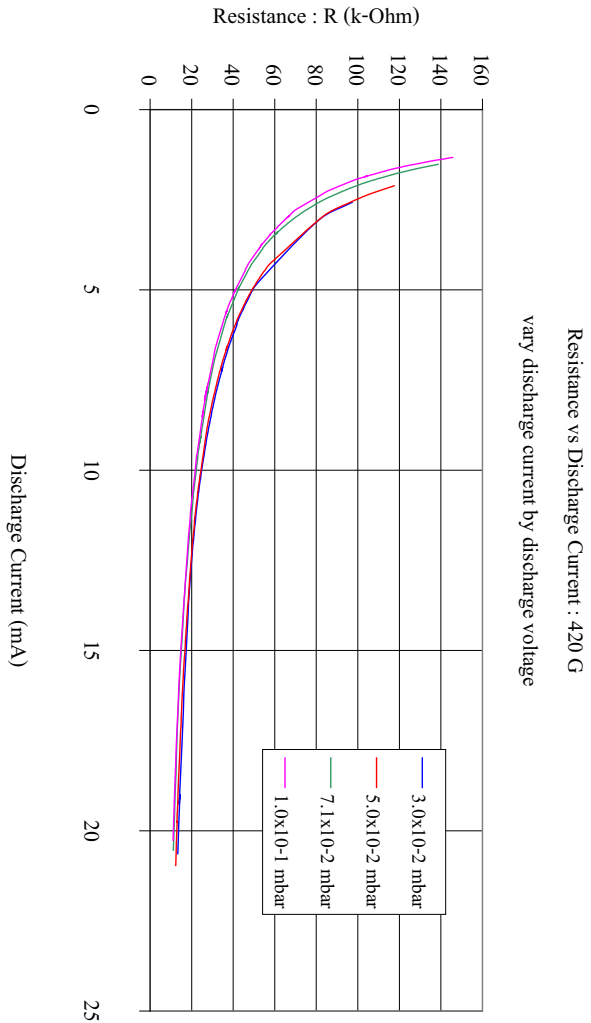
รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานกับ discharge current เมื่อความดันคงที่

- สันนามแม่เหล็กคงที่

การทดลองทำโดยใช้สนามแม่เหล็กคงที่ 420 G ที่ความดันคงที่ค่าหนึ่ง เช่น 3.0×10^{-2} mbar เพิ่มโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงจนกระทั่งเกิด discharge current ประมาณ 100 mA วัดค่า discharge current และ discharge voltage ในขณะทีลดโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงลงเรื่อย ๆ จน discharge current เป็นศูนย์ จากนั้นเปลี่ยนความดันแล้วทำการทดลองเช่นเดิม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 36 นำค่า discharge current และ discharge voltage มาคำนวณหาความต้านทานของพลาสมาจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 37 จะได้ผลใกล้เคียงกับกรณีที่มีความดันคงที่คือ ไม่พบความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานตามความดันอย่างเด่นชัด ยกเว้นเมื่อ discharge current มีค่าต่ำกว่า 10 mA เท่านั้น



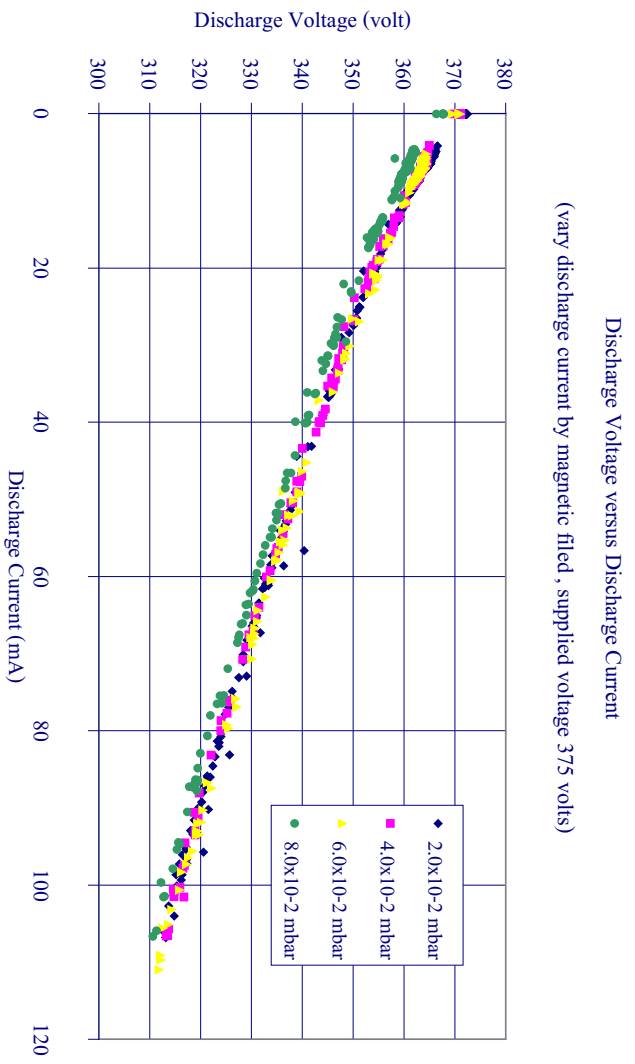
รูปที่ 36 I-V Characteristic เมื่อสนามแม่เหล็กคงที่



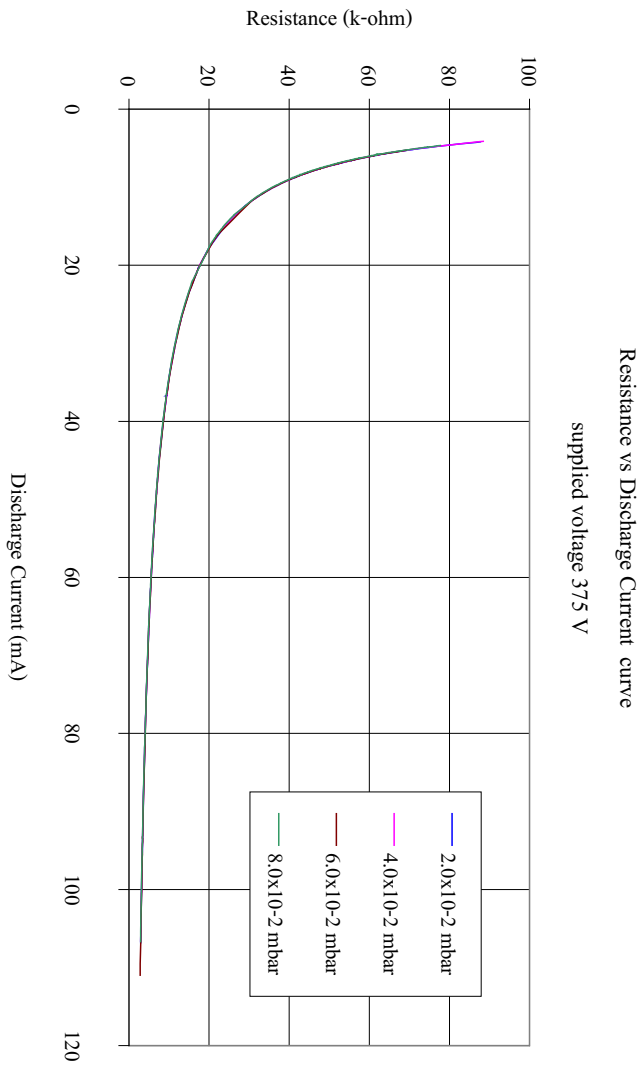
รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ของความต้านทานกับ discharge current เมื่อสนามแม่เหล็กคงที่

- *Applied Voltage* คงที่

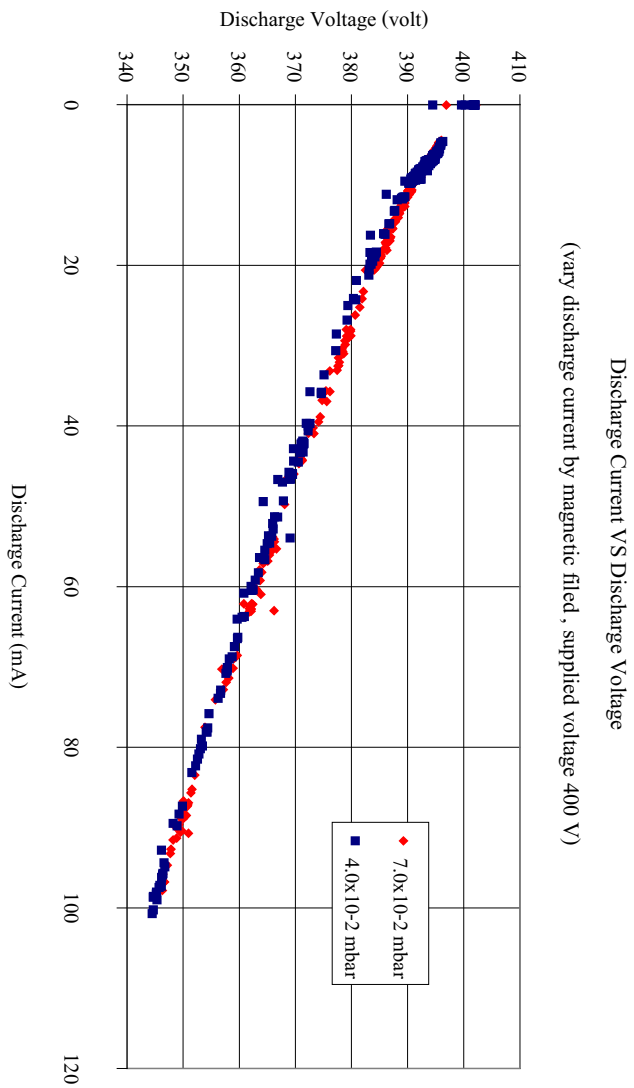
การทดลองทำโดยเปลี่ยนโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงมีค่าคงที่ 375 V ที่ความดันคงที่ค่าหนึ่ง เช่น 2.0×10^{-2} mbar เพิ่มสนามแม่เหล็กจนกระทั่งเกิด discharge current ประมาณ 100 mA วัดค่า discharge current และ discharge voltage ในขณะวัดสนามแม่เหล็กลงเรื่อย ๆ จน discharge current เป็นศูนย์ จากนั้นเปลี่ยนความดันแล้วทำการทดลองเช่นเดิม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 38 นำค่า discharge current และ discharge voltage มาคำนวณหาความต้านทานของพลาสมา จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 39 เมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้งแต่เพิ่มโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงเป็น 400 V ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 40 และ รูปที่ 41 ผลการทดลองพบว่า I-V Characteristic ที่ความดันต่าง ๆ ในช่วงความดันระหว่าง 2.0×10^{-2} ถึง 8.0×10^{-2} mbar มีค่าใกล้เคียงกันมาก และความต้านทานก็มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามความดันด้วย ทั้งสองกรณี แต่ความต้านทานของพลาสมาในกรณีที่ใช้โวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟตรงมีค่าต่างกันจะต่างกันเล็กน้อย จะสังเกตเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนในช่วง discharge current ต่ำกว่า 40 mA เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 42



รูปที่ 38 I-V Characteristic เมื่อ applied voltage คงที่ 375 V

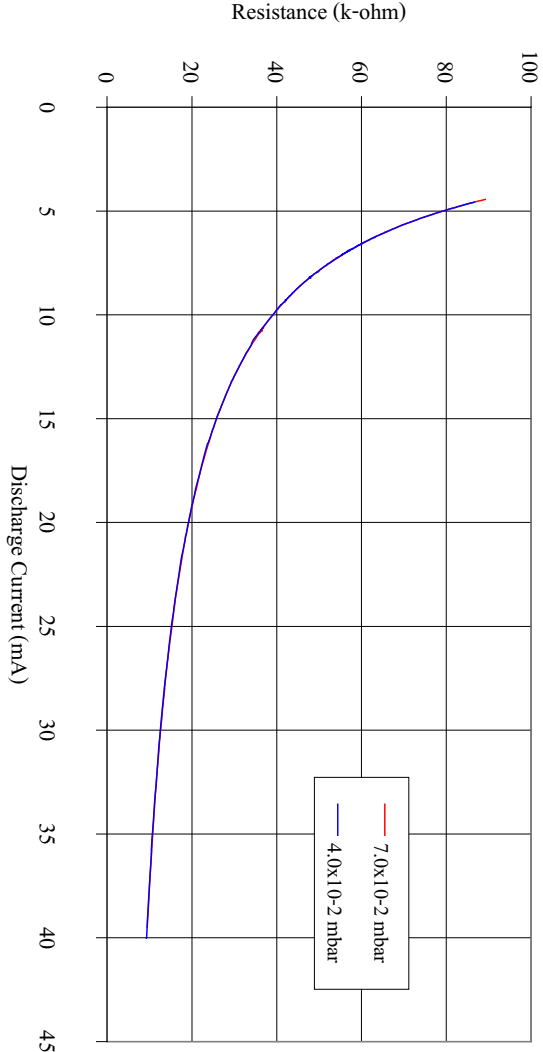


รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานกับ discharge current
เมื่อ applied voltage คงที่ 375 V



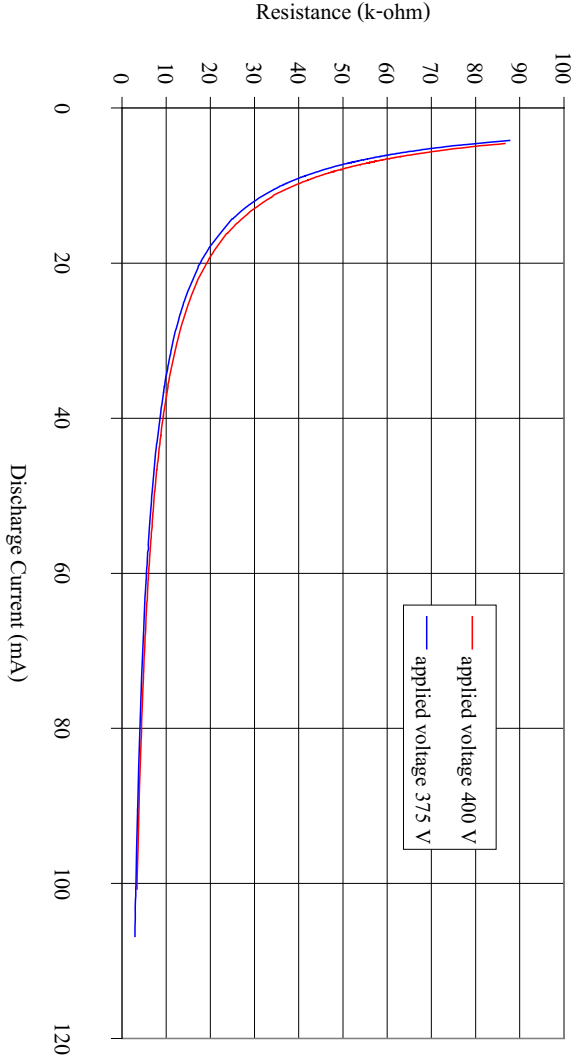
รูปที่ 40 I-V Characteristic เมื่อ applied voltage คงที่ 400 V

Resistance vs Discharge Current curve :
supplied voltage 400 V



รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ของความต้านทานกับ discharge current
เมื่อ applied voltage คงที่ 400 V

Resistance vs Discharge Current curve



รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ของความต้านทานกับ discharge current
เมื่อ applied voltage ต่างกัน

ความต้านทานของพลาสมาที่แสดงในรูป จำนวนจาก I-V Characteristic ของพลาสมาโดยใช้กฎของโอห์ม พบว่าความต้านทานมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง discharge current ต่ำ และจะมีค่าเกือบคงที่ เมื่อ discharge current สูง แสดงว่ามีขบวนการเกิด plasma discharge ต่างกันในแต่ละช่วงของกระแส

จากผลการทดลองในรูปที่ 38 และ 40 พบว่าในช่วงที่กระแสต่ำกว่าประมาณ 10 mA discharge voltage มีค่าลดลง เมื่อ discharge current มีค่าเพิ่มขึ้น ($dI/dV < 0$) ทั้งนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าถูกรบกวนด้วย space charge ในช่วงกระแสนี้ มีการเกิด avalanche process เป็นผลให้ความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็ว จากระดับ $M\Omega$ ู่ระดับ $k\Omega$ จากนั้นการ glow discharge ซึ่งเริ่มต้นบริเวณขั้ว CMC ก่อน จะเริ่มแผ่ออกไปยัง ขั้ว CA อย่างรวดเร็ว ในขณะนี้กระแสจะเพิ่มขึ้นมากและความต้านทานก็ยังลดลงแต่มีอัตราการลดลงช้ากว่าในช่วงแรก ในที่สุดเมื่อการ glow discharge เกิดอย่างสม่ำเสมอในระหว่าง CA กับ CMC แล้วความต้านทานจะมีค่าเกือบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น

3. การศึกษาระบบ extraction

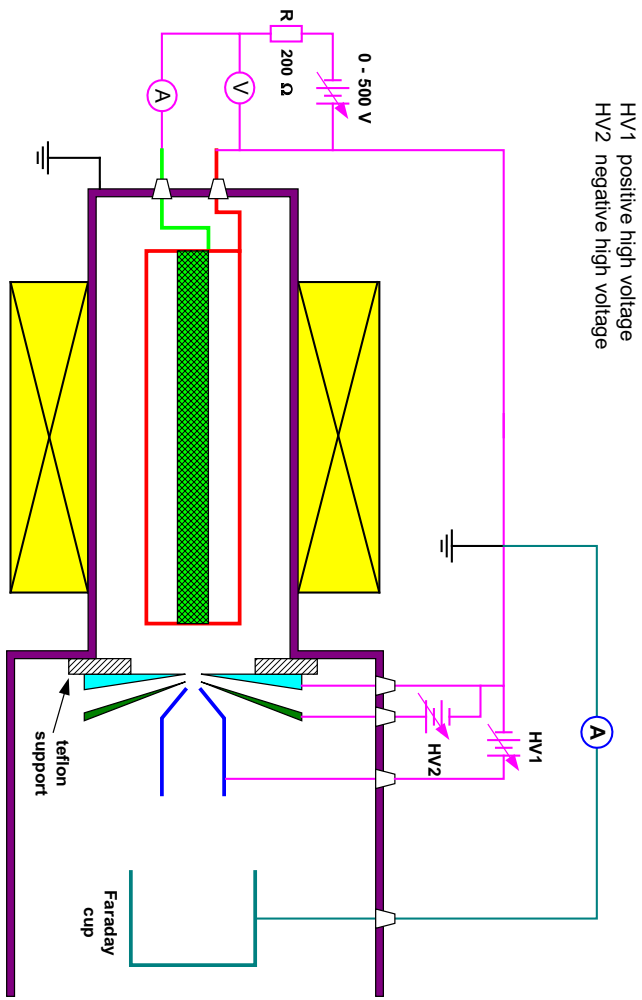
แหล่งกำเนิดไอออนโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ plasma source และ ion optics ส่วนของ plasma source คือส่วนที่ได้ศึกษาในตอนต้นซึ่งหลังจากที่ได้ศึกษาปรากฏการณ์การเกิด plasma discharge จนมีความเข้าใจในระดับที่สามารถควบคุมให้มีเสถียรภาพที่ดีแล้ว จึงมีการศึกษา ระบบ ion optics ซึ่งประกอบด้วยระบบ extraction ซึ่งทำหน้าที่ในการดึงไอออนบวกออกจาก plasma chamber และระบบ focusing ซึ่งทำหน้าที่บีบลำไอออนให้มีขนาดที่ต้องการในขณะชนเป้า

ในขั้นแรกจะศึกษาระบบ extraction เพียงอย่างเดียวก่อน จึงติดตั้งเฉพาะระบบ extraction โดยยังไม่ติดตั้งระบบ focusing นอกจากนั้นยังได้ติดตั้ง Faraday cup เพื่อใช้วัดกระแสไอออนที่เกิดขึ้นอีกด้วย

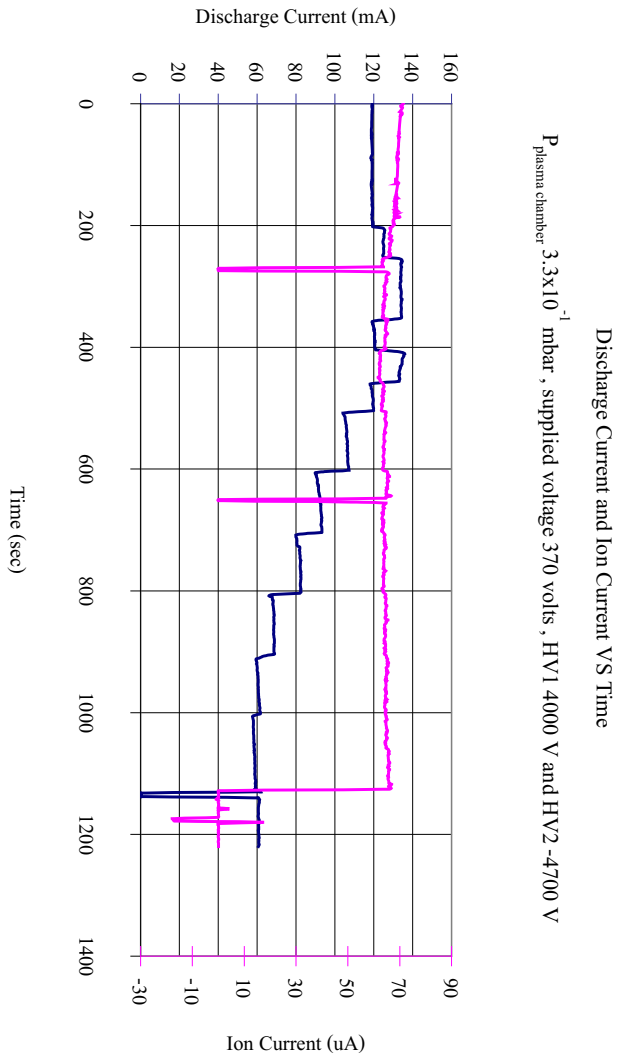
ระบบ extraction ในการทดลองต่อไปนี้ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ได้แก่ plasma electrode, screening electrode และ ground electrode มีลักษณะดังได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อติดตั้งแล้ว ขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ซึ่งมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm จะอยู่ห่างกันแต่ละ 1 mm plasma electrode อยู่ห่างจากปลายของ CMC ประมาณ 40 mm และ ปากของ Faraday cup อยู่ห่างจากปลายนอกสุดของ ground electrode ประมาณ 10 mm จากนั้นจึงเริ่มทำการวัด โดยทดลองจัดรูปร่างแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.1 การทดลองวงจรที่ 1

ต่อวงจรรูปที่ 43 ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 400 V, HV1 = 4000 V, HV2 = -4700 V ขณะทำการทดลอง ความดันภายใน plasma chamber มีค่า 3.3×10^{-1} mbar และ discharge current ขณะเริ่มต้นบันทึกกระแสไอออนมีค่า 120 mA เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 นาที จึงเริ่มปรับสนามแม่เหล็กเพื่อเปลี่ยนค่า discharge current ได้ผลการทดลองดังรูป 44



รูปที่ 43 ระบบ extraction มี 3 ขั้ว ต่อ plasma electrode เป็นกราวด์
screening electrode -4700 V และ ground electrode 4000 V



รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอออน และ discharge current กับเวลา

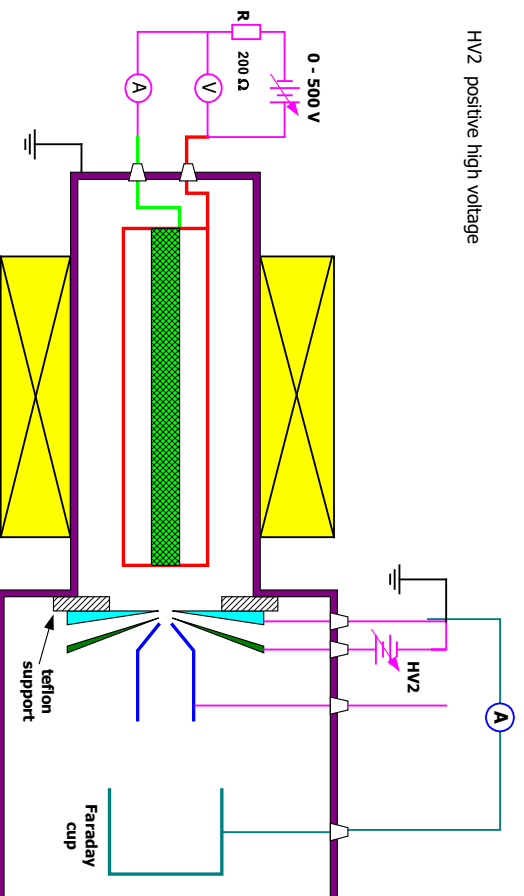
ผลการทดลองพบว่าสามารถวัดกระแสไอออนได้ถึง $70\text{ }\mu\text{A}$ หรือคิดเป็น 2 mA/cm^2 กระแสไอออนตกลงเป็นศูนย์ที่วินาทีที่ 250 และ 650 เนื่องจากเกิดการ trip ของ HV1 และ HV2 เมื่อมีการจ่ายกระแสเกิดขึ้นดังจำกัดของแหล่งจ่ายไฟ การ trip ของแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงบางครั้งจะรุนแรงจนมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าของส่วนอื่นด้วย เช่นการ trip ในช่วงท้ายการทดลอง (ประมาณวินาทีที่ 1150) มีผลทำให้ plasma discharge คับไปด้วย

เมื่อเพิ่มหรือลดค่า discharge current พบว่ากระแสไอออนไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่ากระแสที่วัดได้ไม่เกิดจากการดึงไอออนมาจาก plasma source แต่เกิดเนื่องจาก เกิดการ ionization ของก๊าซระหว่างช่วงไฟฟ้าทั้ง 3 ยังผลให้มีไอออนบวกบางส่วนไปสู่ Faraday cup การเกิด ionization ของก๊าซในระหว่างช่วงไฟฟ้าทั้ง 3 นี้ ทำให้มีกระแสไหลใน HV1 และ HV2 มาก จึงเป็นเหตุให้เกิดการ trip ดังกล่าว บางการทดลองการ trip เกิดขึ้นบ่อยมาก จนทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและไม่สามารถบันทึกผลได้

สรุปว่าการจรวจจรแบบนี้ไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์และถึงแม้ว่าจะทดลองลดค่า HV1 และ HV2 ลงเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด ionization แต่ก็ไม่สามารถ extract ไอออนได้

3.2 การทดลองวงจรที่ 2

ต่อวงจรดังรูปที่ 45 โวลเตจระหว่าง CA และ CMC 400 V ปลั๊อย ground electrode ลอยขณะทำการทดลอง ความดันภายใน plasma chamber มีค่า $1.0 \times 10^{-1}\text{ mbar}$ และ discharge current มีค่าคงที่ 100 mA ปรับค่า HV2 ทุก ๆ 50 วินาที (บันทึกค่ากระแสไอออนและ discharge current ทุก ๆ 2 วินาที) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 46 นำค่ากระแสไอออนสำหรับแต่ละค่าของ HV2 มาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำมาพล็อตกับ HV2 จะได้กราฟดังรูปที่ 47

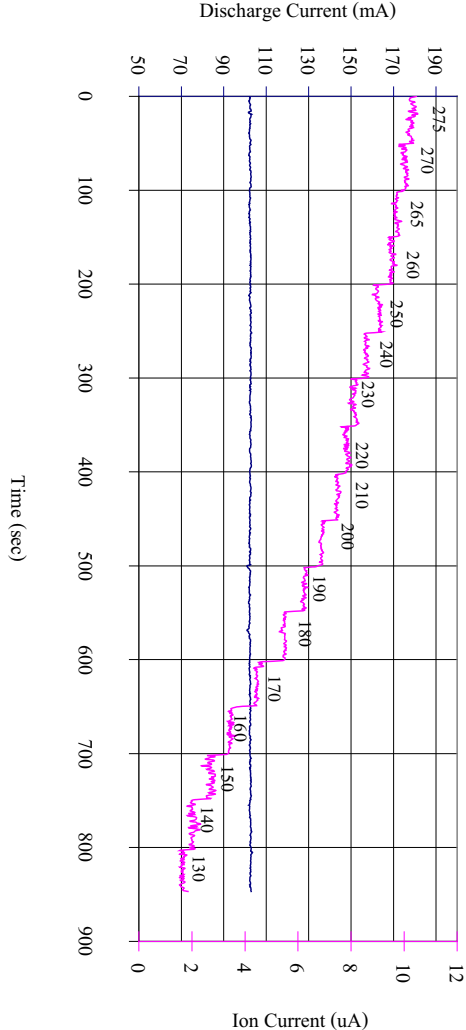


รูปที่ 45 ระบบ extraction มี 3 ขั้ว ต่อ plasma electrode เป็นกราวด์

screening electrode ต่อ HV2 และ ground electrode ปลั๊อยลอย

Discharge Current and Ion Current VS Time

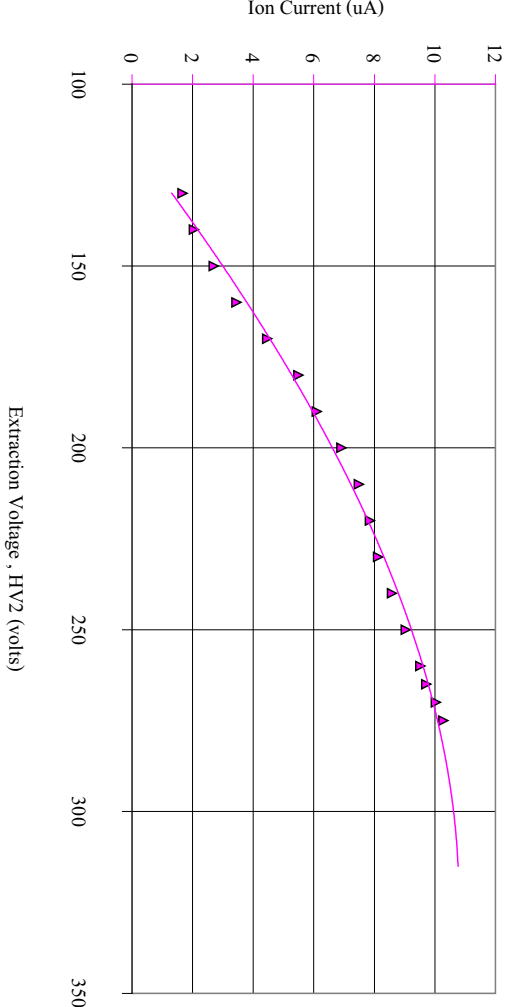
P_{plasma chamber} 1.0x10⁻¹ mbar , supplied voltage 400 V and vary HV2



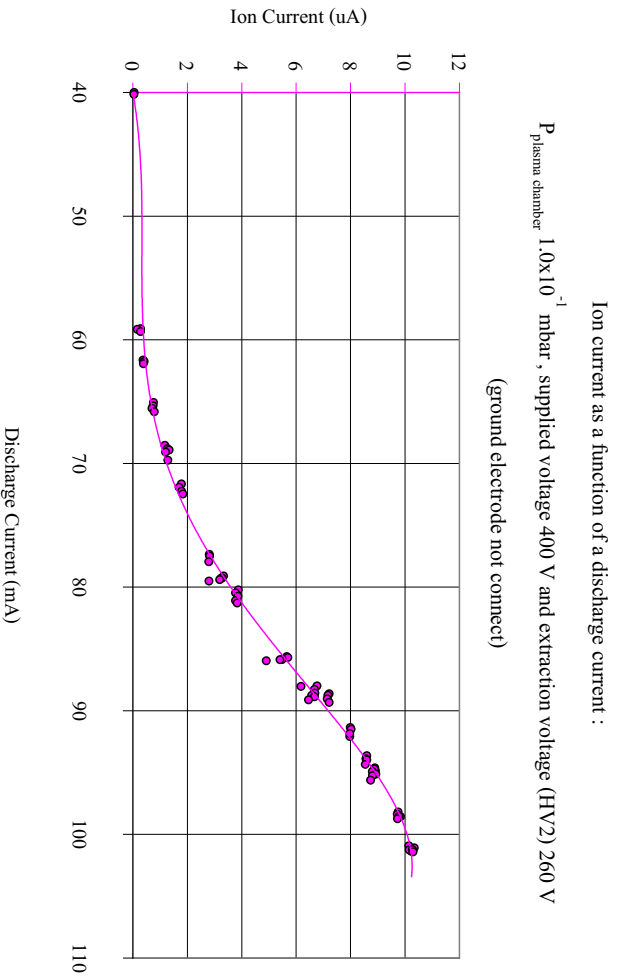
รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและ discharge current กับเวลา
เมื่อปรับค่า HV2

Ion current as a function of extraction voltage (HV2) :

P_{plasma chamber} 1.0x10⁻¹ mbar , discharge current 100 mA and supplied voltage 400 V



รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน และ extraction voltage



รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและ discharge current

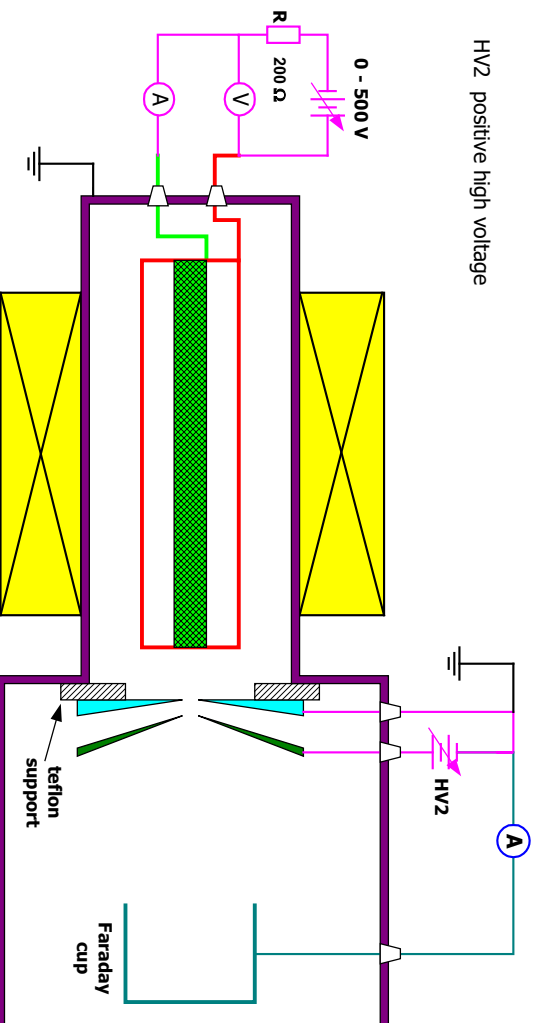
ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ discharge current โดยตั้ง HV2 เป็น 260 V เปลี่ยนค่า discharge current โดยการปรับสนามแม่เหล็ก บันทึกค่ากระแสไอออน และ discharge current ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 48

จากผลการทดลองในรูปที่ 47 พบว่ากระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตาม extraction voltage แต่ในช่วงที่ extraction voltage มีค่าสูง กระแสไอออนมีแนวโน้มที่จะไม่เพิ่มขึ้นอีก (saturate) ทั้งนี้เนื่องจาก discharge current มีค่าคงที่ ในขณะที่ไอออนถูกดึงออกสูงสุดแล้วเมื่อเพิ่ม extraction voltage ขึ้นอีกก็ไม่สามารถเพิ่มกระแสไอออนได้ (การทดลองนี้ได้พยายามเพิ่ม extraction voltage ขึ้นอีกแต่เกิดการ trip ของ HV จึงไม่สามารถเก็บข้อมูลได้)

เมื่อให้ extraction voltage มีค่าคงที่ ดังผลการทดลองในรูปที่ 48 พบว่ากระแสไอออนเพิ่มขึ้นตาม discharge current แต่เมื่อ discharge current เพิ่มขึ้นระดับหนึ่งแล้ว กระแสไอออนมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก ถึงแม้ discharge current จะมีค่าสูงขึ้น แต่อัตราการดึงไอออนออกมีค่าจำกัดเนื่องจาก HV2 มีค่าคงที่ จึงไม่มีกระแสไอออนเพิ่มขึ้นถึงแม้จะเพิ่ม discharge current ไอออนส่วนเกินก็จะสูญเสียไปจากการ recombination ในทำนองกลับกัน สำหรับการทดลองนี้ ในช่วงที่ discharge current ต่ำกว่า 40 mA ก็ไม่สามารถ extract ไอออนได้ เนื่องจากมีไอออนบวกในพลาสมาน้อยเกินไปที่ระบบนี้จะ extract ได้ ประกอบกับระบบนี้ยังไม่สมบูรณ์นัก และปัญหาของแหล่งจ่ายไฟสูงที่ไม่ค่อยมีเสถียรภาพ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการ extract ค่อนข้างต่ำ

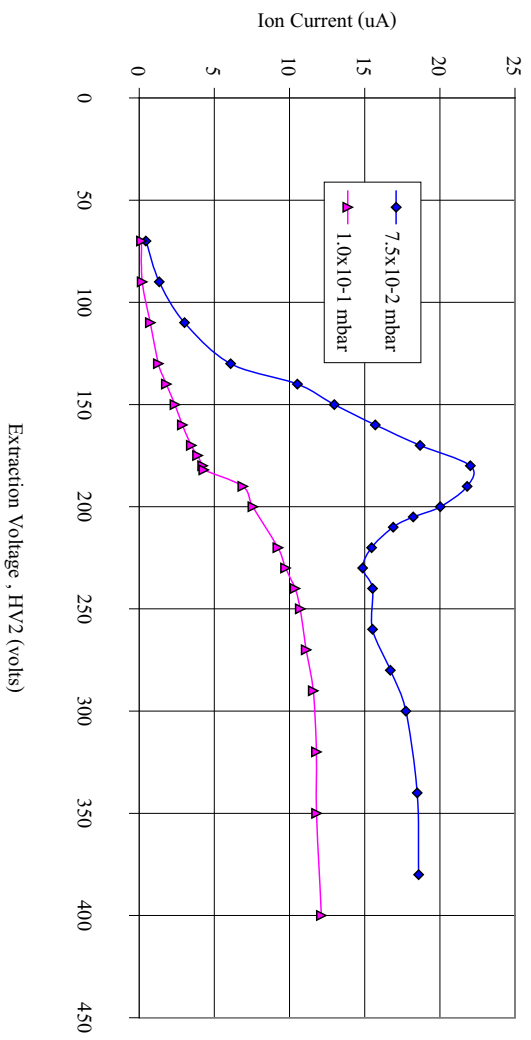
3.3 การทดลองวงจรที่ 3

เนื่องจากการทดลองก่อนหน้านี้ปล่อย ground electrode ลอยไว้ แต่ระบบยังสามารรถ extract ไอออนได้ จึงได้ทำการทดลองโดยลวด ground electrode ออก แล้วเพิ่มระยะห่างระหว่าง plasma electrode กับ screening electrode อีก 0.5 mm ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขณะนี้จึงห่างกัน 1.5 mm และ screening electrode ห่างจาก Faraday cup 33.5 mm ตั้งวงจรในรูปที่ 49 ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 400 V ทำการทดลองโดยให้ discharge current มีค่าคงที่ 100 mA สำหรับความดันภายใน plasma chamber 1.0×10^{-1} mbar และ 7.5×10^{-2} mbar ป้อนค่า HV2 และบันทึกกระแสไอออน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 50 จากนั้นทำการทดลองโดยให้ความดันภายใน plasma chamber มีค่าคงที่ 1.0×10^{-1} mbar และ discharge current มีค่า 100 mA และ 120 mA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 51



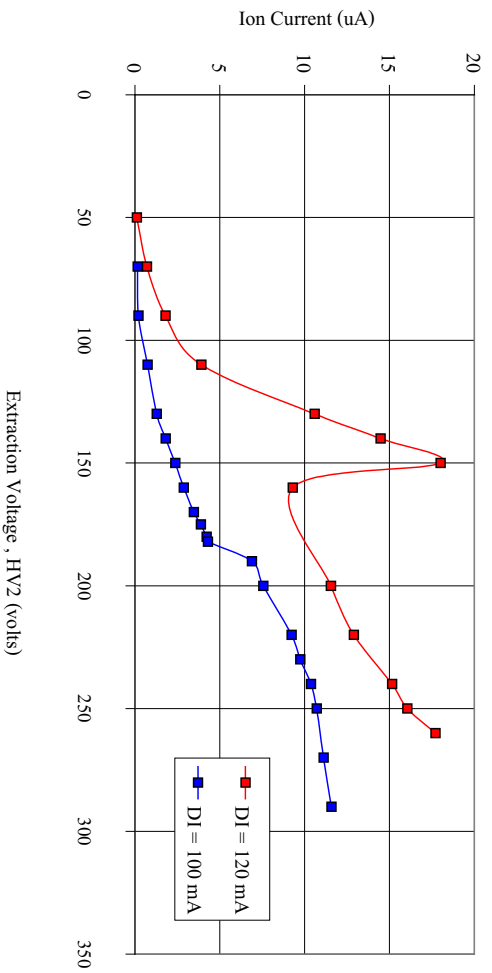
รูปที่ 49 ระบบ extraction มี 2 ขั้ว ห่างกัน 1.5 mm

Ion current as a function of extraction voltage (HV2) :
discharge current 100 mA and supplied voltage 400 V



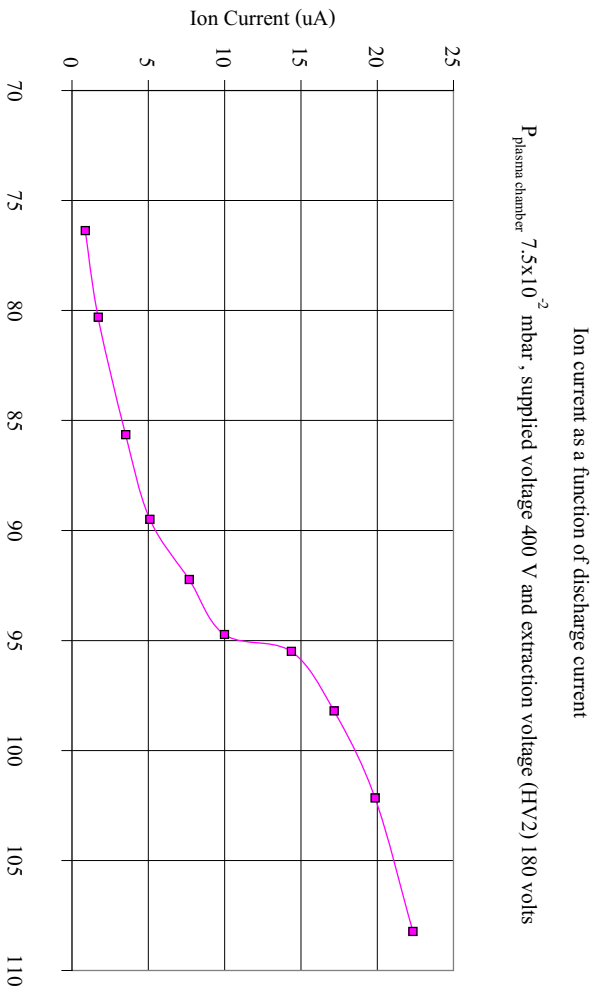
รูปที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน และ extraction voltage
เมื่อ discharge current คงที่ 100 mA

Ion current as a function of extraction voltage (HV2) :
 $P_{\text{plasma chamber}} 1.0 \times 10^{-1}$ mbar and supplied voltage 400 V



รูปที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน และ extraction voltage
เมื่อ ความดันคงที่ 1.0×10^{-1} mbar

ปรับความดันภายใน plasma chamber คงที่ 7.5×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 400 V, HV2 180 V บันทึกกระแสไอออน เมื่อมีการเปลี่ยนค่า discharge current โดยการปรับค่าสไลด์แม่เหล็ก ใ้ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 52



รูปที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและ discharge current

จากผลการทดลองในรูปที่ 50 พบว่าเมื่อให้ความดันภายใน plasma chamber ต่างกันแต่ discharge current มีค่าเท่ากันคือ 100 mA ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสไอออนกับ extraction voltage จะมีลักษณะต่างกันด้วย กล่าวคือที่ความดันสูง (1.0×10^{-1} mbar) กระแสไอออนจะเพิ่มขึ้นตาม extraction voltage แล้วจะเข้าสู่ค่าอิ่มตัว (saturate) เมื่อ extraction voltage มีค่าสูง ในขณะที่ ที่ความดันต่ำกว่า (7.5×10^{-2} mbar) กระแสไอออนจะเพิ่มขึ้นตาม extraction voltage จนถึงค่าสูงสุด เมื่อเพิ่ม extraction voltage ต่อไปกระแสไอออนจะมีค่าลดลงและกลับเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยก่อนที่จะเข้าสู่ค่าอิ่มตัว และเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความดันต่ำกว่าจะได้กระแสไอออนสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการที่ความดันสูง mean free path จะสั้นกว่าโอกาสในการชนกันของไอออนจึงสูง ความต้านทานที่มีต่อกระแสไอออนจึงมีมากทำให้มีกระแสไอออนน้อย

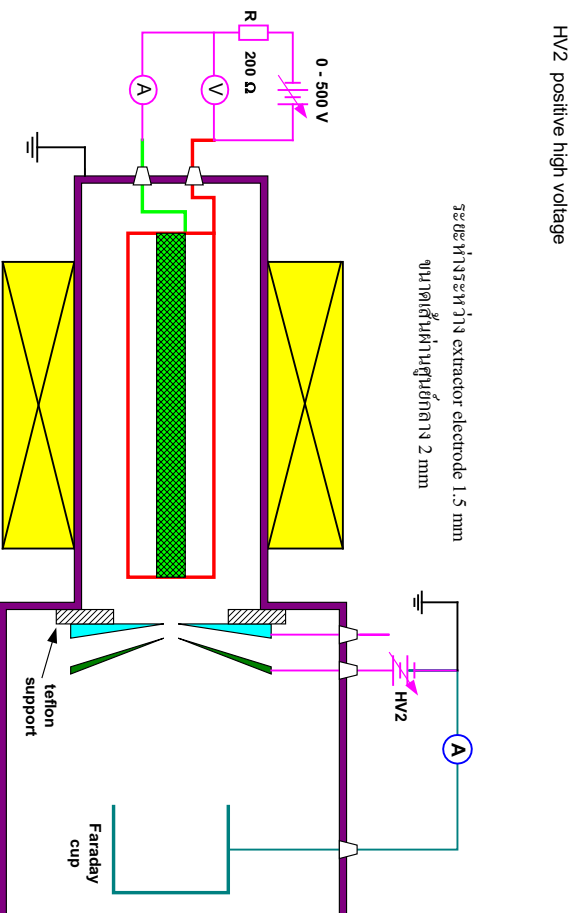
ผลการทดลองในรูปที่ 51 ยังแสดงให้เห็นว่า ถ้าความดันภายใน plasma chamber เท่ากันแต่ discharge current ต่างกัน พบว่าเมื่อ discharge current มีค่าสูงกว่าจะได้กระแสไอออนสูงกว่าด้วย นอกจากนี้ จากผลการทดลองในรูปที่ 52 ได้แสดงให้เห็นว่า ถ้าให้ extraction voltage มีค่าคงที่ค่าหนึ่งแล้ว กระแสไอออนจะเพิ่มขึ้นตาม discharge current โดยในกรณีที่ discharge current ต่ำ ๆ

กระแสไอออนจะเพิ่มขึ้นก่อนข้างจะเป็นเชิงเส้น จากนั้นจะมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นก่อนที่จะมีแนวโน้มการเพิ่มลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้มีลักษณะเดียวกับผลการทดลองในรูปที่ 48 และสามารถอธิบายปรากฏการณ์ด้วยเหตุผลเดียวกัน

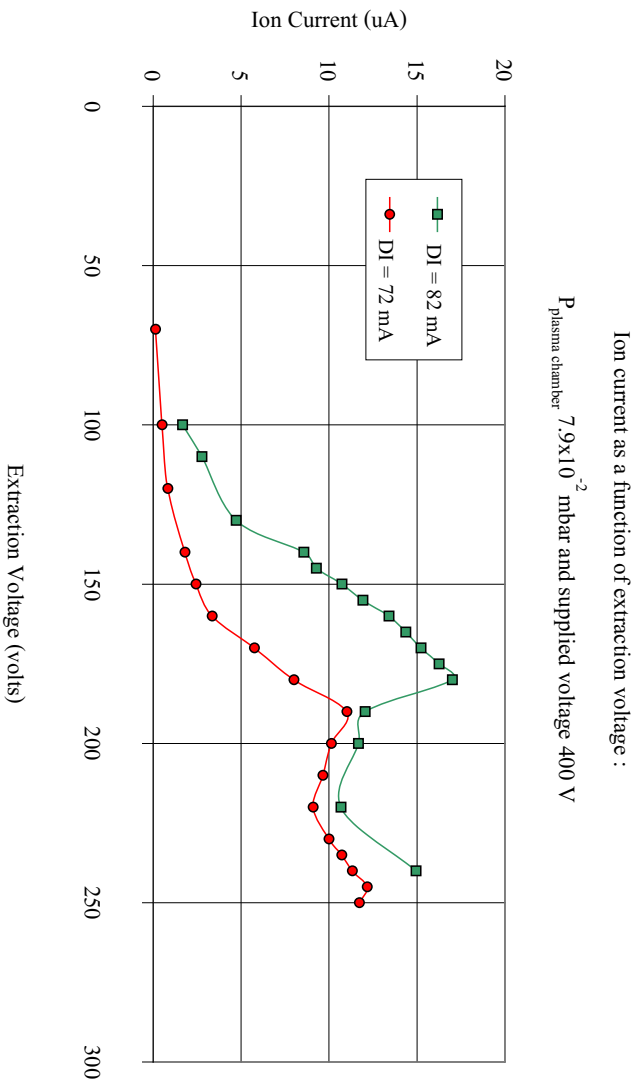
จุดที่น่าสนใจอย่างหนึ่งสำหรับการทดลองในรูปที่ 52 คือ ที่ extraction voltage มีค่าคงที่ 180 V จะมี discharge current ค่าหนึ่งคือที่ประมาณ 95 mA ที่ทำให้มีการเพิ่มของกระแสไอออนสูงเมื่อเทียบผลการทดลองนี้กับผลการทดลองในรูปที่ 50 สำหรับการทดลองที่ความดัน 7.5×10^{-2} mbar และ discharge current 100 mA กระแสไอออนมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ extraction voltage 180 V เช่นกัน เมื่อ extraction voltage สูงหรือต่ำกว่านี้จะได้กระแสไอออนน้อยลง แต่ผลการทดลองที่ความดัน 1.0×10^{-1} mbar และ discharge current 120 mA ในผลการทดลองรูปที่ 51 กระแสไอออนมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ extraction voltage 150 V ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า extraction voltage ที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้กระแสไอออนสูงสุดนั้น นอกจากขึ้นกับ discharge current แล้วยังขึ้นกับความดันภายใน plasma chamber ด้วย

3.4 การทดลองวงจรที่ 4

ใช้ระบบ extraction ที่มี extraction electrode เพียง 2 ตัว เหมือนวงจรที่แก้แล้ว แต่ปล่อย plasma electrode ปล่อยไว้ ดังวงจรในรูปที่ 53 ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 375 V ทำการทดลองโดยให้ความดันภายใน plasma chamber มีค่าคงที่ 7.9×10^{-2} mbar ปรับ discharge current ที่ค่า 82 mA และ 72 mA และทำการทดลองโดยเปลี่ยนความดันภายใน plasma chamber เป็น 1.1×10^{-1} mbar และ discharge current มีค่า 100 mA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 54



รูปที่ 53 ระบบ extraction มี 2 ขั้ว แต่ปล่อย plasma electrode ปล่อย

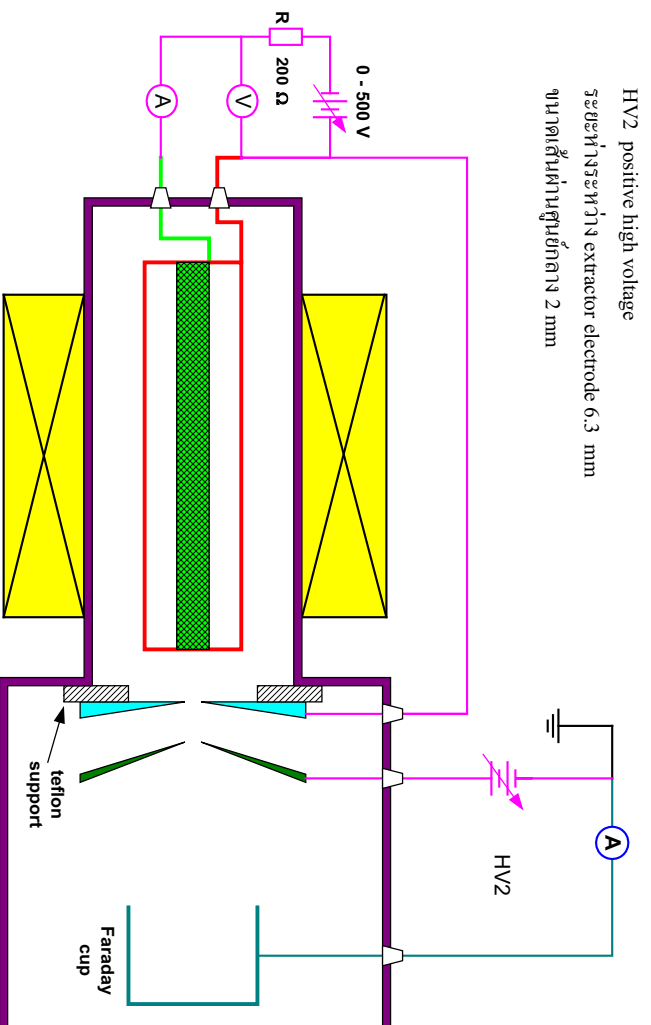


รูปที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน และ extraction voltage

ผลการทดลองพบว่า กระแสไอออนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตาม extraction voltage คล้ายผลการทดลองของวงจรที่ 3 และยังคงให้เห็นด้วยว่าที่ discharge current ที่สูงกว่าจะได้อะไรที่ต่ำกว่า กระแสไอออนสูงกว่า สรุปว่า วงจรที่ต่อ plasma electrode ลงกราวด์หรือปล่อยลอยได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

3.5 การทดลองวงจรที่ 5

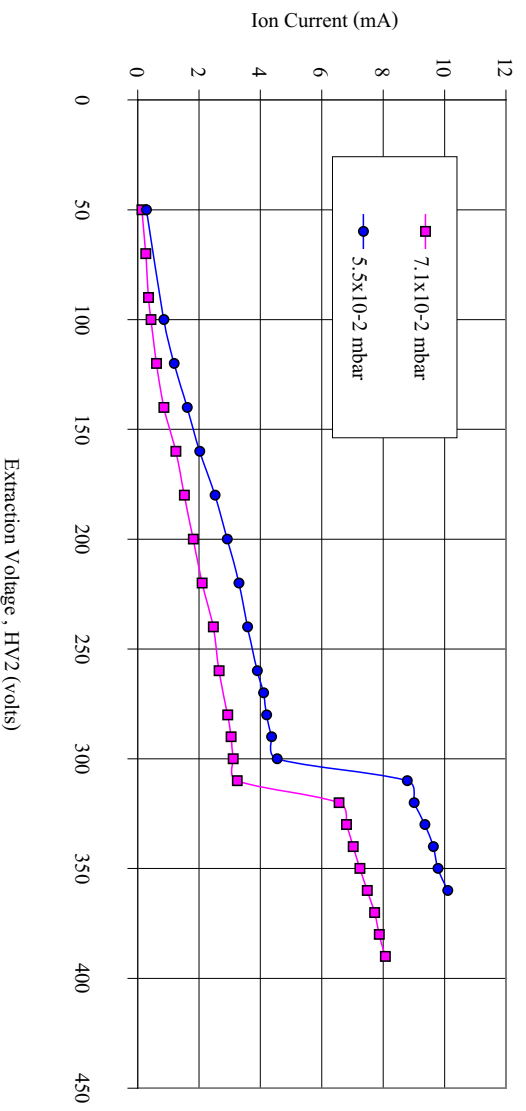
ใช้ระบบ extraction ที่มี extraction electrode เพียง 2 ตัว เหมือนวงจรที่แล้ว แต่ทดลองเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 มากขึ้นเป็น 6.3 mm โดยขณะนี้ screening electrode ห่างจาก Faraday cup 26.5 mm แล้วต่อ plasma electrode เข้ากับขั้วไฟฟ้า CA ดังวงจรในรูปที่ 55 ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 375 V ทำการทดลองโดยให้ discharge current มีค่าคงที่ 60 mA สำหรับความดันภายใน plasma chamber 5.5×10^{-2} mbar และ 7.1×10^{-2} mbar ปรับค่า HV2 และบันทึกกระแสไอออน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 56 จากนั้นทำการทดลองโดยให้ความดันภายใน plasma chamber มีค่าคงที่ 7.6×10^{-2} mbar และ บันทึกกระแสไอออนเมื่อ discharge current มีค่า 90 mA, 58 mA และ 46 mA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 57



รูปที่ 55 ระบบ extraction มี 2 ขั้ว ห่างกัน 6.3 mm

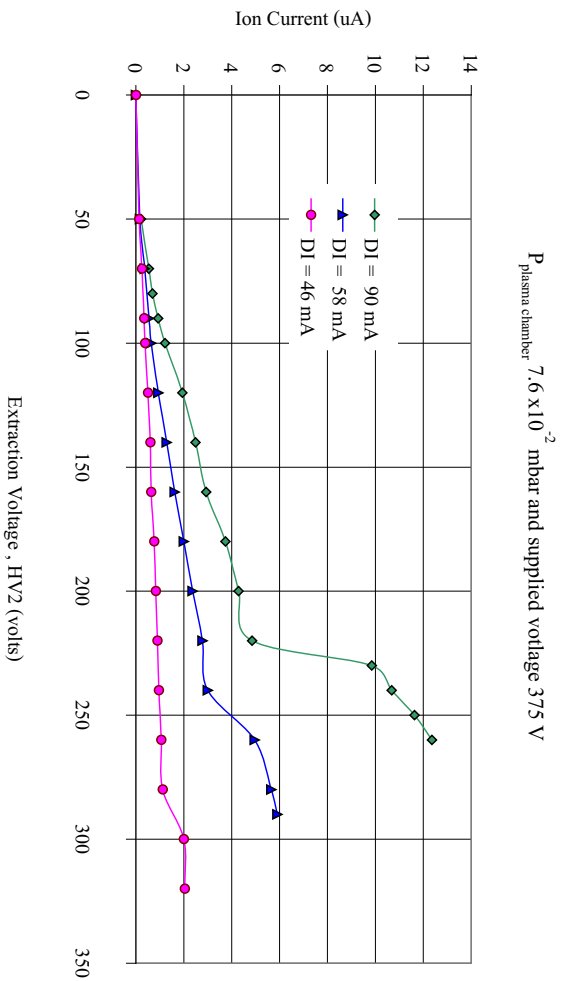
Ion current as a function of extraction voltage (HV2) :

discharge current 60 mA and supplied voltage 375 V



รูปที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน และ extraction voltage
เมื่อ discharge current คงที่ 60 mA

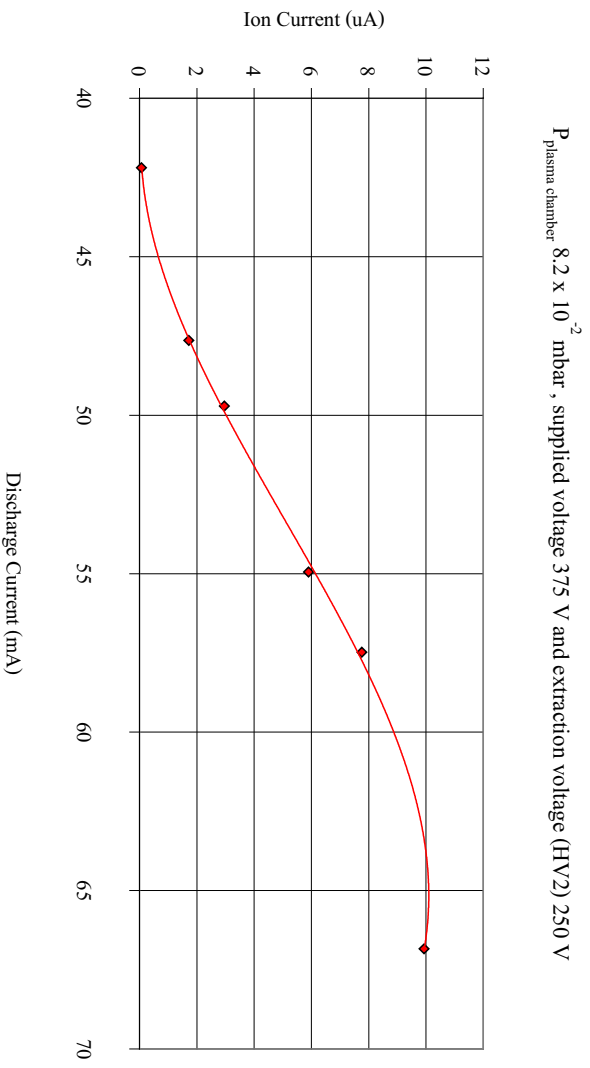
Ion current as a function of extraction voltage (HV2) :



รูปที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน และ extraction voltage
เมื่อ ความดันคงที่ 7.6×10^{-2} mbar

ปรับความดันภายใน plasma chamber คงที่ 8.2×10^{-2} mbar ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 375 V, HV2 250 V บันทึกกระแสไอออน เมื่อมีการเปลี่ยนค่า discharge current โดยการปรับค่าสนามแม่เหล็ก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 58

Ion current as a function of discharge current :



รูปที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและ discharge current

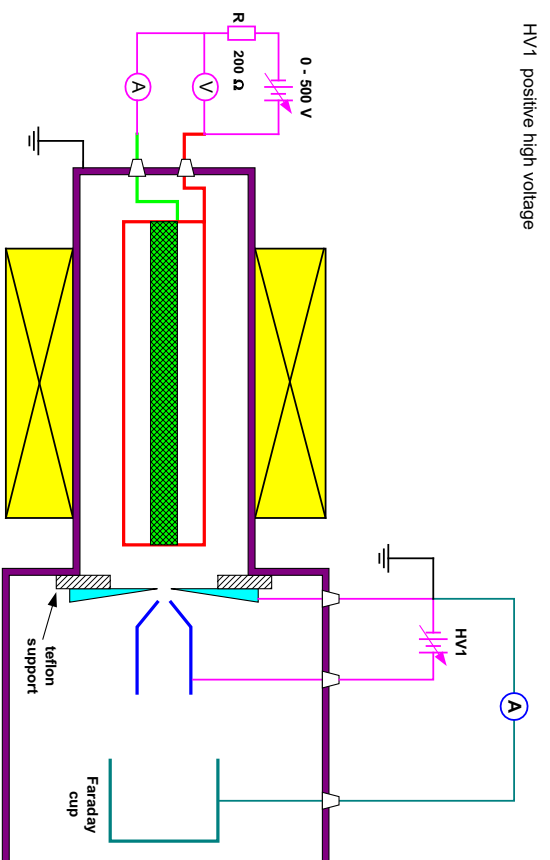
จากผลการทดลองพบว่า ยังคงให้ผลสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้านี้คือ ถ้า discharge current เท่ากัน ที่ความดันภายใน plasma chamber สูงกว่า จะได้กระแสไอออนสูงกว่า และถ้าความดันภายใน plasma chamber เท่ากัน discharge current ที่สูงกว่าจะได้กระแสไอออนสูงกว่า

ลักษณะพิเศษที่พบคือ การเพิ่มของกระแสไอออนตาม extraction voltage จะมีลักษณะการเพิ่มเป็นขั้น (step) ซึ่งเกิดขึ้นที่โวลเตจต่ำกว่า discharge voltage เล็กน้อย (discharge voltage จะมีค่าต่ำลงเมื่อ discharge current เพิ่มขึ้น)

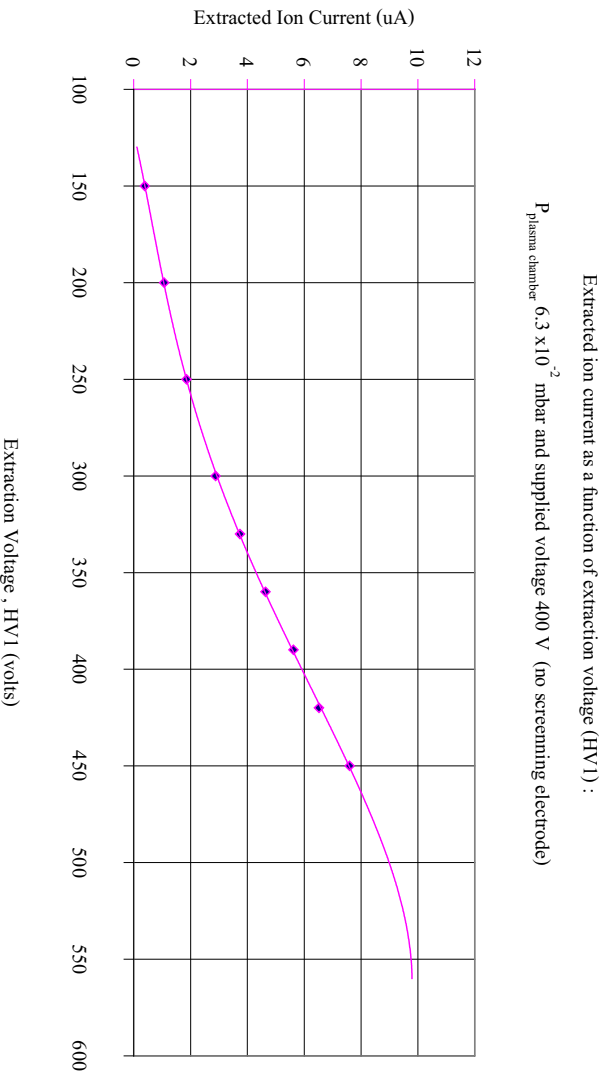
การเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทำให้สามารถเพิ่ม HV2 ได้มากขึ้นโดยไม่เกิดการ trip โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ discharge current มีค่าต่ำ เช่น 46 mA ในรูปที่ 57 เมื่อกระแสไอออนมีตัวสามารถเพิ่มค่า extraction voltage ได้ถึง 3000 V (ไม่ได้แสดงในรูป) ส่วนในกรณีที่ discharge current มีค่าสูง กระแสไอออนยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกแต่ไม่สามารถทำการทดลองเพิ่ม extraction voltage ได้เนื่องจากเกิดการ trip ของแหล่งจ่ายไฟแรงสูงเช่นเคย และเมื่อให้ extraction voltage คงที่พบว่ามีการอิ่มตัวของกระแสไอออนเมื่อ discharge current เพิ่มขึ้นเช่นกัน

3.6 การทดลองวงจรที่ 6

ใช้ระบบ extraction ที่มี extraction electrode เพียง 2 ตัว เช่นกัน แต่เป็น plasma กับ screening electrode แทนที่จะเป็น plasma กับ ground electrode อย่างวงจรก่อนหน้านี้ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 เป็น 2.5 mm และ ground electrode ห่างจาก Faraday cup ประมาณ 10 mm แล้วต่อ plasma electrode ลงกราวด์ ดังวงจรในรูปที่ 59 ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 400 V ที่ความดันภายใน plasma chamber 6.3×10^{-2} mbar มี discharge current 80 mA ปรับค่า HV1 และบันทึกกระแสไอออน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 60



รูปที่ 59 ระบบ extraction มี 2 ขั้ว plasma และ ground electrode



รูปที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน และ extraction voltage

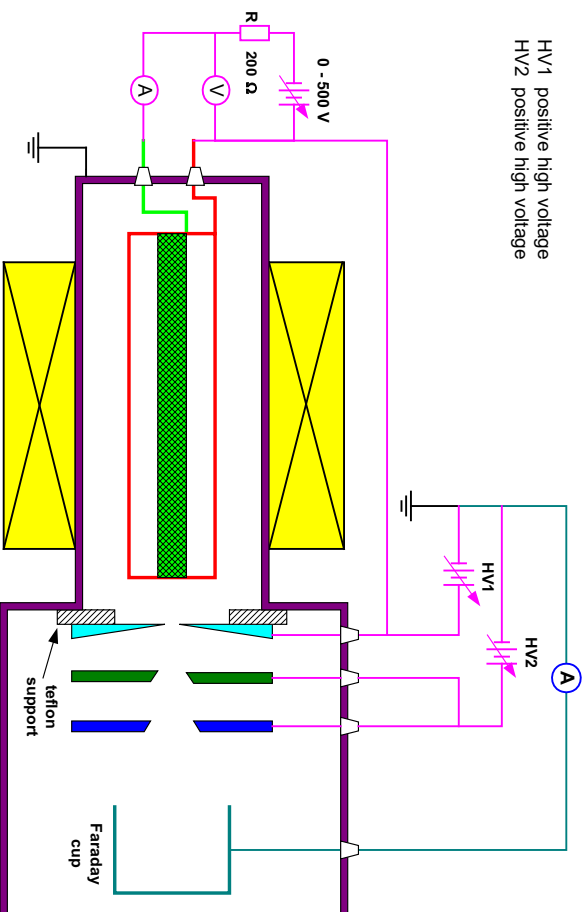
ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถใช้งานได้ แต่ต้องใช้ extraction voltage ค่อนข้างสูงโดยได้กระแสไม่สูงนัก และเกิดการ trip แต่โดยการทำงานรวมแล้ว โน้มจากข้อมูลที่มีพบว่า กระแสไอออนจะอิ่มตัวที่ค่าประมาณ 10 mA โดยที่ใช้ extraction voltage ประมาณ 500 V

3.7 การทดลองวงจรที่ 7

การทดลองต่อไปนี้มีกรเปลี่ยนแปลงวงจรไฟฟ้าของระบบ extraction โดยกลับมาใช้ extraction electrode 3 ตัว อย่างวงจรที่ 1 และ 2 แต่เปลี่ยนลักษณะของ screening electrode และ ground electrode ให้เป็นเพียงแผ่นแบน มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 6 mm ตามลำดับ ส่วน plasma electrode ยังคงใช้แบบเดิม เมื่อติดตั้งแล้ว screening electrode จะอยู่ห่าง plasma electrode 6 mm และ ground electrode อยู่ห่างจาก screening electrode 5.5 mm ห่างจาก Faraday cup 28 mm ต่อวงจรไฟฟ้าทั้ง 3 กับ HV1 และ HV2 ดังวงจรในรูปที่ 61

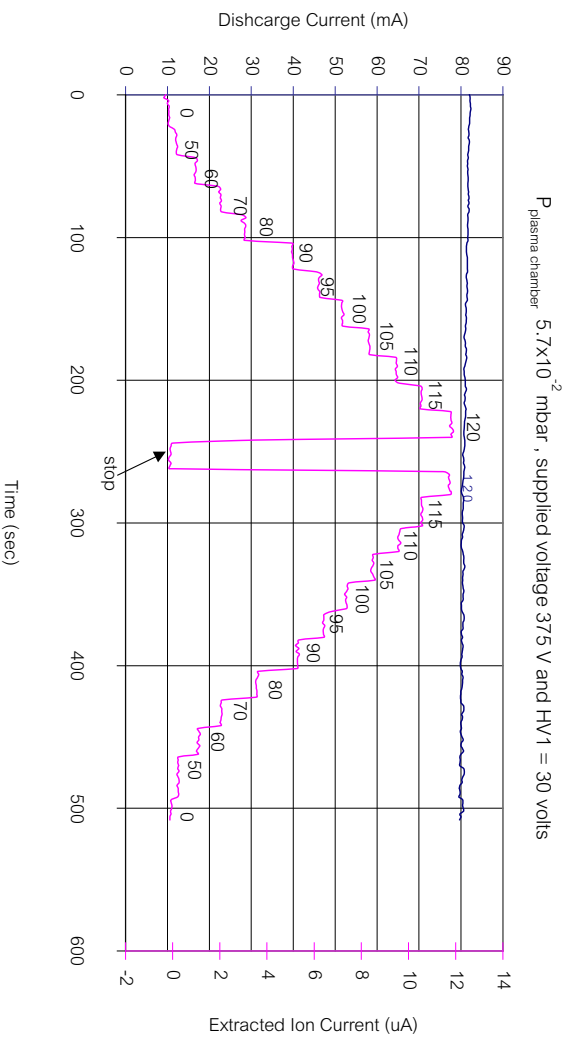
ป้อนโวลเตจระหว่าง CA และ CMC 375 V ที่ความดันภายใน plasma chamber 5.8×10^{-2} mbar ในขณะเกิด discharge current ตั้งค่า HV2 เป็น 0 V ปรับค่า HV1 จนได้กระแสไอออนใกล้เคียง 0 μ A จากการทดลอง พบว่า HV1 มีค่า +30 V (ถ้าให้ HV1 เป็น 0 V กระแสไอออนจะติดลบเล็กน้อย) ทดลองปรับค่า HV2 ทุก ๆ 20 วินาที เพิ่มขึ้นและลดลงจาก 0 V ถึง 120 V แล้วบันทึกกระแสไอออนสำหรับ เมื่อ discharge current มีค่า 80 mA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 62 จากนั้นทำ

การทดลอง เมื่อ discharge current มีค่าต่าง ๆ จะวัดความสัมพันธ์ของกระแสไอออนกับ HV2 ดังแสดงในรูปที่ 63



รูปที่ 61 ระบบ extraction ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบใหม่

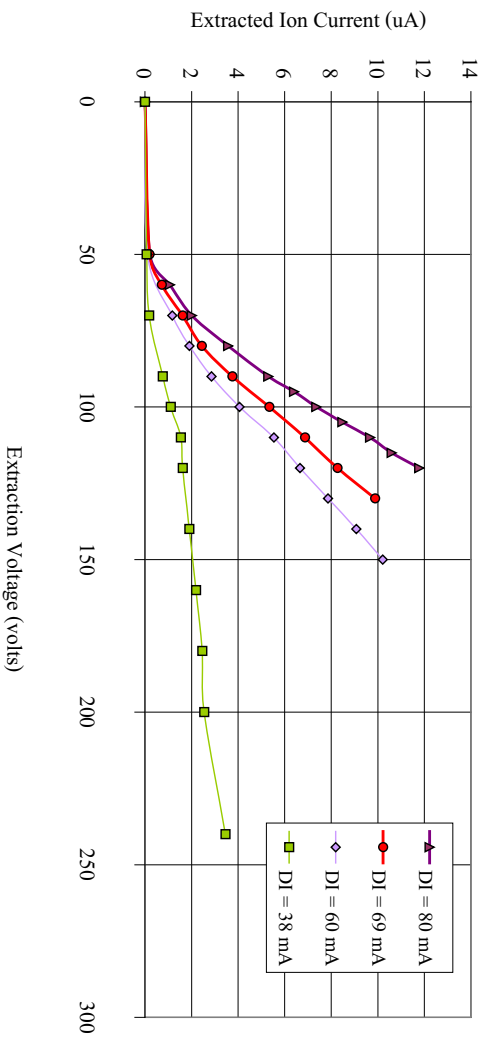
Extracted ion current as a function of extraction voltage (HV2):



รูปที่ 62 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไอออนเมื่อเพิ่มและลด HV2

Extracted ion current as a function of extraction voltage (HV2) :

P_{plasma chamber} 5.8×10^{-2} mbar , supplied voltage 375 V and HV1 = 30 V



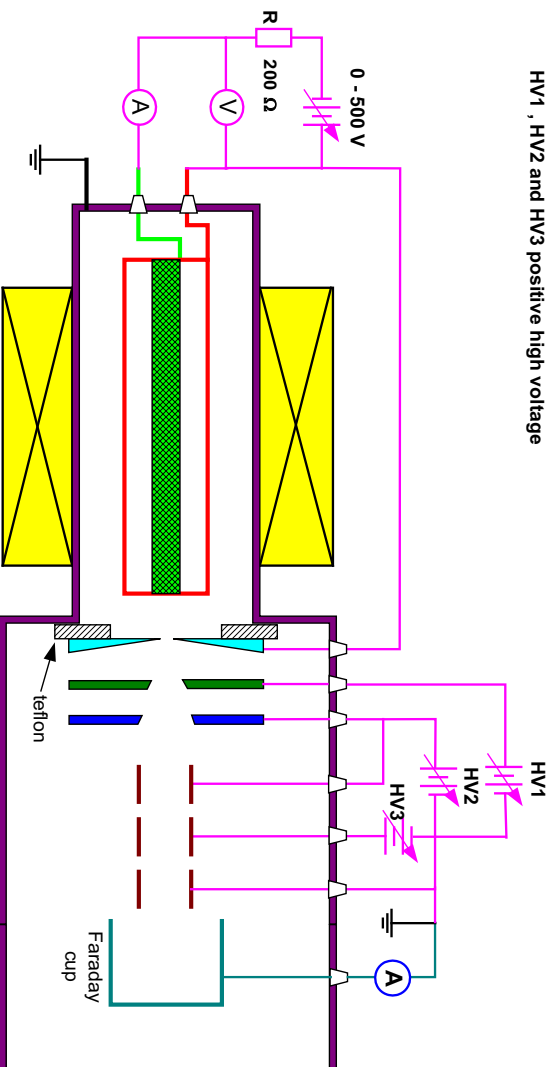
รูปที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน และ extraction voltage

ผลการทดลองในรูปที่ 62 แสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพดีไม่เกิดการ trip ขึ้นระหว่าง การวัด สามารถวัดกระแสไอออนได้เท่ากันตลอดทั้งขณะเพิ่มและลด extraction voltage และจากผล การทดลองในรูปที่ 63 พบว่าที่ discharge current ต่ำกระแสไอออนจะมีค่าน้อยและอิมิตัว เมื่อ กระแสอิมิตัวสามารถเพิ่มค่า extraction voltage ได้ถึง 1500 V (ไม่ได้แสดงในรูป) ในขณะที่ discharge current สูง กระแสไอออนจะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับ extraction voltage แต่ด้วยประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟที่มีทำให้ไม่สามารถเพิ่ม extraction voltage ให้สูงกว่านี้ได้ ทำให้ขาดข้อมูล บางส่วนไป

4. การศึกษาระบบไฟฟ้าสถัไฟฟ้าไอออน

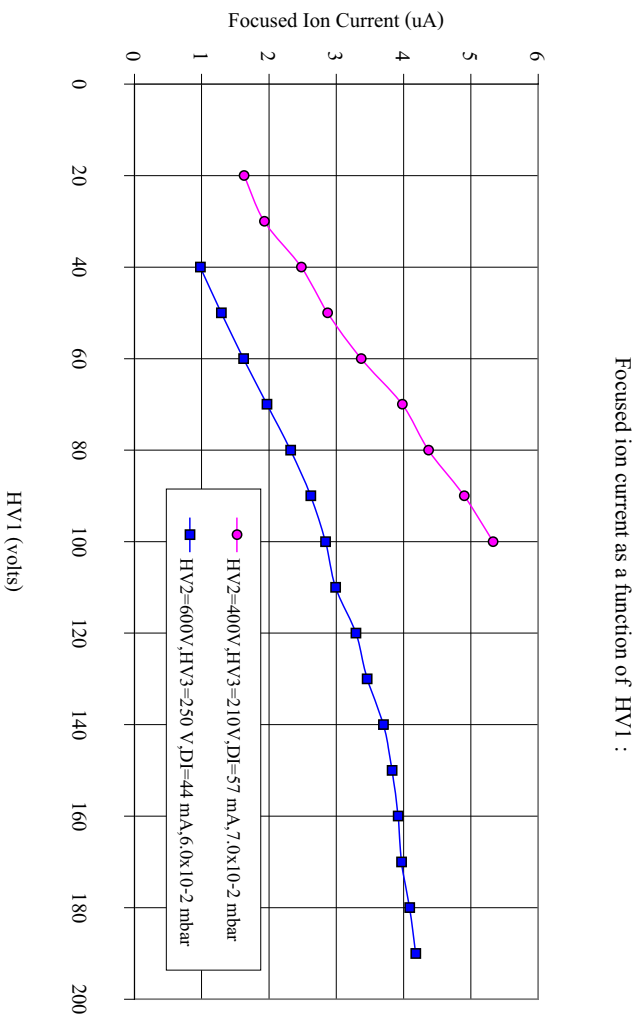
การทดลองสุดท้ายที่สามารถทำได้ในขณะนี้คือการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาระบบไฟฟ้าสถัไฟฟ้าไอออน โดยทำการทดลองต่อไปนี้จะทำการทดลองโดยใช้ระบบ extraction แบบที่ใช้ในการทดลองวงจรที่ 7 ถึงแม้ระบบนี้จะ extract ไอออนได้สูงสุ่มมากกว่า 10 μA เล็กน้อย ในขณะที่ใช้ระบบ extraction แบบที่ใช้ในการทดลองวงจรที่ 3 ซึ่ง extract ไอออนได้สูงสุ่มมากกว่า 20 μA แต่เป็นระบบที่เหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงที่ใช้อยู่ เนื่องจากในขณะทำการทดลองไม่มีการ trip บ่อยนัก และการ trip ที่เกิดขึ้นในบางครั้งก็ไม่น่ารุนแรงจนทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ สามารถทำการทดลองได้อย่างต่อเนื่อง

ระบบไฟฟ้าสถัไฟฟ้าไอออนที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้นนี้เป็น electrostatic lens ประกอบด้วยเส้นลวดทรงกระบอก 3 ชั้นวางเรียงกัน ซึ่งมีโครงสร้างดังเดิกล่าไว้แล้วในตอนต้น เมื่อประกอบชุดเส้นลวดเข้ากับระบบ extraction แล้วเส้นลวดจะอยู่ห่างจาก ground electrode 13 mm และอยู่ห่างจากปากของ Faraday cup 4.7 mm ดังวงจรรูปที่ 64

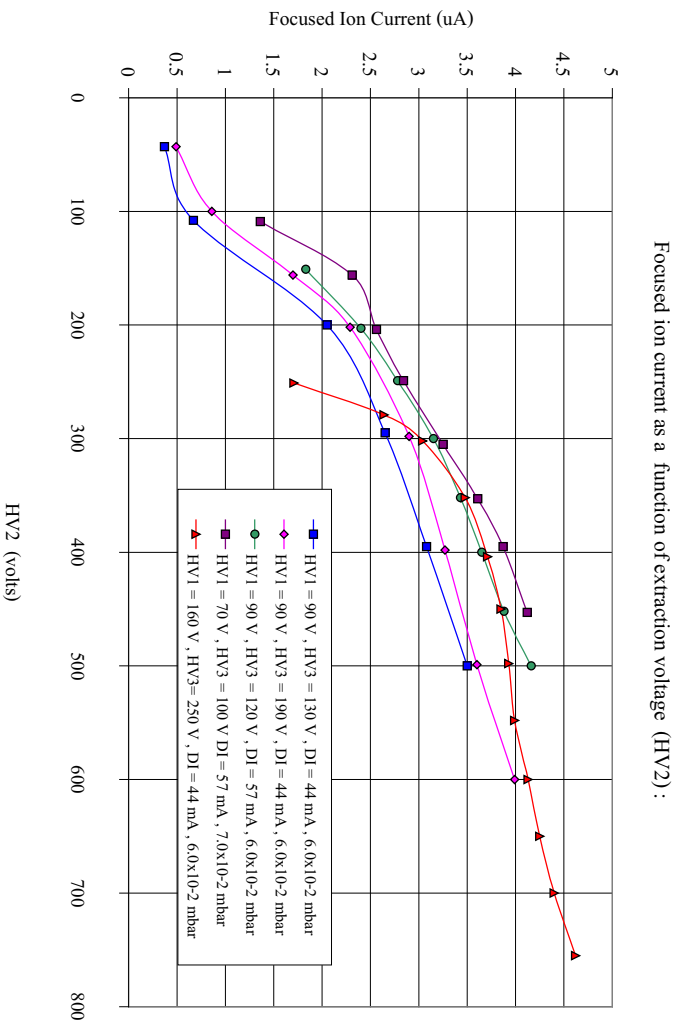


รูปที่ 64 วงจรที่ใช้เพื่อศึกษาระบบไฟฟ้าสถัไฟฟ้าไอออน

ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและ extraction voltage ที่ได้อ่าน
 ไปด้วย ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 65-67

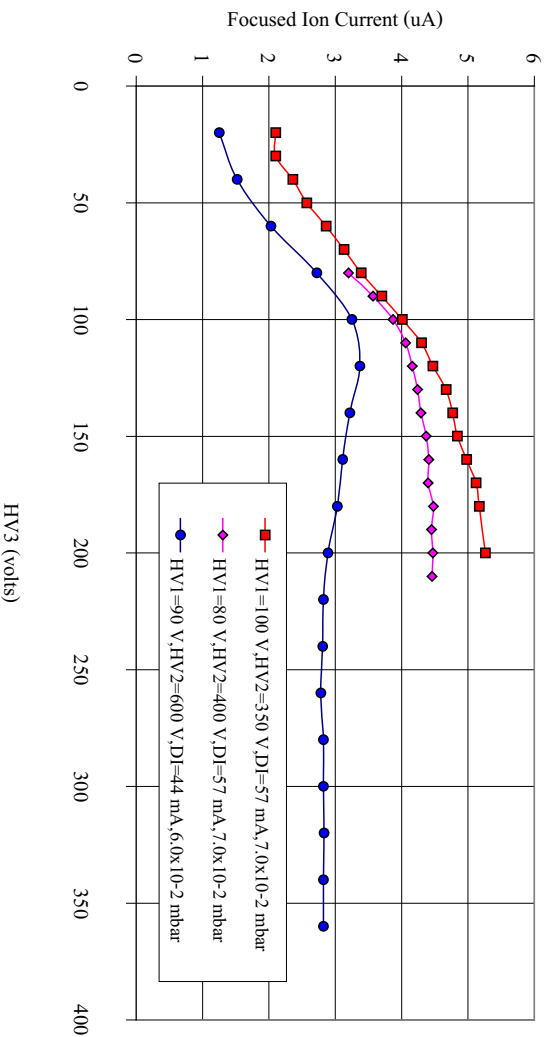


รูปที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ HV1



รูปที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ HV2

Focused ion current as a function of HV3 :



รูปที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ HV3

ผลการทดลองพบว่า เมื่อต่อวงจรแบบการทดลองวงจรที่ 7 โดยใส่ระบบเลนส์ไว้ แต่ปล่อยเส้นล้อยาวไว้โดยไม่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟหรือต่อเส้นลั้ทุกตัวเป็นกราวด์ จะไม่สามารถวัดกระแสไอออนได้ เมื่อทดลองต่อระบบเส้นลั้เป็น einzel lens คือให้โวลเตจที่เส้นลั้ตัวนอกมีค่าเท่ากัน ทั้งในโหนดเริ่มและโหนดหนึ่ง ก็ไม่สามารถวัดกระแสไอออนได้ แต่เมื่อจัดวงจรดังรูปที่ 64 โดยมีหลักการว่าจะให้เส้นลั้ตัวที่อยู่ติดกับระบบ extraction มีโวลเตจเท่ากับขั้วไฟฟ้าของระบบ extraction ตัวที่อยู่ติดกัน และตัวที่อยู่ติดกับ Faraday cup จะมีโวลเตจเท่ากันด้วยคือกราวด์ ก็สามารถใช้งานได้

การทดลองนี้ไม่สามารถสรุปผลได้มากนักเนื่องจากมีตัวแปรที่ต้องควบคุมจำนวนมาก ใต้แก่ discharge current ความดันและโวลเตจจากแหล่งจ่ายไฟแรงสูงอีก 3 ตัว รวมเป็น 5 ตัวแปร ประกอบกับเวลาในการทดลองน้อย จึงยังไม่ได้ผลครบถ้วน

อย่างไรก็ตามได้ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ HV1, HV2 และ HV3 ที่สถานะต่าง ๆ โดยที่ HV1 จะมีส่วนสำคัญต่อการดึงไอออนออกจาก plasma source ส่วน HV2 จะมีความสำคัญต่อการส่งผ่านไอออนไปยังระบบเลนส์และ HV3 จะมีส่วนในการบังคับให้ไอออนวิ่งผ่านระบบเลนส์ออกไปยัง Faraday cup ใต้ รวมถึงมีส่วนในการกำหนดระยะโพกัสและขนาดของลำไอออนด้วย

จากผลการทดลองในรูปที่ 65 พบว่า เมื่อ HV1 เพิ่มขึ้น กระแสไอออนจะเพิ่มขึ้นด้วย แสดงว่ามีไอออนถูกดึงออกมาได้มากขึ้น ในรูปที่ 66 พบว่า กระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ HV2 เพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงว่าไอออนสามารถส่งผ่านเข้ายังระบบเลนส์ได้มากขึ้นและสุดท้าย กระแสไอออนมี

แนวโน้ที่จจะอิมตัวเมื่อ HIV3 มีค่ามากขึ้น แสดงว่าเมื่อ HIV3 มีค่าน้อยถ้าไปอออนจะมีลักษณะปาน ออกมาบางส่วนสามารถวิ่งผ่านระบบเลนส์ไปได้แต่บางส่วนชนผนังเลนส์ไปไม่สามารถผ่าน ไปได้ เมื่อเพิ่ม HIV3 ขึ้น ถ้าไปอออนจะดูเข้า จึงสามารถวิ่งผ่านระบบเลนส์ไปได้มากขึ้น และเมื่อถ้าไปอออน ทั้งลำถูกบีบไปให้เล็กลงจนสามารถผ่านระบบเลนส์ไปได้ทั้งหมดแล้วกระแสไปอออนจึงมีค่าอิมตัวค้ง แสดงในรูปที่ 67

5. การดำเนินงานวิจัยระยะที่ 5 (สิงหาคม 2543 – มกราคม 2544)

วัตถุประสงค์หลักของการดำเนินการวิจัยระยะที่ 5 คือการเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงไอออนออกจากแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิด HOCAM และชนิด Microwave เพื่อให้ได้กระแสไอออนสูงขึ้น ซึ่งจากผลการวิจัยจนถึงระยะที่ 4 พบว่ากระแสไอออนที่ได้มีค่าน้อยกว่า 20 μA จากทฤษฎีคร่าวๆ โดยคำแนะนำของผู้ประสานงานโครงการ (ดร. วิโรจน์ ตันตราภรณ์) พบว่าปัญหาอาจจะเกิดเนื่องจากระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดพลาสมา กับ extraction electrode มีมากเกินไป จำเป็นต้องลดระยะให้สั้นลง งานวิจัยในช่วง 6 เดือนที่ขอขยายเวลาได้ดำเนินการวิจัยที่สำคัญดังนี้

5.1 ปรับปรุงขั้วไฟฟ้า CMC และ CA ของ HOCAM

เนื่องจากชุดจับขั้วไฟฟ้า CMC ของแหล่งกำเนิดไอออนชนิด HOCAM ที่ออกแบบไว้ล่าสุดในการวิจัยระยะที่ 4 ประกอบขั้วตัว support ขั้ว CMC ทั้งด้านหน้าติดกับระบบ extraction และด้านหลังทำให้ไม่สามารถเลื่อน extraction electrode เข้าใกล้แหล่งกำเนิดพลาสมาได้ เนื่องจากติดชุด support ขั้ว CMC ด้านหน้า

การปรับปรุง

ออกแบบชุดจับขั้วไฟฟ้า CMC ใหม่โดยตัดตัว support ด้านหน้าที่ติดกับระบบ extraction ออก เหลือไว้เฉพาะด้านหลังและเพื่อให้ขั้ว CMC อยู่ที่เหมาะสมกึ่งกลางของขั้ว CA ได้โดยที่ปลายไม่ตกลง สามารถทำได้โดยการลดความยาวของขั้ว CA และ CMC ลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่ง และเพิ่มความยาวของท่อ ceramic และท่อแก้วที่ให้ support ขึ้นแทน ดังแสดงในรูปที่ 68 เมื่อทดลองใช้งานพบว่าการเกิดพลาสมาเป็นไปได้ดีขึ้นแสดงในรูปที่ 69 จากรูปที่ 69 (c) จะเห็นพลาสมาเกิดต่ำจากปลาย CA และระบบที่ใช้ในการทดลองมีโครงสร้างดังรูปที่ 70



(a)



(b)

รูปที่ 68 ขั้วไฟฟ้า CA และ CMC พร้อมชุดจับยึด

(a) ชุดจับยึดที่ออกแบบใหม่

(b) CA และ CMC มีขนาดสั้นลงเมื่อเทียบกับแบบเดิม



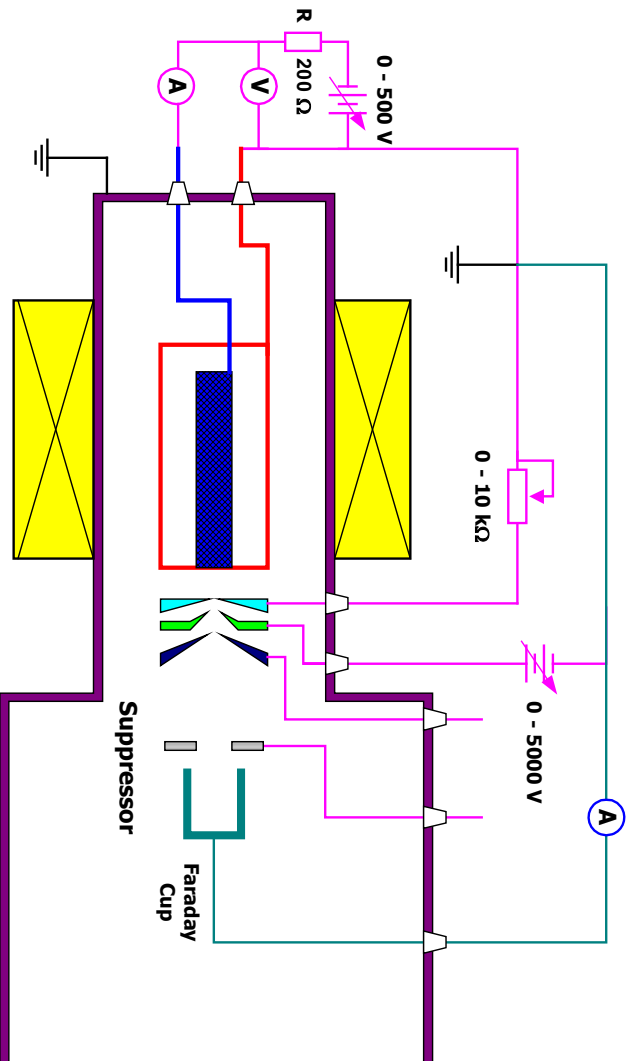
(a)

(b)

(c)

รูปที่ 69 การเกิดพลาสมาในระบบที่ออกแบบใหม่

- (a) discharge current 15 mA , (b) discharge current 90 mA
(c) พลาสมาในรูป (a) เมื่อมองจากด้านข้าง
(แถบสีดำด้านซ้ายมือคือขอบปลายของขั้วไฟฟ้า CA)
(แถบสีดำด้านซ้ายมือคือขอบปลายของขั้วไฟฟ้า CA)

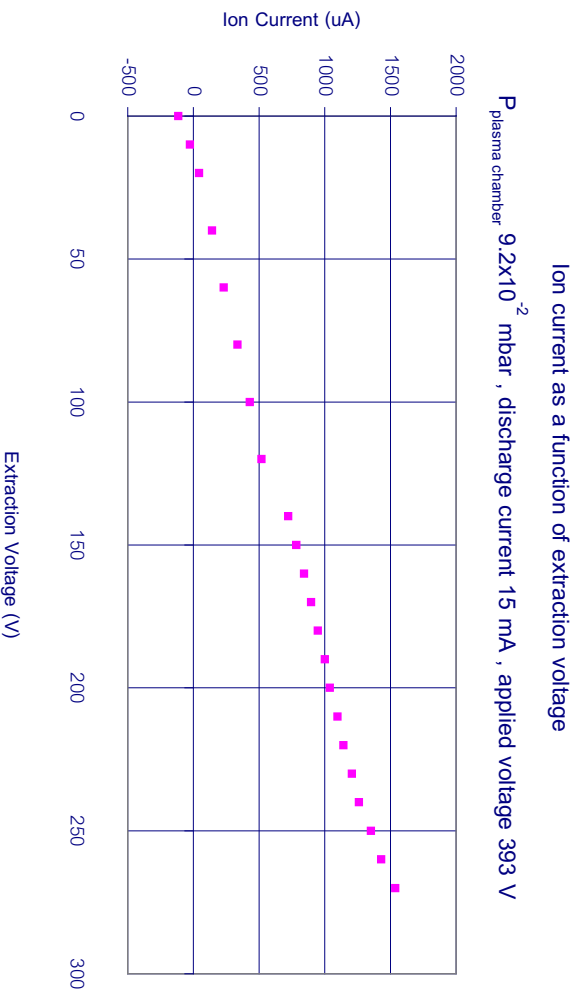


รูปที่ 70 โครงสร้างของระบบที่ออกแบบให้ระยะระหว่าง

แหล่งกำเนิดไอออนและระบบ extraction สั้นลง

ผลการทดลอง

1. การลดขนาดของ CA และ CMC ให้สั้นลงเป็นผลให้ plasma volume ลดลงแต่ยังคงสามารถทำงานที่ plasma density เท่าเดิมโดยใช้ discharge current น้อยลงได้ จากการทดลองพบว่าแหล่งกำเนิดพลาสมาสามารถใช้งานได้ดีที่ discharge current ประมาณ 15 mA เทียบกับ 50 - 100 mA สำหรับขั้ว CA และ CMC แบบเดิม



รูปที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและ extraction voltage
ระบบที่ีได้รับการปรับปรุงมีกระแสไอออนมากกว่า 1.5 mA

2. สามารถลดระยะห่างระหว่างแท่งก้านนิคพลาลาสมากับ extraction electrode ลงได้ โดยการทดลอง ได้ติดตั้ง extraction electrode ห่างจากแท่งก้านนิคพลาลาสมาระยะ 5 mm แทนที่จะเป็น 51.5 mm แบบเดิม
3. จากระบบที่ออกแบบใหม่นี้โดยการทดลองพบว่าแท่งก้านนิคไอออนชนิดนี้สามารถให้กระแสไอออนได้มากกว่า 1.5 mA ดังรูปที่ 71 เมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุงซึ่งให้กระแสไอออนไม่เกิน 20 μ A พบว่าสามารถเพิ่มกระแสไอออนได้มากกว่า 50 เท่า โดยใช้กำลังงานน้อยลง 5 เท่า หมายความว่าระบบที่ได้รับการปรับปรุงนี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นประมาณ 250 เท่า

5.2 ตรวจสอบการทำงานของระบบ extraction

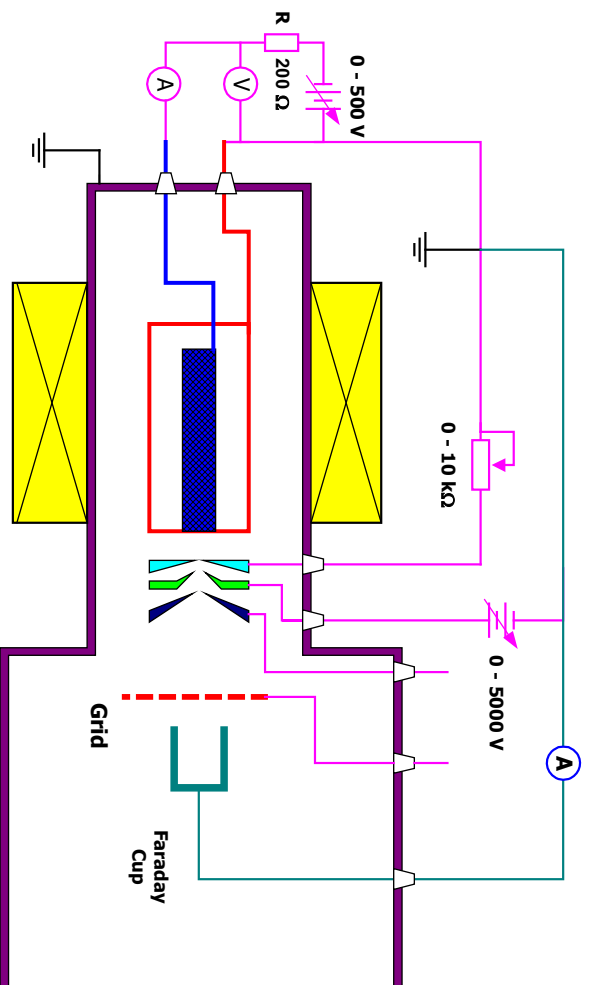
เพื่อพิสูจน์ข้อสงสัยที่ว่าระบบ extraction ที่ใช้สามารถทำงานได้ถูกต้องหรือไม่ กล่าวคือกระแสที่วัดได้จากระบบโดยใช้ faraday cup เป็นกระแสไอออนบวกใช่หรือไม่ เนื่องจากถึงแม้ว่าทิศทางของกระแสที่วัดได้โดย faraday cup จะแสดงให้เห็นว่าเป็นกระแสลบจากลำไอออน แต่ก็ไม่น่าเป็นไปได้ว่ากระแสนั้นอาจเกิดจากระแสอิเล็กตรอนจากแท่งก้านนิคพลาลาสมารือจากแท่งอื่นก็ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกร่งให้มีพลังงานสูงพอเมื่อชน faraday cup อาจทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดจาก faraday cup ได้ และถ้าอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีมากกว่าอิเล็กตรอนที่เข้าชน จะทำให้กระแสที่วัดได้มีค่าลบ กระแสเช่นเดียวกับกระแสที่เกิดจากไอออนบวกเข้าชน การทดลองเพื่อพิสูจน์จุดของอนุภาคที่วัดได้

จาก faraday cup ทำโดยการติดตั้งกริดไว้หน้า faraday cup ดังแสดงในรูปที่ 72 แล้วทำการทดลองโดยใช้ข้อสมมุติฐานดังนี้

- 1) ถ้าอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกริดเป็น ไอออนบวก กริดจะต้องมี potential เป็นบวกเมื่อเทียบกับกราวด์ แต่ถ้าอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกริดเป็นอิเล็กตรอน กริดจะต้องมี potential เป็นลบเมื่อเทียบกับกราวด์
- 2) เมื่อป้อนโวลเตจที่เป็นบวกให้แก่กริด กระแสที่วัดได้โดย faraday cup จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มโวลเตจขึ้นถ้ากระแสที่วัดได้เป็นกระแสไอออนบวก ในทางกลับกันถ้าอนุภาคนั้นเป็นอิเล็กตรอนกระแสวิวัดได้โดย faraday cup จะมีค่าเพิ่มขึ้น
- 3) เมื่อ ไอออนบวกที่มีพลังงานเพียงพอเข้าชน faraday cup จะทำให้เกิดขบวนการ sputtering ขึ้นในขณะทีอิเล็กตรอนไม่สามารถทำให้เกิดการ sputtering

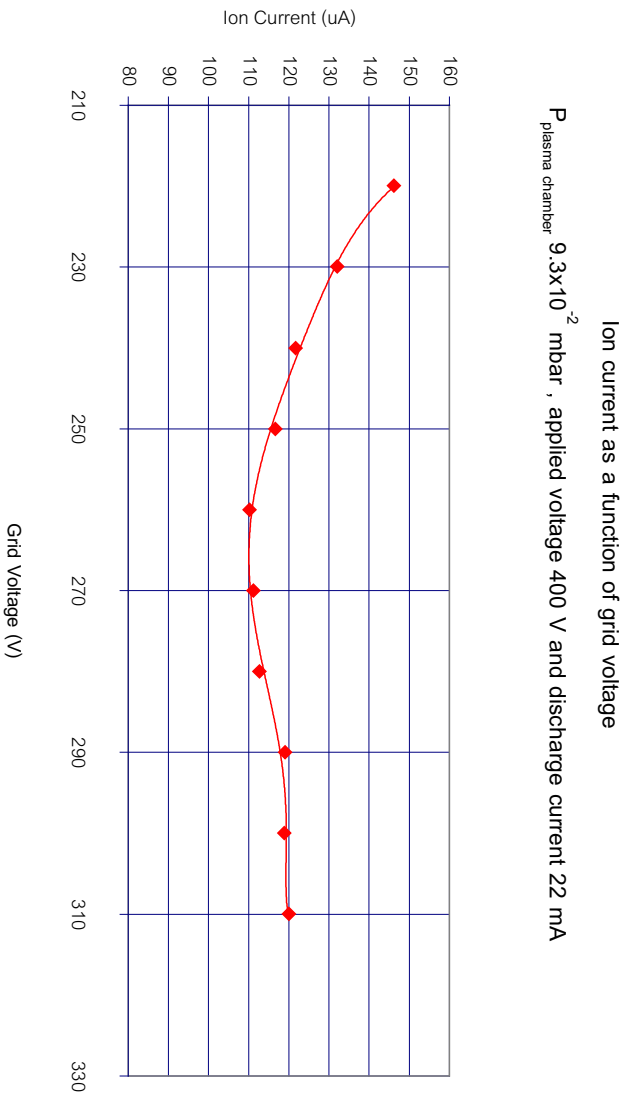
ผลการทดลอง

1. potential ของกริดมีค่าประมาณ 200 V เป็นบวกเมื่อเทียบกับกราวด์ เนื่องจากมีไอออนบวกมาสะสมที่กริด



ก๊อิดสร้างจากเส้นลวดสแตนเลส ขนาด 0.4 มม 8 เส้น/กม

รูปที่ 72 การติดตั้งกริดเพื่อศึกษาการทำงานขงระบบ extraction



รูปที่ 73 กระแสไอออนมีค่าลดลงเมื่อ grid voltage มีค่าเพิ่มขึ้น

- เมื่อป้อนโวลเตจที่กริดเป็นบวกมากกว่า 200 V กระแสที่วัดได้โดย faraday cup มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 73 เนื่องจากสนามไฟฟ้าจากกริดจะผลักอนุภาคที่มีประจุบวกของลำไอออน

- เมื่อถอด faraday cup ออกมาตรวจสอบพบว่ามีการ sputtering เกิดขึ้น เนื่องจากไอออนบวกมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมากจึงมีโมเมนตัมสูง เมื่อวิ่งเข้าชน faraday cup จึงเกิดการ sputtering ในขณะทีอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าไอออนมาก จึงมีโมเมนตัมไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการ sputtering ได้

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า อนุภาคที่วัดได้เป็นไอออนบวก ดังนั้นระบบ extraction ที่สร้างขึ้นจึงสามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์

5.3 ทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสมา

เนื่องจากในระบบ extraction ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอยู่ใกล้กันหลายขั้ว เมื่อมีการป้อนโวลเตจให้กับขั้วไฟฟ้าเหล่านี้ของระบบ extraction อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการ ionization ขึ้นในบริเวณนี้และกระแสไอออนที่ดึงได้อาจมาจากบริเวณนี้ไม่ได้นอกจากแหล่งกำเนิดพลาสมาโดยตรง จึงทำให้ระบบทำงานโดยไร้ประสิทธิภาพดังเช่นที่เคยเกิดขึ้นจากการทดลองในระยะที่ 4 (หัวข้อการศึกษา ระบบ extraction การทดลอง

วงจรที่ 1) เพื่อเป็นการตรวจสอบว่ากระแสไอออนที่ดึงได้มาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาหรือไม่ สามารถทำการทดลองโดยใช้ข้อสมมติฐานตามคำแนะนำของที่ปรึกษาโครงการ (ดร.วิโรจน์ ต้นตรงภรณ์) ดังนี้

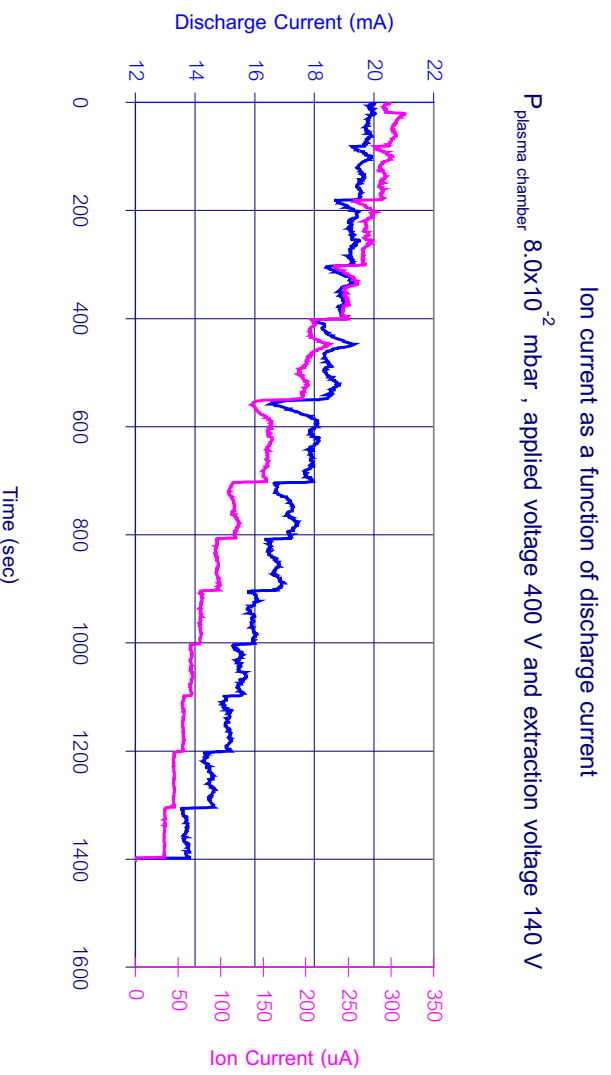
ถ้ากระแสไอออนที่ดึงได้มาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาจริง เมื่อ discharge current ในแหล่งกำเนิดพลาสมาเกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไอออนควรจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แต่ถ้ากระแสไอออนที่ดึงได้มาจาก การ ionization บริเวณขั้วไฟฟ้าของระบบ extraction โดยแหล่งกำเนิดพลาสมาทำหน้าที่เพียงเป็นตัวกระตุ้นให้เริ่มเกิดการ ionization ในระบบ extraction เท่านั้น (เนื่องจากไม่พบว่ากระแสไอออนได้ถ้าไม่เกิดพลาสมาในแหล่งกำเนิดพลาสมา) เมื่อเกิดการ ionization แล้วก็ไม่จำเป็นต้องอาศัยแหล่งกำเนิดพลาสมาอีกต่อไป ดังนั้นกระแสไอออนที่ดึงได้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของ discharge current ในแหล่งกำเนิดพลาสมา

ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองโดยการวัดกระแสไอออนในขณะที่ลด discharge current ลงจากประมาณ 20 mA จนถึงประมาณ 14 mA ด้วยการลดสนามแม่เหล็ก พบว่ากระแสไอออนมีค่าลดลงตาม discharge current อย่างต่อเนื่องจาก 300 μ A ถึงประมาณ 50 μ A ดังแสดงในรูปที่ 74 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อลด discharge current ลงต่ำกว่า 14 mA พลาสมาจะดับเป็นผลให้กระแสไอออนลดลงเป็นศูนย์ด้วย

จากผลการทดลองสรุปได้ว่ากระแสไอออนที่ดึงได้มาจากแหล่งกำเนิดพลาสมา

HOCAM



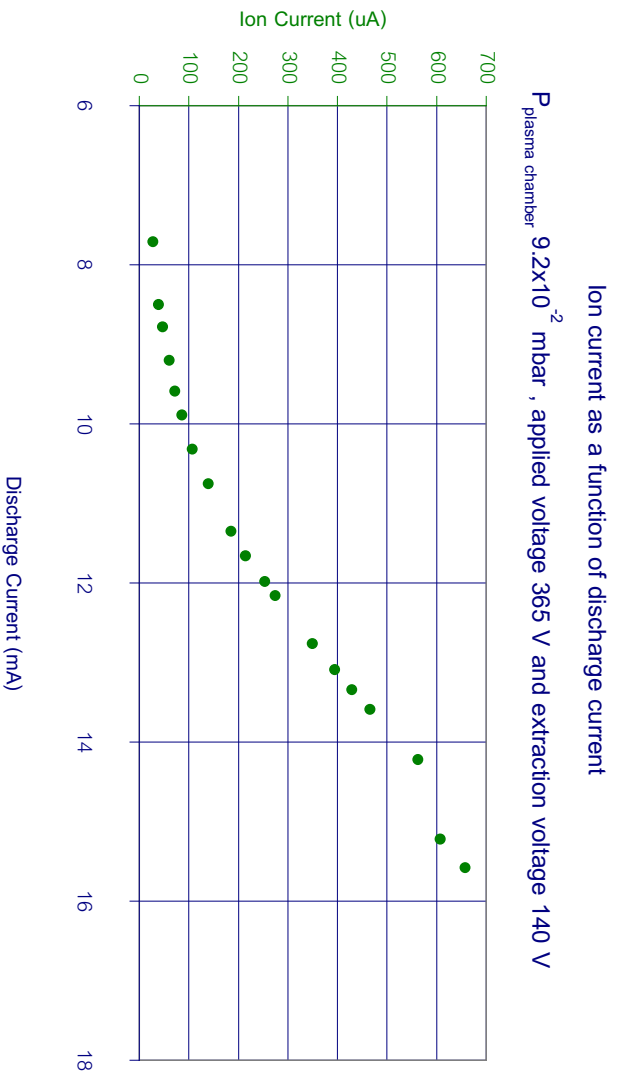
รูปที่ 74 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไอออนตาม discharge current

5.4 ผลของ discharge current ต่อกระแสไอออน

ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ discharge current โดยให้ extraction voltage มีค่าคงที่ 140 V ความดันภายใน plasma chamber 7.9×10^{-2} mbar และใช้ applied voltage 400 V

ผลการทดลอง

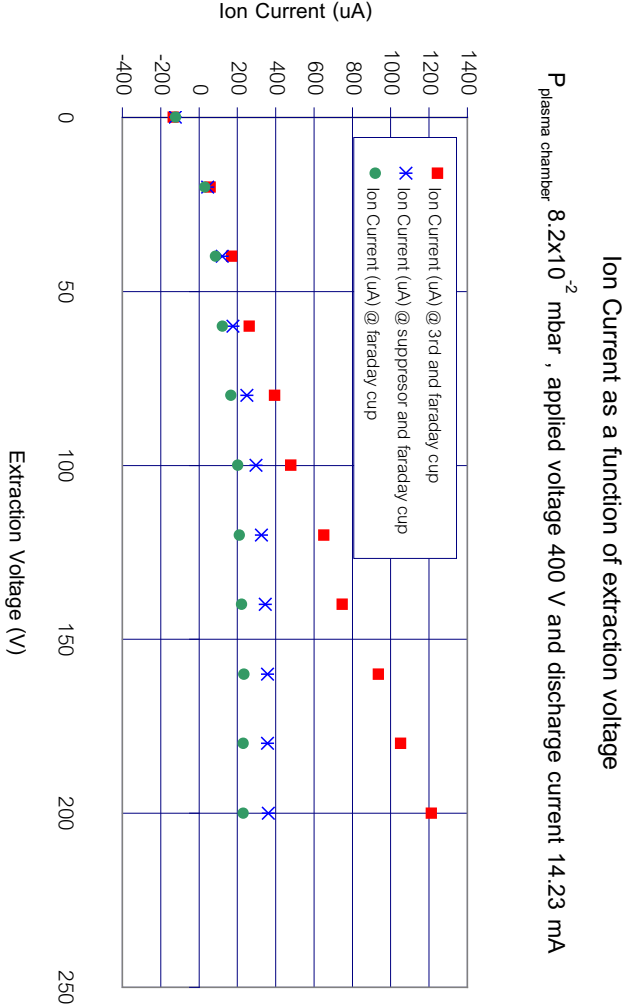
จากการทดลองพบว่ากระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตาม discharge current ดังแสดงในรูปที่ 75 จากรูปพบว่ากระแสไอออนมีค่าเพิ่มเป็นประมาณ $700 \mu\text{A}$ เมื่อ discharge current เพิ่มขึ้น 16 mA โดยที่กระแสไอออนยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นคู่อีก แต่จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่ม discharge current สูงกว่า 16 mA จะเกิดการ trip ของแหล่งจ่ายไฟ ทำให้ไม่สามารถทดลองต่อได้เนื่องจากถึงขีดจำกัดของแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและ discharge current

5.5 ผลของ extraction voltage ต่อกระแสไอออน

ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ extraction voltage ทำให้ extraction voltage มีค่าคงที่ 140 V ความดันภายใน plasma chamber 7.9×10^{-2} mbar และใช้ applied voltage 400 V



รูปที่ 76 ผลของ extraction voltage ต่อกระแสไอออน

ผลการทดลอง

ในการทดลองเพื่อวัดกระแสไอออนในที่นี้ใช้ท่อแอมป์มิเตอร์เพื่อวัดกระแสในสามลักษณะ คือ 1) วัดกระแสที่ faraday cup อย่างเดียว 2) วัดกระแสที่ faraday cup รวมกับกระแสที่ suppressor และ 3) วัดกระแสที่ faraday cup รวมกับกระแสที่ extractor ขั้วที่ 3 ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 76 จากรูปพบว่ากระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตาม extraction voltage ที่เพิ่มขึ้นจนถึง 200 V จากผลการทดลองพบว่ากระแสไอออนจากการวัดทั้งสามแบบ มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ถ้า extraction voltage มีค่าน้อยกว่า 50 V แต่เมื่อ extraction voltage มีค่าสูงขึ้น กระแสไอออนที่วัดแบบที่ 3) จะมีค่าสูงกว่าการวัดแบบที่ 1) และ 2) มาก ซึ่งมีค่าถึง 1200 μ A โดยที่กระแสจาก faraday cup อย่างเดียวมีค่าต่ำกว่าที่ได้จาก faraday cup รวมกับ suppressor เล็กน้อยและมีค่าต่ำสุดคือที่ 200 μ A และ 300 μ A ตามลำดับ ในขณะที่กระแสที่วัดแบบที่ 3) นี้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตาม extraction voltage ต่อไป

เมื่อพิจารณาจากผลการวัดแสดงว่า กระแสที่วัดได้สูงมากเมื่อวัดการวัดแบบที่ 3) ซึ่งกระแสที่ได้เป็นกระแสจาก faraday cup รวมกับกระแสจาก extractor ขั้วที่ 3 นั้น กระแสส่วนใหญ่มาจากกระแสใน extractor ขั้วที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจาก extraction electrode ตัวนี้มิลักษณะเป็นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm การที่กระแสที่วัดได้จากทั้งสามกรณีในช่วงที่ใช้ extraction voltage ต่ำๆ มีค่าไม่ต่างกันมากนัก แสดงว่าลำไอออนมีการบานออกไม่มากนัก ลำไอออนส่วนใหญ่จึงสามารถผ่านรูของ extractor ขั้วที่ 3 ไป

ถึง faraday cup ได้ เมื่อ extraction voltage มีค่าสูงขึ้นการบานออกของลำไอออนจะมีมากขึ้น ถ้าไอออนส่วนใหญ่จะชนกับ extractor ขั้วที่ 3 ส่วนที่ทะลุผ่านไปยัง faraday cup จึงมีค่าจำกัด กระแสจึงมีลักษณะอิมพัลส์ไม่เพิ่มขึ้นตาม extraction voltage ในขณะที่กระแสที่ extractor ขั้วที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าลำไอออนจะมีการบานมากขึ้นตาม extraction voltage ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นระบบโพกัสจึงมีความสำคัญมาก จะต้องออกแบบให้สามารถโพกัสลำไอออนที่กำลังบานออกนี้ และระบบโพกัสจะต้องออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อต้องใช้กับลำไอออนที่มีพลังงานสูง

5.6 ผลของสนามแม่เหล็กต่อกระแสไอออน

การทดลองเพื่อศึกษาผลของสนามแม่เหล็กของ HOCAM ที่มีต่อกระแสไอออน ทำโดยควบคุมให้ discharge current คงที่ 14 mA ด้วยการเพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้นในขณะทีลด applied voltage ลง จะทำให้ discharge current มีค่าคงที่ แต่ ในการทดลองนี้ใช้ extraction voltage คงที่ 140 V

ผลการทดลอง

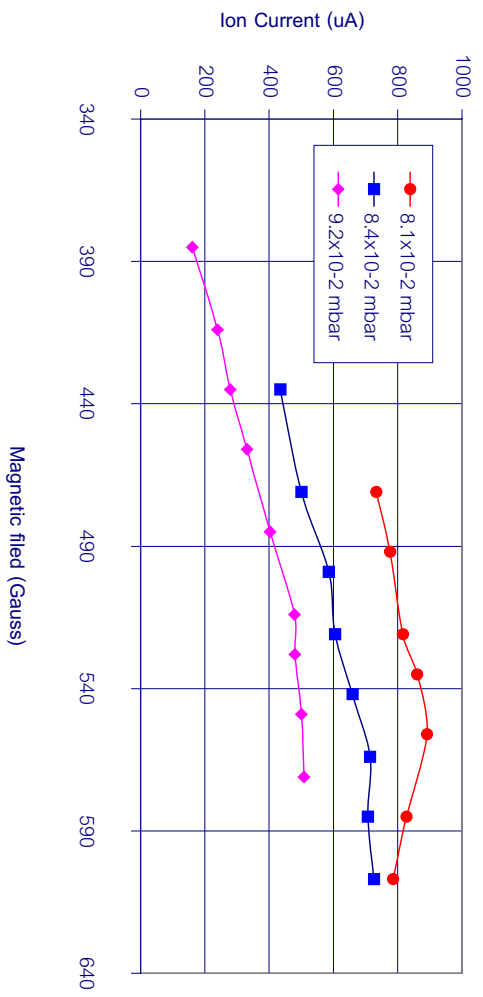
ผลการทดลองพบว่ากระแสไอออนมีค่าสูงขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 77 เนื่องจากเมื่อให้สนามแม่เหล็กสูงขึ้นรัศมีการกวางของอิเล็กตรอนรอบๆ CMC ในแหล่งกำเนิดพลาสมาจะลดลง เป็นผลให้เกิดการแตกตัวของก๊าซเป็นไอออนรอบๆ CMC มากกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป ทำให้มีความหนาแน่นของกระแสไอออนรอบๆ CMC สูงกว่าเมื่อใช้สนามแม่เหล็กน้อยๆ* เป็นผลให้สามารถดึงไอออนได้ขึ้น

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากัน กระแสไอออนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันของ plasma chamber มีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ความดันสูง mean free path ของไอออนจะมีค่าน้อย ทำให้เกิดการชนกันของไอออนกับโมเลกุลของก๊าซ หรือระหว่างไอออนด้วยกันเองได้ง่าย เป็นผลให้มีไอออนวิ่งไปยัง faraday cup น้อยลง

กราฟในรูปที่ 78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับ extraction voltage สำหรับพลาสมาที่มี discharge current เท่ากันแต่ใช้สนามแม่เหล็กต่างกัน จากการทดลองพบว่าเมื่อให้ extraction voltage เท่ากัน พลาสมาที่เกิดจากการใช้สนามแม่เหล็กที่สูงกว่าจะทำให้กระแสไอออนที่สูงกว่า

* K. Kuwahara and H. Fujiyama, "Application of the Child-Langmuir Law to Magnetron Discharge Plasma", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 22, No. 4, pp. 442-448, 1994

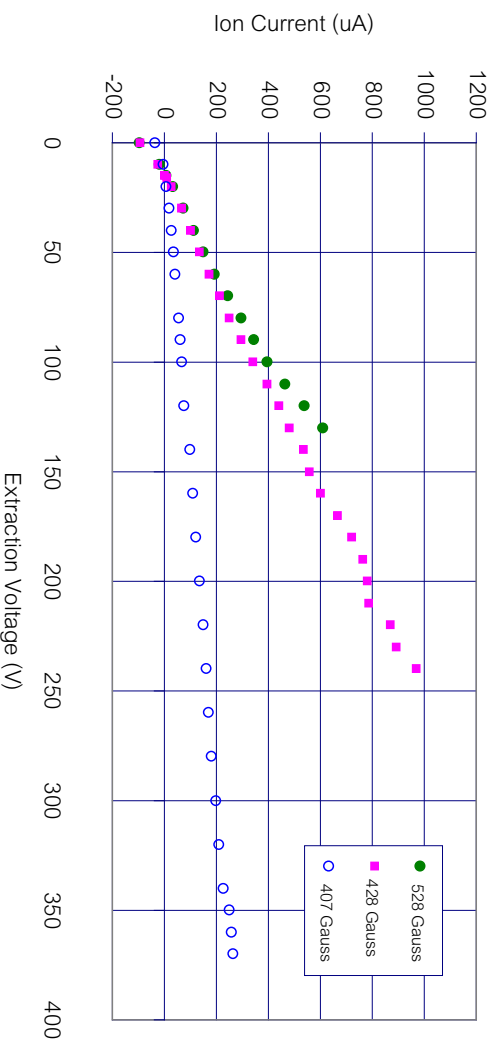
Ion current as a function of magnetic filed :
discharge current 14 mA and extraction voltage 140 V



รูปที่ 77 ผลของสนามแม่เหล็กต่อกระแสไอออน

Ion current as a function of extraction voltage

P_{plasma chamber} 9.2x10⁻² mbar , discharge current 12 mA



รูปที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนและ extraction voltage
เมื่อใช้สนามแม่เหล็กค่าต่างกัน

รายงานผลการวิจัย
ส่วนที่ 2

รายงานฉบับสิ้นสุดโครงการ Microwave Ion Source โดยสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี กลุ่มบริษัทพรีเมียร์

ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.จิรจน์ ต้นตราวรณ
นักวิจัย	สุรวุฒิ กิจสัมพันธ์
หน่วยงาน	สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี กลุ่มบริษัทพรีเมียร์
เสนอต่อ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ในเอกสารฉบับนี้เป็นรายงานนำเสนอผลงานฉบับสุดท้ายที่สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี (Technology Development Office : TDO) กลุ่มบริษัทพรีเมียร์ เป็นผู้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอต่อหัวหน้าโครงการ โดยโครงการนี้ได้รับมาทำการวิจัยในส่วนของกาพัฒนาไป้ออนภายใต้การกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าความถี่สูงย่านไมโครเวฟ (Microwave ion source) และได้งบประมาณดำเนินการจาก ส.จ.ล.ในรูปแบบของ Proposal 1 ชุด งบประมาณ 1,107,400 บาท ระยะเวลา 10 เดือน (เริ่มเดือน กรกฎาคม 42- สิ้นสุดเดือน พฤษภาคม 43) งานวิจัยที่ทางสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีรับมาทำนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการใหญ่ของทาง ส.จ.ล.ที่ได้รับมาดำเนินการภายใต้โครงการที่มีชื่อว่า “ การพัฒนาเทคโนโลยีต่ำไป้ออนเพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดลัปแบนเชนวิช ” โดยมีสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนโครงการ

วัตถุประสงค์การดำเนินงานวิจัยที่สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีเป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการก็คือ การออกแบบและสร้างไมโครเวฟไป้ออนซอส ซึ่งมีลักษณะทั่วไปคือ เป็นเครื่องไป้ออนซอสที่ใช้คลื่น ไมโครเวฟเป็นตัวทำให้เกิดลำเอออนออกมา มีคุณลักษณะเฉพาะคือ

1. มีความเข้มของกระแสไป้ออนมากกว่า 10 mA
2. ใช้ก๊าซเฉื่อยเป็นก๊าซกำเนิดไป้ออน
3. ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 2kV
4. มีระบบสุญญากาศขนาด $10^{-1} - 10^{-5}$ torr
5. มี power consumption ประมาณ 1000 W
6. ใช้ร่วมกันแรงดันไฟฟ้า 220V/50Hz

ตามสัญญาเลขที่ RDG 3/11/2541/J24E9901 ที่ทำขึ้นระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในฐานะผู้จ้างและสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี ในฐานะผู้รับจ้าง โดยที่โครงการนี้จัดเป็นการทำงานวิจัยร่วมกันระหว่างสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี และภาควิชาชีพลิคส์

ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ KMITL โดยได้เริ่มโครงการตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2542 และสิ้นสุดในวันที่ 31 พฤษภาคม 2543 เป็นเวลาทั้งสิ้น 10 เดือน

แนวทางการดำเนินงานวิจัย

1 เพื่อสร้างแหล่งกำเนิดไอออนด้วย microwave ให้มีความเข้มเพียงพอ โดยไม่ใช้ extractor ตาม state of the art และเป็นไปตามแนวทางของที่ปรึกษาโครงการคือ

- 1.1 ต้องการ small cross section ion beam โดยให้ high pressure ใน source chamber เป็นตัวผลักดัน ions ผ่าน small orifice ไปสู่ high vacuum
- 1.2 ต้องการ minimize plasma source volume เพื่อ
 - 1.2.1 low total power consumption
 - 1.2.2 no water cooling
 - 1.2.3 no need for magnetic confinement
 - 1.2.4 low cost device

2 เป็นหน่วยงานสนับสนุนการวิจัยพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออน โดยทำงานควบคู่ไปกับ KMITL ที่มุ่งเฉพาะในเรื่อง beam focusing และ beam scanning

เป้าหมายโดยรวมของโครงการ

พัฒนาเทคโนโลยีการสร้าง ion source ที่มีประสิทธิภาพเพื่อจะนำไปเจาะร่อง club sandwich solar cell เพื่อสร้าง electrode ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์และเพื่อประโยชน์ในอนาคตโดยให้มีปริมาณของ semiconductor ที่จุดทิ้งไปในย้อยที่สุด ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นกระบวนการหนึ่งประกอบกันขึ้นจากหลายกระบวนการเพื่อให้ solar cell ที่มีประสิทธิภาพดี

ภาพรวมการดำเนินงานโครงการและผลของงาน

ตามแผนการดำเนินงานที่ได้กำหนดไว้โดยบรรจุอยู่ในเอกสารข้อเสนอโครงการ TDO จะต้องพัฒนาแหล่งกำเนิด ion โดยใช้ไมโครเวฟมาเป็น plasma energizer ซึ่งจะต้องศึกษาถึงขบวนการที่เกิด plasma ขึ้น โดยใช้ไมโครเวฟมากระตุ้นให้ อุณหภูมิการ ionization ในสภาวะที่เหมาะสมทั้งนี้การศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกันกับ microwave passive component เช่น microwave-guide , resonant cavity เป็นต้น รวมถึง microwave generator ที่จะนำมาใช้ และ power coupling จากแหล่งกำเนิดไมโครเวฟมายังโหนดซึ่งในที่นี้ก็คือ plasma chamber เพื่อต้องการให้มี power transfer efficiency สูงที่สุด ก็เป็นงานที่ต้องดำเนินการควบคู่กันไปด้วย ผลของการศึกษาและออกแบบสร้าง microwave part ต่างๆเพื่อนำมากระตุ้นให้เกิด plasma ส่งผลเช่นใดต่อ plasma ที่เกิดขึ้นมาได้ก็จะเป็นงานส่วนสำคัญอีกประการหนึ่งใน การศึกษาซึ่งรวมถึงการวัดคุณสมบัติของ plasma ที่เกิดขึ้นมาด้วยขบวนการดังกล่าวนี้ว่าเป็นอย่างไร ซึ่งการจะงานในส่วนนี้จะต้องทำการสร้างเครื่องมือวัด

เพื่อสามารถจะโพรบ parameter ใดๆที่ต้องการจะรู้จาก plasma ที่กำเนิดขึ้นและนำมาพิจารณาปรับปรุงแหล่งกำเนิด plasma ให้เหมาะสมกับงานที่จะนำมาประยุกต์ใช้ และเมื่อได้แหล่งกำเนิด plasma ที่คิดว่ามีความเหมาะสมอยู่ในระดับหนึ่งแล้วงานในขั้นต่อไปจึงเป็นการทดลองเพื่อแยก ion ที่กำเนิดขึ้นมาจาก plasma ออกมา ทั้งนี้ technical approach ก็คือการใช้ hydraulic pressure ผลัก plasma ผ่านรูขนาดเล็กออกมา จากนั้นจึงจะได้คัดเลือกเฉพาะ ion ไปทำการโฟกัส ซึ่งก็จะต้องทดลองทำ กริดไฟฟ้าเพื่อแยก ion ออกจาก electron ก่อนที่จะเกิด recombination กันและจะต้องสร้างเครื่องมือวัดคุณสมบัติของ ion , ปริมาณกระแส ion (Faraday cup) และ beam characteristics (3-D manipulator ติดตั้ง beam profile monitor) เป็นต้น โดยเมื่อได้ผลของการวัดตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวในข้างต้นแล้วก็เพียงพอที่จะทราบ geometry ของ microwave ion source ในขั้นต้นเพื่อนำไปสู่การปรับแต่งและจัดหา material ที่เหมาะสมกับส่วนประกอบของระบบในแต่ละส่วนเพื่อขยายผลไปสู่ขบวนการ focusing และ scanning ต่อไป

ที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะเป็นงานทั้งหมดที่จะต้องดำเนินการเพื่อให้ได้ microwave ion source ที่เรารู้ physical details อย่างละเอียดเพื่อให้ผู้เป้าหมายหลักที่ต้องการให้ได้ก็เกี่ยวข้องกับวัตถุประสงค์โครงการที่ว่าไว้ โดยแผนการดำเนินงานหลักมีอยู่ด้วยกันคือ

- การศึกษาการนำ microwave มาเป็น plasma energizer ใน plasma chamber ที่มีปริมาตรน้อย
- การศึกษาคุณสมบัติของ plasma ที่เกิดขึ้นได้จากขบวนการนี้
- การทดลองแยก ion ออกจาก electron เพื่อจะวัด ion current และ beam divergence

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการดำเนินงานกับงานที่ได้ตั้งเป้าหมายเอาไว้ผู้วิจัยเห็นว่าการดำเนินงานที่ TDO ในฐานะเป็นผู้รับจ้างได้สำเร็จลุล่วงไปประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของงานที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้เท่านั้น โดย 40% ของนี่เองงานที่ได้กล่าวไว้ที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไมโครเวฟมาเป็น plasma energizer เช่นศึกษาคุณสมบัติของ magnetron สำหรับกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ , ผลของการจำกัดกำลังวัตต์ที่มีต่อรูปแบบการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน cavity , ลักษณะของ electric field line ใน commercial microwave oven , ศึกษาการกำเนิด plasma ขึ้นในปริมาตรจำกัดขนาดต่างๆและอยู่ภายในเงื่อนไขต่างๆกัน , ศึกษาเทคนิคต่างๆในการลด microwave power ลงโดยใช้ magnetron เป็นแหล่งกำเนิด , ทดลองออกแบบสร้าง cylindrical resonant cavity เพื่อนำมาใช้ร่วมกับ plasma tube และได้ศึกษาทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ cavity ที่สร้างขึ้น รวมถึงการออกแบบสร้าง vacuum system เพื่อสำหรับใช้ทดลองในงานส่วนต่างๆ เป็นต้น โดยรายละเอียดของผลของงานจะได้นำเสนอในลำดับถัดไป

ผลการดำเนินงานในปีปัจจุบันซึ่งสิ้นสุดการดำเนินงานตามสัญญาเมื่อวันที่ 31 พฤษภาคม 2543 และพร้อมนำส่งมอบงานให้กับ ศ.จ.ล. นั้น TDO สามารถกำหนด plasma ขั้วใน plasma tube ที่บรรจุอยู่ใน cylindrical resonant cavity และติดตั้งร่วมกับ high vacuum chamber โดยมี pressure ภายใน plasma tube อยู่ในระดับ 0.1 torr โดยทำให้มี pressure difference ระหว่าง plasma chamber และ vacuum chamber ที่มีความดันอยู่ในระดับ 0.0001 torr จะเป็นแรงผลักดันให้ทั้ง electron และ ion เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณ high vacuum ได้แต่ยังไม่มีความรู้ของลักษณะการวางตำแหน่งของ electrode รวมถึงระดับ potential เพื่อที่จะแยก ion ออกมาเพื่อทำการวัดและนำไปสู่ขบวนการ focusing และ scanning ต่อไป

จึงอาจกล่าวได้ว่าผลงานที่ได้ดำเนินการของ TDO เมื่อเทียบกับแผนที่ได้วางไว้สำเร็จลุล่วงไปประมาณ 40 % จากที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้เนื่องจากเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ จำเป็นต้องดำเนินการในเรื่องย่อยต่างๆที่ไม่สามารถวางแผนก่อนการดำเนินการได้ อาทิการพัฒนาอุปกรณ์วัดระดับรั่วของไม่โครวเพเพื่อความปลอดภัย การทดสอบหาวัสดุที่เหมาะสมต่อการใช้งาน mini-plasma chamber ซึ่งต้องพิจารณาความเป็นฉนวนที่ความถี่คลื่นไมโครวเพ และเสถียรภาพในสภาวะอุณหภูมิสูงหรือ sputtering effect เป็นต้น ทำให้ต้องใช้เวลามากกว่าแผนอย่างแรกดี นักวิจัยและโครงการเองได้เรียนรู้ประสบการณ์ใหม่ๆ อันจะนำไปสู่การพัฒนา source ที่พึงประสงค์ได้ในไม่ช้า

ผลงานในโครงการ

(รายงานฉบับนี้ใช้การนำเสนอเรียงตามลำดับขั้นของงานที่ได้ทำการวิจัยมา มีคำแนะนำโดยผู้การ จัดแบ่งงานออกเป็นหมวดหมู่)

รายงานฉบับนี้เป็นรายงานผลการดำเนินงานฉบับสิ้นสุดโครงการตลอดทั้งวันที่ 1 สิงหาคม 2542 ถึงวันที่ 31 พฤษภาคม 2543 โดยตามแผนการดำเนินงานที่ได้กำหนดไว้ในช่วงแรกเป็นการ จัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการทดลองและอยู่ในขอบเขตที่คาดการณ์ได้ เช่น การจัดสร้าง vacuum chamber ที่สามารถทำความดันได้ต่ำถึง 10^{-6} mbar (เป้าหมายในการใช้งานอยู่ที่ 10^{-4} mbar) ทั้งนี้ในการสร้าง TDO เป็นผู้ออกแบบและมีบริษัทที่มีความชำนาญเป็นผู้ดำเนินการสร้าง โดย vacuum chamber ที่สร้างขึ้นจะมีขนาดหน้าแปลนตรงกับของ ศ.จ.ล เพื่อสะดวกในการเชื่อมต่อกันในอนาคตและมีปริมาตรภายใน 0.015 m^3 ทำจากวัสดุ stainless SUS-304 มี port จำนวน 17 port คือ

1	ASA100	จำนวน	2	port	(view port)
2	DN40CF	จำนวน	1	port	
3	DN100CF	จำนวน	1	port	

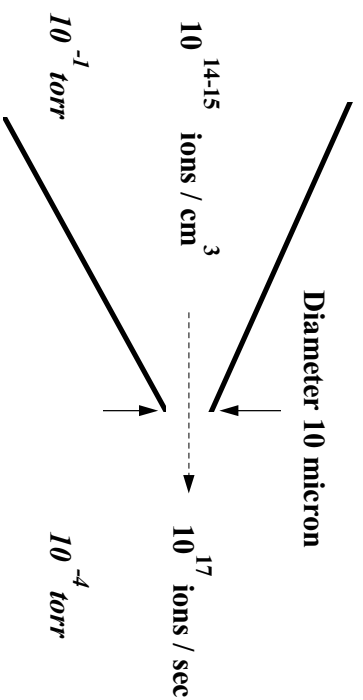
4	NW50	จำนวน	2	port
5	NW40	จำนวน	4	port
6	NW25	จำนวน	5	port
7	NW10	จำนวน	1	port (2-7 : general purpose port)
8	ISO100	จำนวน	1	port (pump connection port)

รวมทั้งได้จัดสร้างระบบหล่อเย็นชนิดน้ำสำหรับ diffusion pump และสำหรับการทดลองในส่วนอื่นที่มีอยู่ในแผนการดำเนินงาน ระบบหล่อเย็นที่ใช้เป็นชนิดทำความเย็นด้วย compressor ใช้กำลังไฟฟ้า 350 W มีปริมาตรของถังบรรจุน้ำเท่ากับ 350 mm (W) * 500 mm (L) * 350 mm (H) = 0.06 m³ สามารถทำความเย็นโดยมีอุณหภูมิของน้ำขณะระบายความร้อนออกจาก diffusion pump ได้ 10 °C

พร้อมกันนี้ก็มีงานอีกส่วนหนึ่งที่ได้ดำเนินการควบคู่กันไปด้วยก็คือจัดหา machine shop อื่นๆ ที่จะมารองรับงานสร้างอุปกรณ์สำหรับทดลองขึ้นมาใช้ เพราะเหตุที่มีข้อจำกัดในการสร้างอุปกรณ์เหล่านี้ซึ่ง work shop ของ TDO ไม่สามารถทำได้ จึงจำเป็นต้องหา work shop จากภายนอกเสริมไปด้วย พร้อมกันนี้ได้จัดเตรียมอุปกรณ์พื้นฐานที่เห็นว่าจำเป็นต้องใช้ในการทดลองขึ้นมาไว้ เช่น clamping ring , centering ring , teflon , quartz และอุปกรณ์ที่จะประกอบกันขึ้นเป็น source chamber ไว้แล้ว การดำเนินงานที่กล่าวมาในข้างต้น TDO อยู่ในฐานะเป็นผู้ออกแบบและว่าจ้างให้บริษัทภายนอกที่มีประสบการณ์เป็นผู้รับจ้างดำเนินงาน โดยมี basic research อยู่ที่ TDO ทำควบคู่กันไปด้วย

หมายเหตุ : สำหรับอุปกรณ์ในการเตรียมระบบสุญญากาศ เช่น diffusion pump และ vacuum accessories ต่างๆ ได้รับการสนับสนุนจากพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง

ในการดำเนินงานทางเทคนิค TDO ได้ยึดเป้าหมายในการทำงานโดยยึดตามวัตถุประสงค์ในข้อ 1.1 และ 1.2 เป็นหลัก (พิจารณารูปที่ 1) ซึ่งมีเป้าหมายต้องการที่จะให้ได้ ion current ขนาด 16 mA / 10⁻⁶ cm² มีปริมาณ ion จักรผ่านรูขนาด 10 micron จำนวน 10¹⁷ ions / second



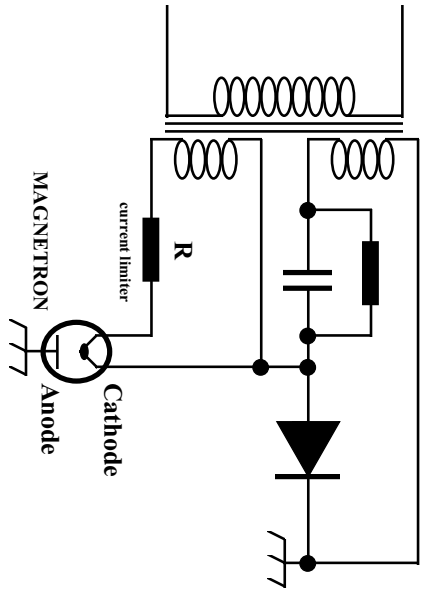
รูปที่ 1 แสดง technical approach สำหรับ high current and micron size beam ion source

เพราะฉะนั้นความดันใน source chamber ควรอยู่ในราว 10^{-1} torr เพื่อจะมี ion density ประมาณ 10^{14-15} ions / cm³ จึงจะได้ ion current ใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการ และด้วยการใช้ gas pressure เป็นแรงผลัก plasma ผ่านรูขนาดเล็ก ดังนั้นความดันใน vacuum chamber ควรอยู่ที่ประมาณ 10^{-4} torr เพื่อให้มี pressure difference ระหว่าง source chamber และ vacuum chamber พอเพียง

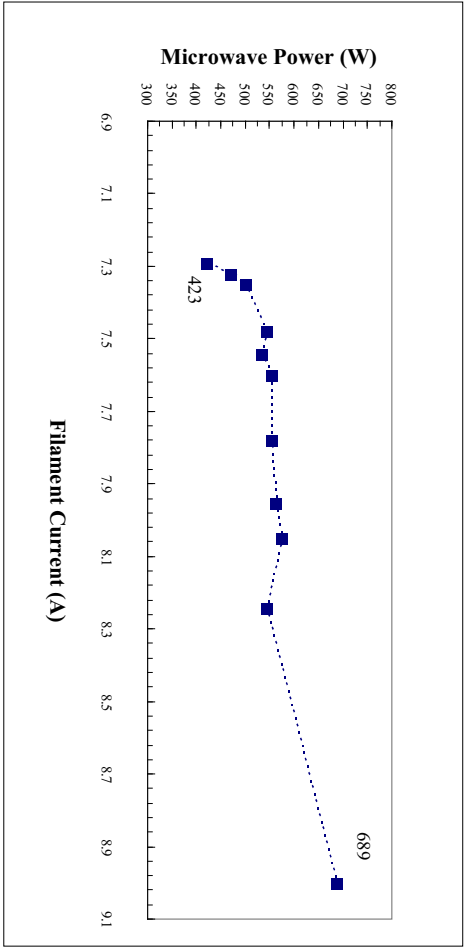
และเนื่องจาก microwave source ที่ใช้พัฒนาอยู่ที่ TDO จะใช้ magnetron เป็นแหล่งกำเนิด microwave ขึ้น โดยทั่วไป commercial magnetron จะมี total power consumption อยู่ประมาณ 1 kW efficiency $\approx 70\%$ ดังนั้น microwave power ที่จะได้จะอยู่ในราว 700 W ซึ่งตามวัตถุประสงค์แล้วต้องการใช้ power เพียง 5 - 10 W ของ microwave มาทำเป็น plasma energizer และตัว source ที่มีอยู่จึงจำเป็นต้องลดกำลังวัตต์ของ microwave ลงมาให้ได้มากที่สุด (เท่าที่จะทำได้)

จากลักษณะการทำงานของ magnetron ที่อาศัยการเกิด thermionic emission ขึ้นภายใน microwave power ที่กำเนิดขึ้นได้จะสัมพันธ์กับค่า ac current ที่จ่ายให้แก่ filament ของ magnetron พิจารณารูปที่ 2

ตัวการมี current limiter จำกัดค่ากระแสเพื่อให้กับ filament ที่ขั้ว cathode ของ magnetron จะส่งผลต่อกำลังวัตต์ของ microwave ที่เกิดขึ้น โดยใช้การวัด power แบบ indirect คือ ใช้การวัดเวลาที่น้ำขนาดปริมาตร 100 mL มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 100°C เพื่อนำมาคำนวณหากำลังวัตต์ที่ใช้ไปทีขนาดของ filament current ต่างๆกัน ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3



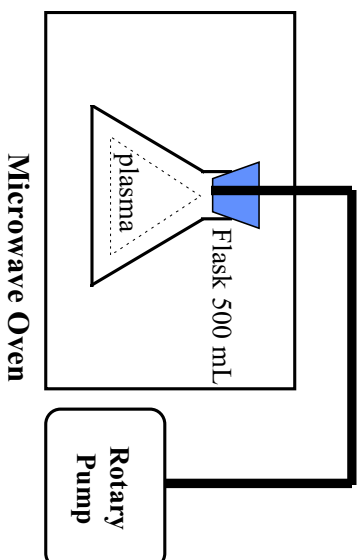
รูปที่ 2 magnetron power supply circuit



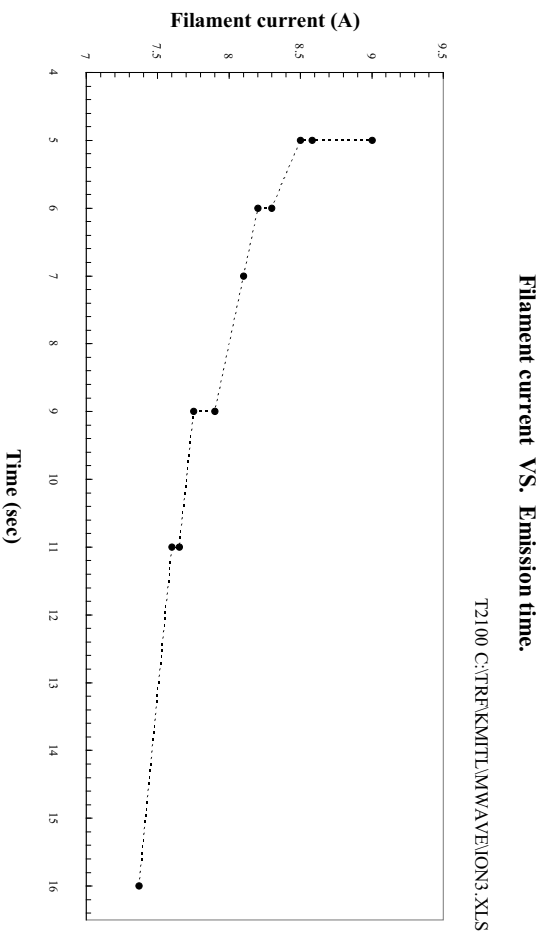
รูปที่ 3 ผลการทดลองการลด microwave power ด้วยการจำกัดกระแสที่ cathode ของ magnetron

เห็นได้ว่าด้วยการจำกัด ac current ที่จ่ายให้กับ filament สามารถจะลดกำลังวัตต์ของ microwave ได้กว่า 40 % (ในกรณีที่มีชนิดของหลอดเปลี่ยนไป เนื่องจากที่ microwave power เปลี่ยนแปลงตาม filament current จะเปลี่ยนไปด้วย) โดยใช้หลอดชนิดเดียวกันคือฝาทุบสารละลาย CoCl_2 (สารละลายนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ) และทดลองที่ค่า filament current ต่างๆ กัน ผลที่ได้คือเมื่อขนาด microwave power เปลี่ยนไปลักษณะรูปแบบสีของหลอดจะไม่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แต่จะเปลี่ยนเฉพาะระดับความเข้มของสีเท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า “การจำกัดกระแสที่ขั้ว cathode ของ magnetron จะไม่ส่งผลต่อโหมดภายใน resonant cavity จะมีเพียงก็แต่ microwave power เท่านั้น ที่จะเปลี่ยนไปตามขนาด filament current สำหรับหลอดชนิดเดียวกัน”

ในการทดลองนำ microwave มาทำเป็น plasma energizer ในระยะแรก TDO ใช้ตู้ commercial microwave oven (SAMSUNG) เป็น microwave source โดยได้ทดลองทำความดันต่ำ ขึ้นภายใน flask ขนาด 500 mL ที่บรรจุอยู่ใน microwave oven (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 แสดงการทดลองการเกิด ionization ของ gas ภายใน microwave oven ที่งอขึ้น



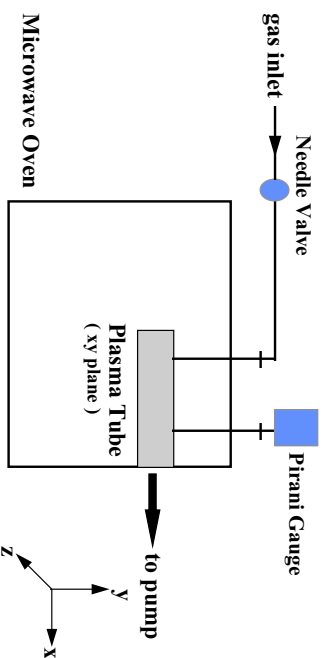
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง filament current และ emission time

การทดลองนี้จำเป็นต้องการทราบถึงเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการ ionization ของ gas ภายใน microwave box (ขณะนั้นยังไม่มีเกิดสำหรับวัดความดัน) ซึ่งการจัดการทดลองอย่างง่ายที่แสดงในรูปที่ 4 เมื่อ turn on microwave จะทำให้ gas ภายใน flask เกิด ionization ได้ โดยที่อุณหภูมิของ flask จะร้อนมาก (มีไ้สำหรับการบันทึกอุณหภูมิไว้)

ในการจำกักระแสของ filament ที่ขั้ว cathode ของ magnetron โดยยังคงจัดการทดลองตามรูปที่ 4 ผลที่สังเกตได้จากช่วงเวลาที่จะเกิด plasma ขึ้นคือเมื่อ turn on microwave จะเห็นไ้ว่า

เมื่อ filament current มีขนาดลดลง ระยะเวลาที่将会เกิด plasma ขึ้นจะสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า emission time ของ microwave จะสัมพันธ์กับ filament current ของ magnetron ข้อมูลความสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 5 ข้อมูลจะเห็นจะเป็นประโยชน์ กรณีนำมาใช้คำนวณหาค่า microwave power แบบ indirect (ตามวิธีการที่ได้กล่าวในข้างต้น)

หลังจากจบการทดลองในรูปที่ 4 แล้ว TDO ได้รับ vacuum pump และ vacuum accessories ต่างๆจากทางลวดระบาย จึงได้เตรียมการทดลองขึ้นใหม่โดยที่ทราบแล้วว่าสามารถจะใช้ microwave มากกระตุ้นให้เกิด ionization ของ gas ภายใน flask ขนาด 500 mL ที่ความดันต่ำได้ และเพื่อไปสู่วัตถุประสงค์ที่ต้องการ minimize plasma source volume ที่มีความดันภายใน plasma source อยู่ในระดับ 10^{-1} torr (mean free path ≈ 1 mm) เพื่อต้องการให้มี plasma density ที่สูงพอ จึงได้จัดการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 ขึ้น



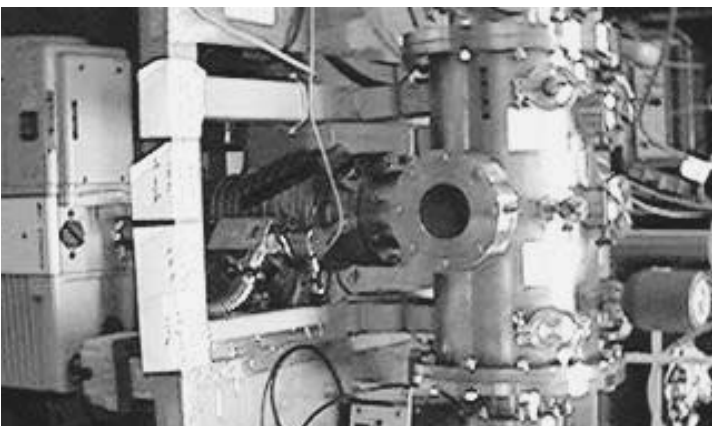
รูปที่ 6 การทดลองลดขนาดปริมาตรของ plasma source และการจัดวางที่ระนาบต่างๆใน microwave oven

ในการทดลองได้เตรียม plasma tube ที่มีลักษณะรูปร่างเป็น cylindrical shape มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 7 , 5 , 3 และ 2 mm (เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กที่สุดที่สามารถจะเตรียมขึ้นได้ในขณะนั้น) ทำขึ้นจากวัสดุ tetflon วางอยู่ใน microwave box โดยที่อยู่กับ rotary pump มี pressure gauge วัดความดันภายใน tube และมี needle valve สำหรับการปรับ flow rate ของ gas ที่เข้ามาใน tube ในการนี้ได้จัดเตรียม tube ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm ทำจากแก้ว pyrex เอาไว้เพื่อทดลองด้วย โดยจากการทดลองซ้ำกันหลายครั้งสำหรับการนำ microwave ความถี่ 2.45 GHz มาเป็น plasma energizer เห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ tube ที่เล็กที่สุดที่สามารถเกิด ionization ได้จากการกระตุ้นด้วย microwave ที่ความถี่นี้มีขนาดเท่ากับ 2 mm โดยมีลักษณะการจัดวางระนาบของ tube ภายใน microwave box เป็นเรื่องสำคัญ เพราะจะต้องวาง tube ให้อยู่ในแนวที่มี microwave ผ่านในแนว axial ของ tube จึงจะเกิด ionization ขึ้นภายใน tube ได้ และด้วย

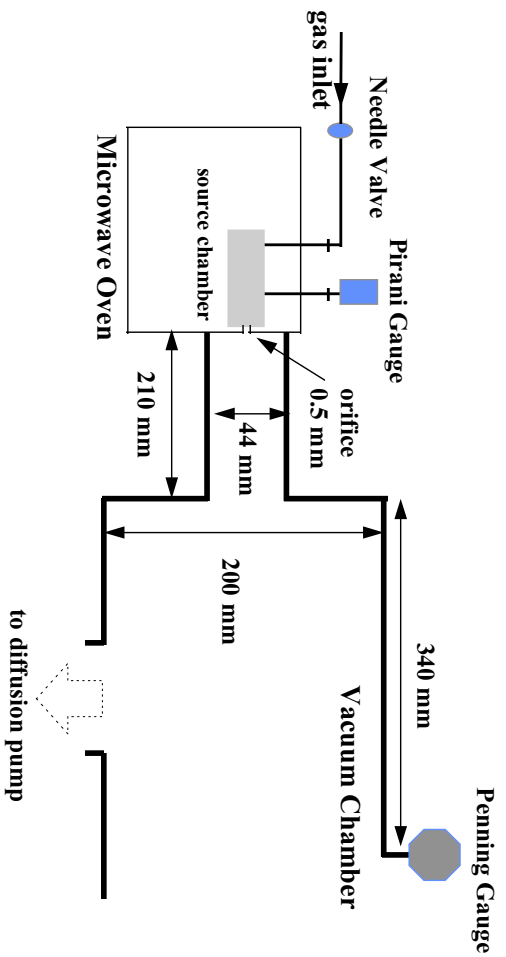
การเพิ่มหรือลดขนาดรูที่เป็นทางเข้าของ gas จาก needle valve สามารถจะปรับความดันภายใน tube ได้ ผลที่ได้พบว่าจะมี pressure limit สูงสุดเท่ากับ 3.6 mbar ที่ gas ภายใน tube สามารถจะเกิด ionization ได้ แต่ด้วยการใช้ microwave power ขนาด 700 W จะทำให้ tefflon มีอุณหภูมิสูงขึ้น (สามารถสัมผัสได้) แม้ว่า tefflon จะมีคุณสมบัติเป็น temperature insulator ที่ดีแล้วก็ตาม แสดงว่า local temperature ภายใน tube ขณะเกิด plasma จะมีอุณหภูมิสูงมาก ๆ ด้วยเหตุนี้จะทำให้ความดันภายใน tube สูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนไปถึง pressure limit ก็จะหยุดการเกิด plasma การทำให้มีความเสถียรของ plasma ที่กำเนิดขึ้นมาได้จึงเป็นเรื่องที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ด้วยการผลิต power ของ source จะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะจำกัด local temperature ภายใน tube ไม่ให้สูงมากเกินไปจนเป็นเหตุให้เกิดผลข้างเคียงมาป็นอุปสรรคประการหนึ่งในการใช้ tefflon มาทำเป็น plasma tube ก็คือในระยะเวลาการใช้ tefflon สำหรับงานนี้คงจะไม่เหมาะสมเพราะในขณะที่เกิด plasma ขึ้นจะมี impurities อื่นๆ ที่เป็นส่วนประกอบอยู่ใน tefflon เกิดการ ionization ด้วย นอกไปจาก gas ชนิดที่ต้องการใช้ให้เกิดการ ionization เท่านั้นจึงมีความสนใจที่จะใช้ quartz มาทำเป็น plasma tube แต่มีปัญหาในเรื่องการ machine ที่ค่อนข้างยาก

TDO ได้สร้างและทดสอบ vacuum system เสร็จสมบูรณ์ในเดือนตุลาคม 2542 สามารถทำความดันได้ 3.2×10^{-6} mbar ภายในเวลา 3 ชั่วโมง (ในระยะแรกและดีขึ้นเป็นลำดับ) โดยใช้ diffusion pump ขนาด pumping speed เท่ากับ 300 L/s vacuum system ที่ TDO แสดงดังรูปที่ 7

หลังจากที่มี vacuum system สมบูรณ์แล้วจึงได้เริ่มต้นศึกษาแนวความคิดในการใช้ hydraulic pressure มาเป็นแรงผลักดัน plasma ผ่านรูขนาดเล็กๆ โดยใช้การวาง plasma tube อยู่ใน microwave box มีขนาดรูทางออกของ plasma เท่ากับ 0.5 mm สามารถทำความดันที่ vacuum chamber ได้ 10^{-5} mbar และความดันที่ source chamber ได้ 10^{-1} mbar ลักษณะการเตรียมการทดลองแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 TDO Vacuum System

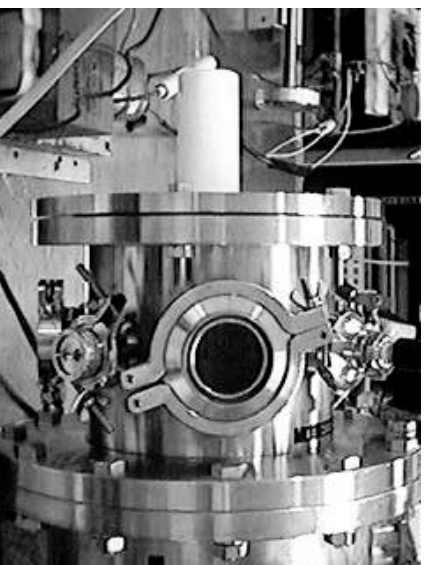


รูปที่ 8 แสดงการเชื่อมต่อกระหว่าง source chamber และ vacuum chamber

ผลจากการทดลองพบว่า ด้วยความแตกต่างของความดันในบริเวณ source chamber วัดได้ 10^{-1} mbar จาก pirani gauge และ vacuum chamber วัดได้ 10^{-5} mbar จาก penning gauge เมื่อเกิด plasma ขึ้นใน tube และมีแรงผลัก plasma ผ่านรู 0.5 mm ออกมาอยู่ในบริเวณท่อที่มีขนาดเส้นผ่า

ศูนย์กลาง 44 mm (ทำจาก plastic) จะปรากฏให้เห็นแสงขึ้นในบริเวณนี้ แสดงว่าบริเวณนี้จะเกิด recombination ของ e^- และ ion ขึ้น กรณีนี้ อ.วิโรจน์ ได้ให้คำแนะนำว่า จากรูปแบบการจัดการทดลองนี้ ตำแหน่งที่วัดความดันใน vacuum chamber อยู่ห่างจากรูทางออกของ plasma ถึงประมาณ 550 mm อีกทั้งยังถูกลด conductance ในการ pump อากาศลงมาเหลือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเพียง 44 mm จากแต่เดิม 200 mm เพราะฉะนั้นความดันที่ตำแหน่งรูตรงบริเวณ high vacuum จึงไม่น่าจะอยู่ที่ 10^{-5} mbar เพราะที่ความดันระดับนี้จะมี mean free path อยู่ในช่วง 1 m โอภาสที่ e^- และ ion จะเกิด recombination ก็จะมีน้อย แต่การที่เห็นแสงเกิดขึ้นในบริเวณนี้แสดงว่าบริเวณดังกล่าว mean free path ของ e^- และ ion อาจจะอยู่ในระยะเช่นเดียวกับ ความดันก็จะอยู่ในช่วง $10^{-2} - 10^{-3}$ mbar โอภาสที่จะเกิด recombination กันและปล่อย photon ออกมาจึงมีมาก ดังนั้นจึงควรจะต้องติดตั้ง pressure gauge วัดความดันที่ตำแหน่งทางเข้าออกของรูทั้งบริเวณ low vacuum และ high vacuum ให้ใกล้กันกับรูทางออกมากที่สุด เพื่อต้องการรู้ความดัน ณ. ตำแหน่งดังกล่าว และนำมาวิเคราะห์ได้

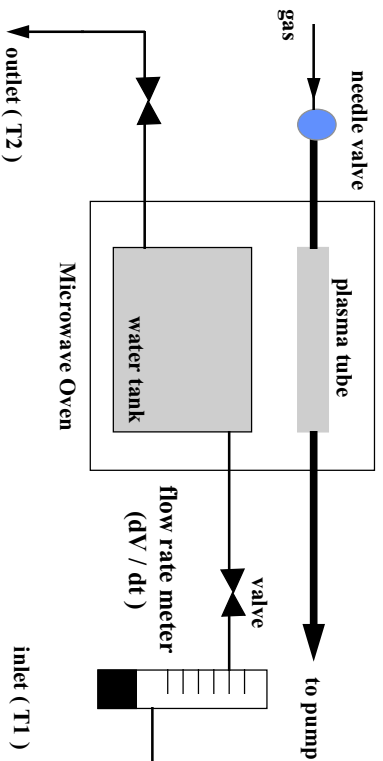
ผลจากการทดลองนี้จึงนำมาจัดทำ vacuum adapter โดยต่อกับกับ main vacuum chamber ซึ่งสามารถจะติดตั้ง pressure gauge ให้ใกล้กับกับรูทางออกและมี port ชนิด NW25 จำนวน 6 port สำหรับติดตั้ง electrical feed-through ในส่วนของ ion extraction มีรูปร่างของ vacuum adapter แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งมีปลายอีกด้านหนึ่งของ chamber สำหรับต่อกับ microwave box



รูปที่ 9 ลักษณะของ vacuum adapter

จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้ microwave source ที่มีกำลังวัตต์ต่ำเพื่อเลี่ยงปัญหาของอุณหภูมิที่จะมีขึ้นเหมือนกับกรณีที่ใช้ source กำลังวัตต์สูงและก็ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใส่ source กำลังวัตต์สูงเพราะจะเป็น power loss ไปเป็นส่วนใหญ่ โดย source ที่ใช้ทดลองอยู่ใน

ปัจจุบันสามารถกำเนิด microwave power ขึ้นได้ ≈ 700 W ที่ความถี่ 2.45 GHz (เป็นชนิดที่อยู่ ใน commercial microwave oven) ด้วยเหตุนี้การลดกำลังวัตต์ของ source ลงตามวิธีแรกคือการจำกัด filament current ที่ขั้ว cathode ของ magnetron เป็นวิธีหนึ่งแต่ก็มี power limit อยู่ อีกวิธีหนึ่งคือ ใช้ตัวกลางใต้งานมาดูดกลืนกำลังวัตต์ของ microwave ให้ลดลง โดยการทดลองที่ใช้เข้ามาทำหน้าที่ เป็น microwave absorber มีลักษณะการทดลองแสดงดังรูปที่ 10

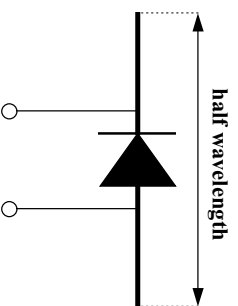


รูปที่ 10 การจัดทำการทดลองในเรื่อง microwave absorbing box

ด้วยการใช้น้ำมาทำหน้าที่เป็น absorber และใช้การวัด flow rate (dV/dt) , อุณหภูมิขาเข้าของน้ำ ($T1$) และอุณหภูมิขาออกของน้ำ ($T2$) กำลังของ microwave ที่นำดูดกลืนไปทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับ dV/dt และความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและออก ($\Delta T = T2-T1$) ผลจากการทดลองคำนวณกำลังวัตต์ที่นำดูดกลืนไปได้เท่ากับ 643 W โดยมีกำลังวัตต์ของ microwave source ตั้งต้นเท่ากับ 700 W เพราะฉะนั้นจะมีกำลังวัตต์เพียง 57 W ก็สามารถที่จะทำให้เกิด ionization ขึ้นภายใน tube ได้ โดยมีผลที่แตกต่างกันระหว่างการใช้ source ที่มีกำลังสูงและต่ำมาทำเป็น plasma energizer ก็คือการใช้ source กำลังวัตต์ต่ำมากระดับนี้จะได้ plasma ที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นน้อยกว่าการใช้ source กำลังวัตต์สูงมากระดับนี้ (จากการสังเกต) อีกทั้งระยะเวลาในการคงอยู่ของ plasma จะนานขึ้นซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราที่ source ที่มีกำลังวัตต์สูง การที่มีความเข้มข้นเปลี่ยนไปอย่างช้าๆ ไม่รวดเร็วเหมือนกับกรณีที่ใช้ source ที่มีกำลังวัตต์สูง การที่มีความเข้มข้นน้อยแสดงถึง recombination rate และ local temperature ภายใน plasma tube จะต่ำกว่า ซึ่งก็พิสูจน์ได้ว่าการใช้ microwave มากระดับนี้ให้เกิด ionization ของ gas ที่ร้อนไปต่างๆ ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้วัตต์สูงเพราะจะกลายเป็นความร้อนไปเป็นส่วนใหญ่ ทั้งยังไม่สามารถควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อ plasma ที่เกิดขึ้นได้

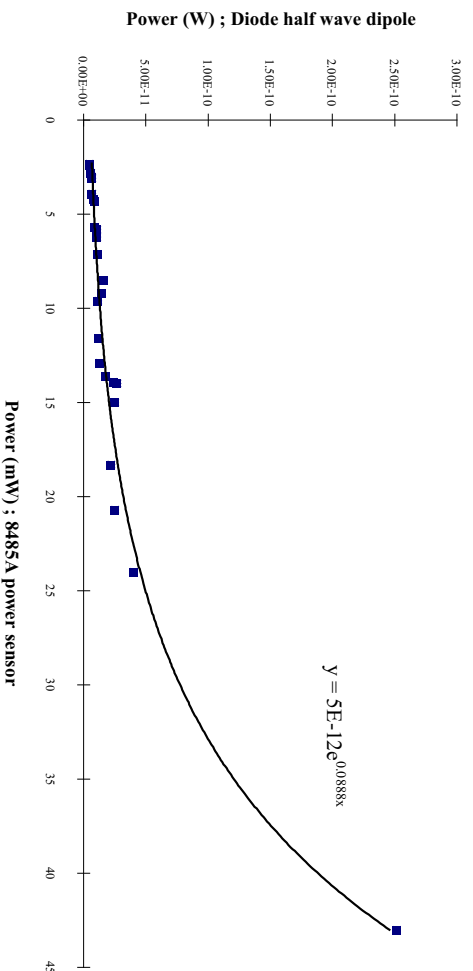
หมายเหตุ : การทดลองในช่วงต้นยังไม่สามารถวัดและบันทึก plasma parameter ที่เงื่อนไขต่างๆ ได้

ในการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นว่าเกี่ยวข้องโดยตรงกับการนำ microwave กำลังวัตต์สูงมาใช้ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ด้วยเหตุนี้ อ.วิโรจน์ จึงให้เน้นในเรื่องความปลอดภัยในการทำงานเป็นสำคัญ เพราะในขณะทดลองอาจจะมี microwave รั่วออกมาจากส่วนประกอบใดๆ ในชุดทดลองซึ่งจะมีผลต่อผู้ปฏิบัติงานโดยตรง จึงควรจะต้องมี microwave leakage detector เพื่อวัดระดับความเข้มของ microwave ในห้องปฏิบัติการและสามารถจะเตือนให้ผู้ที่อยู่ภายในห้องทราบได้ ในกรณีมี field strength เกินกว่าระดับมาตรฐาน ดังนั้นจึงได้ออกแบบ microwave detector ขึ้นใช้เองในห้องปฏิบัติการเรียกว่าเป็นชนิด diode half wave dipole โดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ใช้ microwave source จาก Gunn diode (GE) 10.52 GHz มีลักษณะวงจรของ antenna และ calibration curve แสดงดังรูปที่ 11



(a)

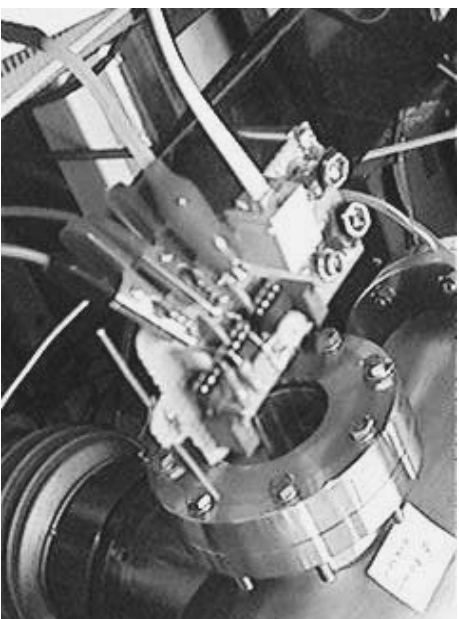
Calibration Curve (half wave dipole + 1N4148 cathode to ground)



(b)

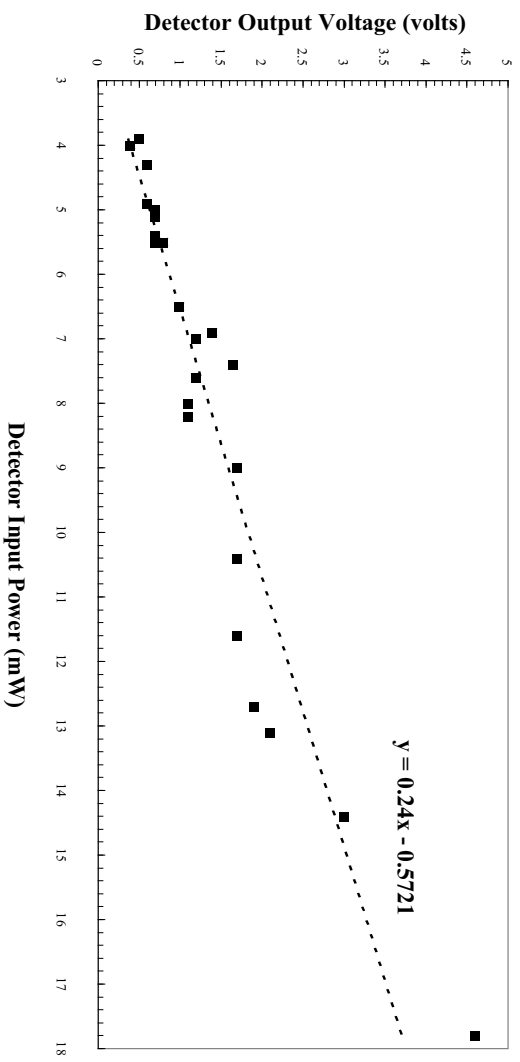
รูปที่ 11 (a) half wave dipole antenna
(b) calibration curve

โดยการนำ current signal ที่ได้จาก diode มาผ่าน amplifier ด้วยอัตราขยาย 10^4 เท่า และนำสัญญาณที่ได้จาก amplifier ไปใช้กับวงจรตรวจวัดระดับสัญญาณ (สูงหรือต่ำกว่ามาตรฐาน) เพื่อจะเตือนให้ผู้ปฏิบัติงานทราบกรณีมีระดับกำลังของ microwave รั่วออกมาเกินกว่ามาตรฐาน มี calibration curve และ prototype ของ microwave leakage detector แสดงในรูปที่ 12



(a)

IN4148 Diode Detector Response at 25 C

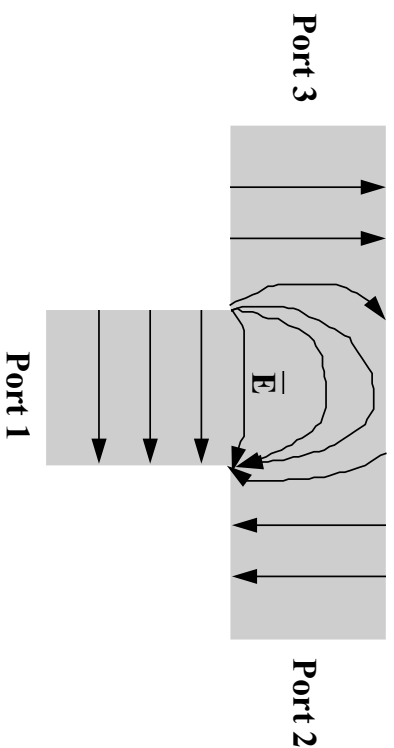


(b)

รูปที่ 12 (a) prototype ของ microwave leakage detector

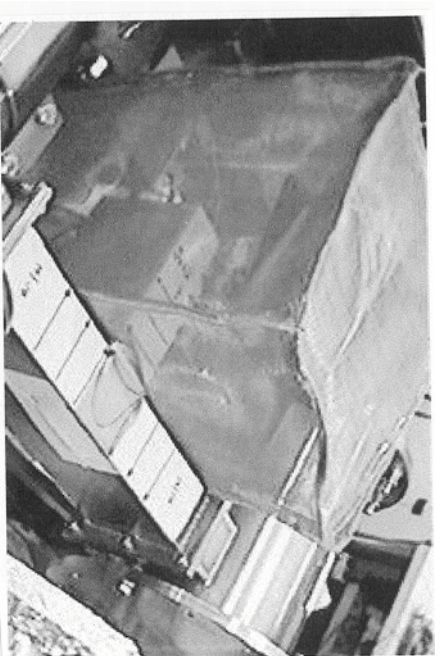
(b) calibration curve ของ microwave leakage detector

เมื่อเสร็จภารกิจในการสร้าง microwave leakage detector แล้วจึงกลับมาพิจารณาหาวิธีการที่จะลดกำลังวัตต์ของ microwave source ลงโดยต้องการจะได้วิธีที่ไม่มีผลกระทบต่อ source ซึ่งนอกวิธีที่กล่าวมาในข้างต้นทางสองวิธีแล้ว อีกวิธีหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ก็คือ ใช้ T wave-guide เป็นตัวแบ่งพลังงานจาก source ไปยัง cavity พิจารณาในรูปที่ 13



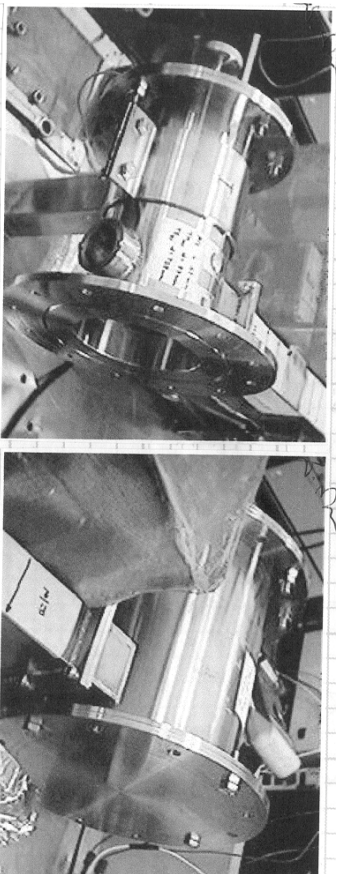
รูปที่ 13 T wave-guide electric field line

ในการใช้ T wave-guide กรณีที่โหลตของ port 2 และ 3 เป็นชนิดเดียวกันจะได้อัตราวัตต์ของ microwave ที่ port 2 และ 3 เป็นครึ่งหนึ่งของกำลังวัตต์ที่ port 1 แต่จะมีผลของสนามไฟฟ้าตรงข้ามกันซึ่งก็ไม่เป็น serious factor เพราะการนำ microwave มาใช้เป็น plasma energizer ขอเพียงแต่ให้มี microwave วิ่งผ่านในแนว axial ของ plasma tube ก็เพียงพอ วิธีนี้จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่ามาประกอบกับอีกสองวิธีในข้างต้นได้ โดยมีรูปภาพแสดง T wave-guide ที่ได้สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 14

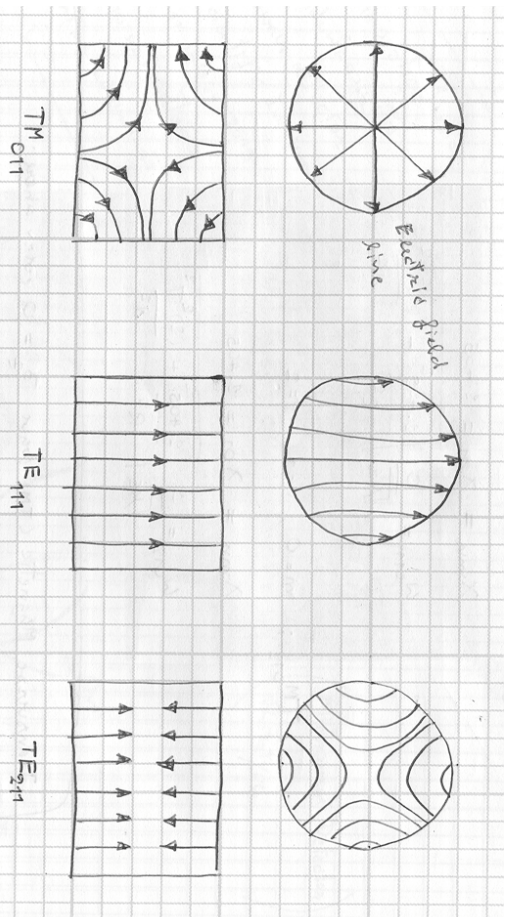


รูปที่ 14 T wave-guide ที่ทำขึ้นใช้ทดลอง

ปัจจุบัน TDO ได้ดำเนินการออกแบบสร้าง cylindrical resonant cavity ขึ้นมาสำหรับนำมาใช้ทดลองแทน microwave box ที่ใช้ทดลองมาตลอดซึ่งปัจจุบันมีข้อจำกัดในการนำมาใช้ทดลอง จึงได้ทำ cavity ขึ้นมาใหม่โดยสามารถปรับโหมดของ microwave ภายใน cavity ได้จากการปรับ boundary condition ของ cavity โดย cavity ที่ได้สร้างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ด้วยกัน 2 ขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104 mm เรียกว่า cavity 1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 156 mm เรียกว่า cavity 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz ใน cavity 1 สามารถปรับความสูงให้เกิดโหมดภายในได้ต่างกันสองโหมด คือ (Transverse Magnetic Wave) TM_{011} และ (Transverse Electric Wave) TE_{111} ส่วนใน cavity 2 สามารถปรับความสูงให้เกิดโหมดภายในได้สามโหมดคือ TM_{011} , TE_{111} และ TE_{211} โดยรูปภาพแสดง cylindrical resonant cavity ทั้งสองและลักษณะของ electric field line ในแต่ละโหมดแสดงดังรูปที่ 15



(a)



(b)

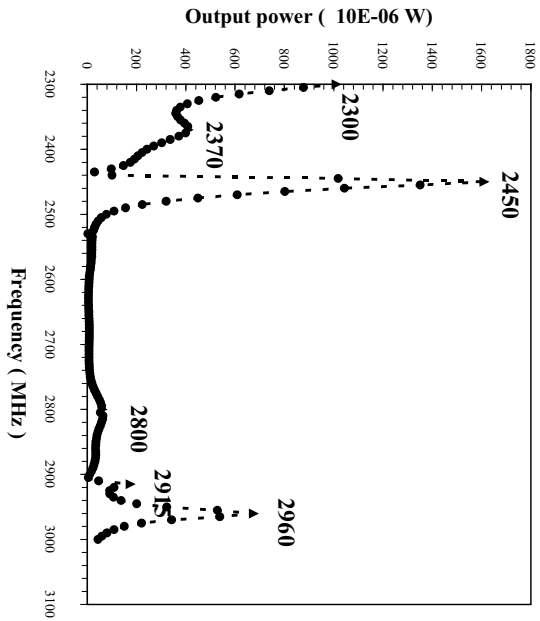
รูปที่ 15 (a) แสดงลักษณะ cylindrical resonant cavity
(b) ลักษณะของ electric field line ในแต่ละโหมด

เหตุผลที่ได้อัสร้าง resonant cavity ขึ้นมามีขนาดต่างกันสองตัวก็เพื่อต้องการที่จะนำมาใช้ทดลองร่วมกับกับ T wave-guide สำหรับใช้ลดทอนกำลังวัตต์ของไมโครเวฟลง และจากการที่สามารถจะปรับขนาดความสูงของ cavity ให้มีขนาดต่าง ๆ กันเพื่อทำให้เกิดโหมดขึ้นภายใน cavity ที่ต่างกันสามารถจะนำมาใช้เป็นตัวแปรหนึ่งในการศึกษาลักษณะสมบัติของ plasma ที่เกิดขึ้นมาจากการที่ electric field line มีลักษณะต่าง ๆ กันในโหมดที่ต่างกันรวมถึงการวาง plasma tube ที่มีขนาดต่างๆ ในระนาบที่ต่างกันสำหรับในแต่ละโหมดจะส่งผลถึง plasma ที่จะเกิดขึ้นได้หรือไม่และมีลักษณะสมบัติเป็นอย่างไร (ซึ่งการทดลองในส่วนนี้ยังไม่ได้อุ้กดำเนินการ)

เพื่อต้องการศึกษาคูณลักษณะของ resonant cavity ที่ได้อัสร้างขึ้นจึงได้จัดการทดลองเพื่อจะหาค่า quality factor ของ cavity ดังกล่าว (ในการทดลองวัด electrical properties ของ cavity มีข้อบกพร่องจากการวัดเกิดขึ้นซึ่งจะได้แจ้งรายละเอียดต่อไปนี้) โดยการทดลองวัดหาค่า resonant frequency ที่แต่ละค่าความสูงของ cavity ใช้ microwave source จาก HP 83620B Swept Signal Generator 10 MHz – 20 GHz และใช้ loop antenna ติดตั้งภายใน cavity ร่วมกับ HP 8347A counter / power meter และ power sensor วัดกำลัง microwave จากการคำนวณสำหรับ cavity 1 เมื่อความสูงของ cavity อยู่ที่ 138 mm จะเกิดโหมด TM_{011} ขึ้น และเมื่อความสูงของ cavity อยู่ที่ 83 mm จะเกิดโหมด TE_{111} ขึ้น

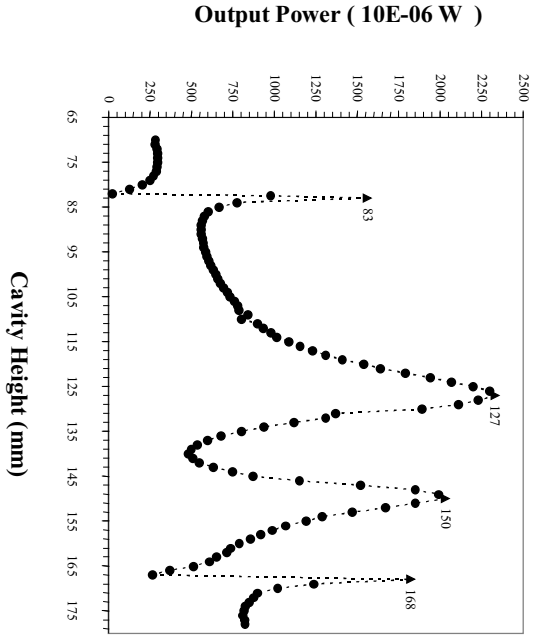
ที่ความสูงของ cavity 1 เท่ากับ 138 mm โดยใช่การวาง loop antenna ในแนว axial ของ cavity จะได้ความสัมพันธ์ของ output power as a function of frequencies และ output power as a function of cavity height แสดงดังรูปที่ 16

Resonant frequencies of a cylindrical cavity



(a)

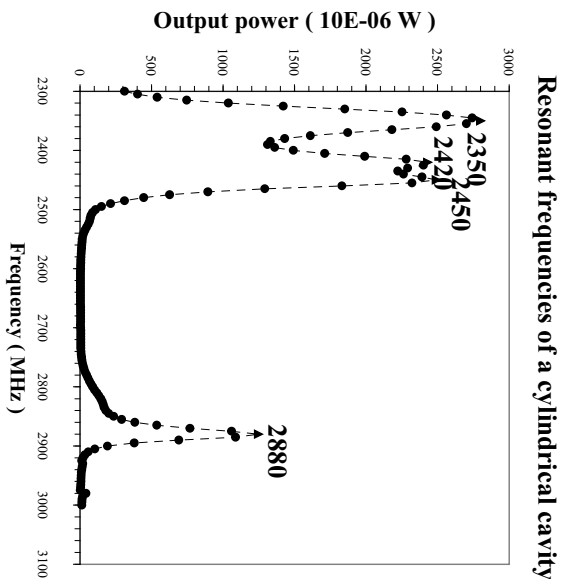
Output Power VS. Cylindrical Cavity Height
@ 2.45 GHz



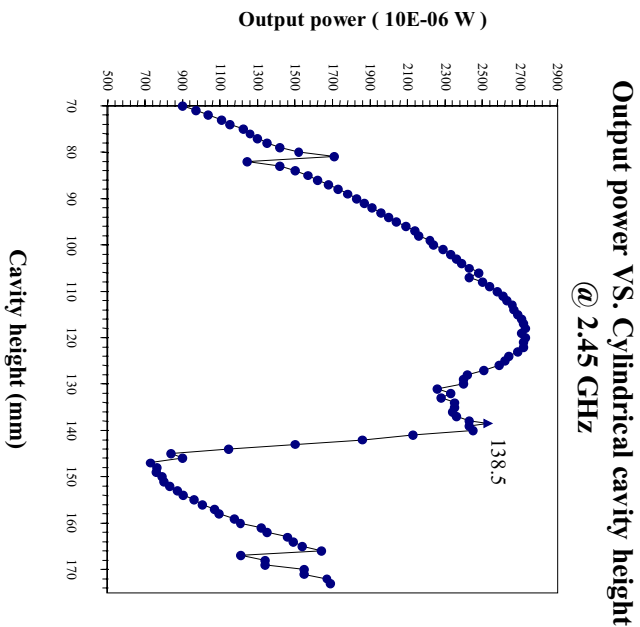
(b)

รูปที่ 16 (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ output power as a function of frequencies
(b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ output power as a function of cavity height

และที่ความสูงของ cavity 1 เท่ากับ 138 mm โดยที่ใช้การวาง loop antenna ในแนว radial ของ cavity จะได้ความสัมพันธ์ของ output power as a function of frequencies และ output power as a function of cavity height แสดงดังรูปที่ 17



(a)



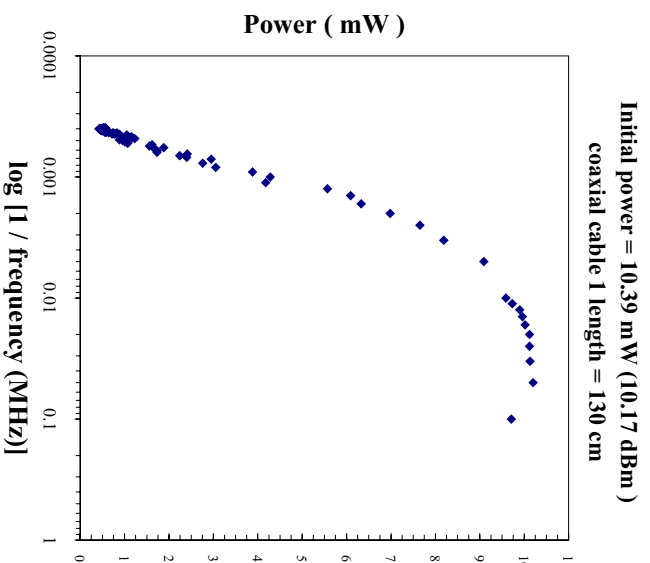
(b)

รูปที่ 17 (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ output power as a function of frequencies

(b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ output power as a function of cavity height

ผลที่ได้จากการทดลองในข้อมูลรูปที่ 16 และ 17 ส่งผลถึงแนวความคิดในการใช้การปรับขนาดความสูงของ cavity เพื่อลดทอนพลังงานของ ไมโครเวฟลงแต่ทั้งนี้ก็จะทำให้เส้นทางของ electric field line เปลี่ยนแปลงไปด้วยอีกทั้งกำลังของ ไมโครเวฟที่ถูกลดทอนลงบางส่วนก็จะสะท้อนกลับ ไปยังแหล่งกำเนิดซึ่งจะทำให้ reliability ของแหล่งกำเนิดลดลงจึง ไม่เป็นวิธีที่ดีพอในการนำมาประยุกต์ใช้ในการนี้

และที่ได้กล่าวในข้างต้นว่าผลจากการทดลองนี้เกิดจากความผิดพลาดจากการวัดก็เนื่องจากการทดลองได้ใช้สาย coaxial และ BNC เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่าง microwave source และ resonant cavity ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของ cut-off frequency ในสาย coaxial แล้วพบว่ามีค่า cut-off frequency อยู่ที่ประมาณ 100 MHz ดังข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 18



รูปที่ 18 coaxial cable performance

เหตุนี้เองการพิจารณาข้อมูลในรูปที่ 16 และ 17 จึงจะต้องพิจารณาผลของอัตราการลดทอนในสายนำสัญญาณรวมเข้าไปด้วย และเมื่อได้ทดลองประกอบทั้งในส่วนของ resonant cavity ทั้งสองและ T wave-guide เข้าด้วยกัน จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่จะทำให้การเกิดการถ่ายเทพลังงานจากแหล่งกำเนิดผ่าน wave-guide ไปยัง cavity ทั้งสองฝั่งในสัดส่วนที่เท่ากันสามารถจะทำได้ในกรณีทั้งสองฝั่งเป็น โหลดชนิดเดียวกัน ซึ่ง cavity ทั้งสองก็จัดได้ว่าเป็นขนาดโหลดที่ต่างกัน เพราะมี physical dimensions ที่ต่างกันอยู่แล้ว ในการทดลองได้ปรับความสูงของ cavity ทั้งสอง

อยู่ที่โหมด TM_{011} และใช้ขนาด 80 mL มีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากันบรรจุอยู่ใน cavity ทั้งสองและเมื่อ turn-on microwave เป็นเวลานาน 35 วินาที พบว่ากำลังวัดตัวของ microwave ที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในทั้งสอง cavity มีขนาดต่างกัน ใน cavity 1 น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 24.6 มาเป็น 32.5 องศาเซลเซียส ใช้กำลังวัดทั้งสิ้น 75 W และใน cavity 2 น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 24.1 มาเป็น 48.5 องศาเซลเซียส ใช้กำลังวัดทั้งสิ้น 228 W กำลังวัดรวมที่ใช้เท่ากับ 303 W หรืออีกกรณีหนึ่งคือการปรับความสูงของ cavity 1 เป็นโหมด TE_{111} และ cavity 2 เป็นโหมด TM_{011} และบรรจุ น้ำใน cavity ทั้งสองที่ปริมาตร 80 mL เท่ากัน โดยเมื่อ turn-on microwave เป็นเวลา 34 วินาที พบว่าใน cavity 1 น้ำใช้กำลังวัดไปทั้งสิ้น 124 W และใน cavity 2 น้ำใช้กำลังวัดไปทั้งสิ้น 183.1 W กำลังวัดรวมที่ใช้ไปเท่ากับ 307.1 W

ผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าแนวความคิดในการแบ่งพลังงานด้วย waveguide ยังมีตัวแปรสำคัญมากๆที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วยก็คือเรื่องของ load matching เพราะฉะนั้นการหาเทคนิคในการวัดกำลังของ microwave ภายใน cavity ที่มีผลกระทบต่อนอณหภูมิในน้อยที่สุด หรือไม่มีเลยเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณา

ในการดำเนินการในระยะสุดท้ายก่อนจะสิ้นสุดสัญญา TDO ได้จัดทำ electrical feed-through และเตรียมพัฒนา pressure gauge ขึ้นมาใช้เอง พร้อมกันนี้ได้เตรียม faraday cup สำหรับจะวัด ion current ไปด้วยแล้ว ซึ่งจากที่กล่าวมาในช่วงต้นผู้วิจัยมีเจตนาที่ต้องการจะดำเนินการวิจัยต่อจากสถานะในปัจจุบันซึ่งยังไม่ถึงขบวนการในการแยกเอา ion ออกมาก่อนที่จะเกิด recombination กันกับ electron ซึ่งเป็นงานที่ท้าทายและน่าสนใจอย่างที่สุด โดยระยะยาวเพื่อไปสู่เป้าหมายตามที่ที่ปรึกษาโครงการได้วางไว้ว่าเป็นต้องพัฒนา low power consumption ion source ขึ้น ซึ่งในระยะแรกที่ต้องใช้ magnetron มาเป็น source ก็เพื่อเป็นการสำรวจแนวความคิดต่างๆเพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่จัดเป็น serious factor และหลังจากนี้จึงต้องเลือก source ที่มีกำลังวัดต่ออยู่ในช่วงที่ต้องการเพื่อนำมาพัฒนา ion source ตามวัตถุประสงค์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คร.วราวุฒิ เถาลัดดา และ อาจารย์สุรพล รักวิชัย เป็นอย่างสูงที่ได้
อนุเคราะห์อุปการณณ์และเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยมา ณ. ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- 1 W.Tantraporn ,“A new design concept for high current , high brightness and scanable ion beam”, Feb.6 1998.
- 2 Feynman, Leighton, Sands, “Lectures on Physics”, Volume 1 and 2 , Addison Wesley .
- 3 J.D.Jackson , “Classical Electrodynamics (second edition) ”, John Wiley & Sons , 1975

สรุปผลการดำเนินงานวิจัยในช่วง Phase 1A

การดำเนินงานวิจัยระยะที่ 1 (สิงหาคม 2541 – มกราคม 2542)

1. ได้ดำเนินการค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดไอออนและระบบไฟฟ้าต่ำไอออน^{*} รวมทั้งศึกษาระบบ Ion - Milling Machine ที่ใช้ในงาน Microelectronics[†]
2. ได้เน้นศึกษาทำวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท 2 คน[‡] เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 ปี มีนักศึกษาออกจากโครงการวิจัย 1 คน จึงมีนักศึกษาช่วยงานวิจัยและทำวิทยานิพนธ์กับโครงการเพียง 1 คน คือนางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ขณะนี้อยู่ในขั้นตอนการเขียนวิทยานิพนธ์ในหัวข้อ “Study of Hollow Cathode Magnetron Ion Source” คาดว่าจะจบการศึกษาระดับปริญญาโทในเดือนมีนาคม ศกนี้
3. ได้ศึกษาและออกแบบ ระบบสุญญากาศ ระบบควบคุมกำลังและ Microwave Ion Source
4. จัดซื้ออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับระบบสุญญากาศ
5. ศึกษาเทคนิคการวัดกระแสและขนาดของลำไอออน

การดำเนินงานวิจัยระยะที่ 2 (กุมภาพันธ์ 2542 – กรกฎาคม 2542)

1. ได้แบบทางวิศวกรรมของ Vacuum chamber, Faraday cup และ Plasma chamber เพื่อการจัดสร้าง
2. จัดสร้างและประกอบระบบสุญญากาศ
3. ทดสอบการรั่วและปรับปรุงแก้ไขจนสามารถทำความดันได้ในระดับ 10^{-7} mbar[§]
4. สร้าง plasma chamber ของแหล่งกำเนิดไอออนชนิด HOCAM
5. ทดสอบการรั่วและปรับปรุงแก้ไขจนสามารถใช้งานได้
6. สร้างและทดสอบสนามแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดไอออนจนสามารถใช้งานได้
7. ได้แบบทางวิศวกรรมของส่วนประกอบต่างๆ ของแหล่งกำเนิดไอออนชนิด HOCAM รวมทั้งระบบ extraction และระบบไฟฟ้าเพื่อการจัดสร้าง
8. ออกแบบ จัดสร้างและทดสอบระบบสุญญากาศของ Microwave Ion Source

^{*} รายงานความก้าวหน้าผลการวิจัยระยะที่ 1 เอกสารแนบ 1 หน้า 6-18

[†] 41st and 42nd International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication, JVST B, Vol. 15-16, 1997-1998

[‡] รายงานความก้าวหน้าผลการวิจัยระยะที่ 1 เอกสารแนบ 1 หน้า 19-20

[§] รายงานความก้าวหน้าผลการวิจัยระยะที่ 2 การทดสอบระบบสุญญากาศ

การดำเนินงานวิจัยระยะที่ 3 (สิงหาคม 2542 – มกราคม 2543)

1. ศึกษา ออกแบบ และจัดสร้าง Microwave Ion Source
2. สร้างแหล่งกำเนิดไอออนชนิด HOCAM สำเร็จทั้งระบบ
3. ออกแบบและสร้างระบบการวัดกระแสไอออน discharge current และ discharge voltage ด้วยระบบคอมพิวเตอร์

4. ทดสอบการใช้งานแหล่งกำเนิดไอออน

5. แก้ไขปัญหาความเสียหายของแหล่งกำเนิดไอออนที่เกิดจากความร้อนและการ sputtering สำเร็จบางส่วน

6. ทดสอบการใช้งานแหล่งกำเนิดไอออนที่ได้รับการแก้ไขแล้ว

การดำเนินงานวิจัยระยะที่ 4 (กุมภาพันธ์ 2543 – กรกฎาคม 2543)

1. แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นต่อโดยการปรับปรุงระบบและออกแบบใหม่บางส่วน
2. ทดสอบการใช้งานต่อ
3. แก้ไขปัญหาอายุการใช้งานสั้นโดยการเปลี่ยนวัสดุของ CMC ใหม่
4. ทดสอบการใช้งานพบว่าสามารถใช้งานได้ประมาณ 80 – 100 ชั่วโมง
5. ได้แหล่งกำเนิดพลาสมาที่สามารถใช้งานได้
6. ทำการทดสอบเพื่อหาสาเหตุของการลดลงของ discharge current
7. ผลการทดลองพบว่าเกิดจากอุณหภูมิของก๊าซ
8. ศึกษาผลของความดันและสนามแม่เหล็ก โดยการวัด I-V characteristic
9. ศึกษา ระบบ extraction ด้วยวงจรต่าง ๆ 7 แบบ
10. ศึกษา ระบบโพกัสลำไอออนเบื้องต้น
11. ดำเนินสร้าง Microwave ion source ต่อ
12. ทดสอบและเก็บข้อมูลการเกิดพลาสมาใน Microwave ion source

การดำเนินงานวิจัยระยะที่ 5 (กรกฎาคม 2543 – มกราคม 2544)

1. ได้ดำเนินการพัฒนากระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงโอออนของ HOCAM ion source โดยการลดระยะระหว่าง plasma source กับระบบ extraction ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขึ้นถึงมากกว่า 250 เท่า ตลอดจนศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระแสโอออน อันได้แก่ ผลของสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นเรื่องใหม่ที่ยังไม่เคยได้ศึกษามาก่อน ทำให้ทราบว่าสนามแม่เหล็กมีส่วนช่วยในการเพิ่มกระแสโอออนได้
2. การศึกษาระบบ extraction ของ microwave ion source ได้ออกแบบระบบ extraction อย่างง่าย ประกอบด้วยแผ่นโลหะเจาะรูขนาด 0.5 mm และ 1 mm และใช้ตะแกรงสแตนเลสเป็นตัววัดโอออน สามารถวัดกระแสโอออนได้ประมาณ 1 mA
3. การศึกษาระบบไฟฟ้าล้าโอออนเพิ่มเติมไม่สามารถดำเนินการได้ในการวิจัยระยะที่ 5 นี้ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการพัฒนาระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในข้อ 1 มากกว่าที่วางแผนงานไว้ค่อนข้างมาก จึงยังไม่สามารถศึกษาระบบไฟฟ้าเพิ่มเติมได้
4. การศึกษาและวัดขนาดของล้าโอออนก็ไม่สามารถดำเนินการได้เช่นกัน เนื่องจากเป็นงานที่ต่อเนื่องจากการพัฒนาระบบไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของล้าโอออนอยู่บ้าง ได้แก่ จากการทดลองในข้อ 5 ผลของ extraction voltage ต่อกระแสโอออน ทำให้ทราบว่าล้าโอออนจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นตามขนาดของ extraction voltage ที่เพิ่มขึ้น และล้าโอออนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 mm ที่ระยะประมาณ 10 mm จาก extraction electrode ขั้วแรก เมื่อใช้ extraction voltage ประมาณ 50 V

ปัญหาและอุปสรรค

ปัญหาและอุปสรรคที่ทำให้การดำเนินงานวิจัยตั้งแต่ระยะที่ 2 ถึงระยะที่ 4 ส่วนมากไม่ซับซ้อนตรงกับแผนงานที่วางไว้แต่ต้น เช่น ตามแผนงานวางไว้ การดำเนินงานในระยะที่ 2 เป็นการเริ่มศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนที่สร้างขึ้นแล้ว แต่ในทางปฏิบัติงานส่วนใหญ่เป็นการสร้าง ทดสอบและปรับปรุงระบบสุญญากาศเนื่องจากผู้รับสร้าง Vacuum chamber ในประเทศไทยส่วนมากไม่มีประสิทธิภาพมาก่อนหรือมีประสิทธิภาพน้อย เมื่อสร้างเสร็จแล้วจึงต้องมีการปรับปรุงอีกหลายครั้ง จึงไม่สามารถดำเนินการตามแผนงานสำหรับระยะที่ 2 ได้

นอกจากนี้ในแผนงานระยะที่ 2 กล่าวถึงการเจาะรูแผ่นแก้วของแหล่งกำเนิดไอออน 1 รู ถึง 16 รู แต่ในทางปฏิบัติได้มีการดัดแปลงเป็นใช้แผ่นสเตนเลสแทนแก้ว เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายกว่า จากนั้นจึงศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนที่มีรูเพียง 1 รู และเมื่อทดสอบแหล่งกำเนิดไอออนเป็นครั้งแรกในงานวิจัยระยะที่ 3 ก็พบปัญหาและอุปสรรคที่ต้องแก้ไขมากมาย ดังได้กล่าวในรายงานผลการวิจัยข้างต้น เช่น ปัญหาความเสียหายที่เกิดจากความร้อนและการ sputtering ปัญหาอายุการใช้งานสั้นและปัญหาการไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดไอออน เป็นต้น ปัญหาเหล่านี้ได้รับการศึกษาถึงสาเหตุและได้แก้ไขจนสำเร็จลุล่วง แต่ต้องทุ่มเทเวลาส่วนใหญ่ไปกับการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ จนทำให้มีเวลาเหลือในการศึกษาระบบโฟกัสลำไอออน ซึ่งควรต้องมีการศึกษาพอสมควร ดังได้กล่าวในรายงานผลการวิจัย หัวข้อการศึกษาระบบโฟกัสลำไอออน ซึ่งควรต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกมาก แต่ไม่สามารถศึกษาระบบกวาดลำไอออนและทดสอบการเจาะรูตามแผนงานในระยะที่ 3 และ 4 ได้

อย่างไรก็ตาม การที่ได้ศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิด HOCAM อย่างละเอียด ตลอดจนปรับปรุงออกแบบระบบจนได้แหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพ มีอายุการใช้งานนานพอสมควรและสร้างได้จากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ สามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนทั้งชนิด HOCAM และชนิดอื่นๆ ต่อไปนี้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดไอออนสำหรับการศึกษาและพัฒนาระบบโฟกัสและระบบการกวาดลำไอออนต่อไปได้