

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวัดพารามิเตอร์ของพลาสติกด้วยหัววัดแบบแสงมัวร์



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

62301

- 8 ส.ค. 2549

b.....
116 20067
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement of Plasma Parameters using Langmuir Probe



Mr.Panumard Thammavet

Miss. Leeda Mitrayon

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Bachelor
of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัดแบบแสงมัวร์
นักศึกษา นายภาณุมาศ ธรรมเวช
 นางสาวลลิตา มิตรายน
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ – เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
 ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ดร.ปิติพร ถนอมงาม	    
กรรมการ	ผศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม	
กรรมการ	รศ.วิษณุ เพชรภา	
กรรมการที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชะดิริระ)
 หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัดแบบแสงมัวร์
นักศึกษา	นายภาณุมาศ ธรรมเวช นางสาวลีดา มิตราชน
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วรวิทย์ เถาถัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้นำเสนอการวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัดแสงมัวร์ แหล่งกำเนิดพลาสมานิคครุ่นด้วยไมโครเวฟถูกสร้างขึ้นโดยการกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ผ่านท่อนำคลื่นขนาด WR 340 ในโหมด TE₁₀₆ เพื่อให้ก๊าซอาร์กอนในท่อแก้วควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่ความดัน 8×10^{-4} มิลลิบาร์ แตกตัวเป็นพลาสมา หัววัดแสงมัวร์ที่สร้างขึ้นในเส้นลวดทั้งสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ยาว 4.5 มิลลิเมตร หัววัดแสงมัวร์ที่ติดกับชุดขับเคลื่อนเชิงเส้นจะถูกสอดผ่านเข้าสู่ห้องสุญญากาศเมื่อวัดพารามิเตอร์ของพลาสมา โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัววัดและกระแส จะสามารถวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของพลาสมาได้แก่ อุณหภูมิอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ศักย์พลาสมาและศักย์ลอยได้จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มกำลังของคลื่นไมโครเวฟจาก 55 วัตต์เป็น 62 วัตต์ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะเพิ่มจาก $7.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ในขณะที่อุณหภูมิอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจาก 4.3eV เป็น 4.8eV

Special Project Title	Measurement of Plasma Parameters using Langmuir Probe
Name	Mr.Panumard Thammavet Miss. Leeda Mitrakon
Department	Applied Physics
Program	Applied Physics – Science and Industry Instrumentation Applied Physics
Academic Year	2005
Special Project Advisor	Asst.Prof.Dr. Warawoot Thowladda
Special Project co-advisor	Miss S.Tipawan Khalayboonme

ABSTRACT

This special project proposes a measurement and analysis of plasma parameters by Langmuir probe. Microwave induced plasma was generated by coupling 2.45 GHz magnetron directly to WR340 waveguide in TE₁₀₆ mode. The Plasma discharge quartz tube of 10 mm diameter was inserted into the waveguide, perpendicular to its wide wall, at a $\lambda_g/4$ distance from its short-circuited end. Microwave plasma discharge was sustained at argon pressure of 8×10^{-4} mbar. A langmuir probe was made of 0.5 mm diameter and 4.5 mm long tungsten wire. The Langmuir probe was mounted on liner translator and inserted into the vacuum chamber for measuring plasma parameters by measuring the I-V curve of plasma. From the I-V curve, electron temperature, electron density, plasma potential and floating potential could be determined. The experiment showed that electron density increased from $7.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ to $8.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ as a microwave power increased from 55 W to 62 W while electron temperature decreased from 4.8 eV to 4.3 eV

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายๆท่าน
ด้วยกันดังต่อไปนี้

ครอบครัว	ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน และ ให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดจน สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาวัลย์ดา	ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผู้ที่ช่วยแนะแนวทั้งความรู้และให้คำปรึกษา ตลอดจนอนุเคราะห์อุปกรณ์และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ตลอดทั้งโครงการทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
อ.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	ผู้ช่วยที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยดูแลให้คำแนะนำอธิบายทั้ง ความรู้ และวิธีการปฏิบัติงานตลอดจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี
พี่แหลม	ที่ปรึกษาด้านฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และการเขียน โปรแกรมเพื่อควบคุม การใช้งานตลอดทั้งโครงการพิเศษนี้
พี่อมร	ที่ช่วยเป็นที่ปรึกษาด้านการทดลองตลอดจนอธิบายและให้ข้อมูล ต่างๆอีกทั้งยังช่วยเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง
พี่เดี่ยว	ที่คอยแนะนำและให้คำปรึกษาทางทฤษฎีและการเตรียมเครื่องมือใน การทดลอง
พี่ๆทุกคนในห้อง Lab	โดยเฉพาะพี่คะ พี่เก พี่อ้อและพี่เจีย ที่ให้คำแนะนำและให้ความ สะดวกในการทดลองตลอดโครงการ ที่กรุณาหาอุปกรณ์ต่างๆทำให้ พวกเราทำการทดลองสำเร็จไปได้ด้วยดี
เพื่อนๆคึกวิทยาศาสตร์เก่า	ที่คอยช่วยเหลือโครงการเป็นอย่างดีเพื่อให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
เพื่อนๆทุกคน	ที่ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอคุณพระศรีรัตนตรัยจงบันดาลให้ท่านทั้งหลายจงประสบแต่ความสุขตลอดไป

นายภาณุมาศ ธรรมเวช

นางสาวลีดา มิตรายน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ	5
2.2 นิยามของพลาสมา	5
2.3 แหล่งกำเนิดพลาสมา	6
2.4 ส่วนประกอบสำคัญสำหรับการสร้างพลาสมา	13
2.5 สมบัติของพลาสมา (Plasma Properties)	18
2.6 หัววัดแลงมัวร์ (Langmuir Probe)	24

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ และ หัววัดแลงมัวร์	31
3.2 การสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่น ไมโครเวฟ	31
3.3 การสร้างอุปกรณ์สลับขั้วไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟสำหรับหัววัดแลงมัวร์	32
3.4 การสร้างหัววัดแลงมัวร์	34
3.5 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบวัดพารามิเตอร์ของพลาสมา	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	37
3.7 การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัดแสงมัลติ	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาจากกราฟ	47
4.2 การศึกษาผลของกำลังของคลื่นไมโครเวฟต่อพารามิเตอร์ของพลาสมา	52
4.3 การศึกษาพารามิเตอร์ของพลาสมาที่ขึ้นกับตำแหน่ง	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการวิจัย	84
เอกสารอ้างอิง	85
ภาคผนวก ก	88
ภาคผนวก ข	87

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการทำงาน (Gantt chart)	3
ตารางที่ 2.1 ขนาดมาตรฐานของท่อนำคลื่นชนิดสี่เหลี่ยม	15
ตารางที่ 2.2 ช่วงความถี่ของ Stub tuner ชนิด double-stub และ triple-stub	17
ตารางที่ 4.1 แก๊ซอาร์กอนที่กำลัง 55 วัตต์(ความดัน 8×10^{-4} mbar)	52
ตารางที่ 4.2 แก๊ซอาร์กอนที่กำลัง 57 วัตต์(ความดัน 8×10^{-4} mbar)	55
ตารางที่ 4.3 แก๊ซอาร์กอนที่กำลัง 60 วัตต์(ความดัน 8×10^{-4} mbar)	58
ตารางที่ 4.4 แก๊ซอาร์กอนที่กำลัง 61 วัตต์(ความดัน 8×10^{-4} mbar)	61
ตารางที่ 4.5 แก๊ซอาร์กอนที่กำลัง 62 วัตต์(ความดัน 8×10^{-4} mbar)	64
ตารางที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ที่กำลังจ่ายให้กับแมกนีตรอนค่าต่างๆ	67
ตารางที่ 4.7 Ar Plasma ที่ระยะขจัด -2 มิลลิเมตร	68
ตารางที่ 4.8 Ar Plasma ที่ระยะขจัด -1 มิลลิเมตร	71
ตารางที่ 4.9 Ar Plasma ที่ระยะขจัด 0 มิลลิเมตร	74
ตารางที่ 4.10 Ar Plasma ที่ระยะขจัด +1 มิลลิเมตร	77
ตารางที่ 4.11 Ar Plasma ที่ระยะขจัด +2 มิลลิเมตร	80
ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กตรอน กับการขจัดของหัววัด	83

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงาน	5
รูปที่ 2.2 การชนกันของอิเล็กตรอนและอะตอม	8
รูปที่ 2.3 กำแพงศักย์ที่ลดต่ำลงเนื่องจากสนามภายนอก	11
รูปที่ 2.4 การแตกตัวเป็นไอออนโดยกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ	12
รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแมกเนตรอน	14
รูปที่ 2.7 สตัปจูนเนอร์แบบสำหรับท่อนำคลื่นชนิด WR-340	16
รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมของลำอนุภาครัศมีขนาด r_2 ตกกระทบกับ โมเลกุลแก๊ส	18
รูปที่ 2.9 บริเวณส่วนที่เป็นพลาสมาซีท	23
รูปที่ 2.10 แผนภาพของหัววัดแสงมัวร์ชนิดเดี่ยว	25
รูปที่ 2.11a แผนภาพการเคลื่อนที่ขณะเร่งดันตกคร่อมหัววัดมีค่าเป็นบวก	26
รูปที่ 2.11b แผนภาพการเคลื่อนที่ขณะเร่งดันตกคร่อมหัววัดมีค่าเป็นลบ	26
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของหัววัดแสงมัวร์ชนิดเดี่ยว	27
รูปที่ 2.13 กราฟ I-V อุณหภูมิ กราฟทางด้านซ้ายเพิ่มขึ้นเป็น 10 เท่า กระแสไอออน	28
รูปที่ 3.1 แผนภาพการเกิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ	31
รูปที่ 3.2 พลาสมาที่เกิดขึ้นภายในหลอดแก้วควอทซ์	32
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์สลับขั้วแหล่งจ่ายไฟ	32
รูปที่ 3.4 วงจรอุปกรณ์สลับขั้วแหล่งจ่ายไฟ	33
รูปที่ 3.5 หัววัดแสงมัวร์ชนิดขั้วโลหะทั้งสแต	33
รูปที่ 3.6 ระบบการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ	34
รูปที่ 3.7 แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ	37
รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอน	37
รูปที่ 3.9 เครื่องรักษาอุณหภูมิชนิดใช้น้ำ	38
รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์ระบบพลาสมา	39
รูปที่ 3.11 ชุดอุปกรณ์ระบบสุญญากาศ	39
รูปที่ 3.12 ปีมโรตารี	40

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 ปีมเตอร์โบโมเลกุลาร์	40
รูปที่ 3.14 เกจวัดความดัน	40
รูปที่ 3.15 ชุดควบคุมระบบสุญญากาศ	41
รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ตรวจสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ	41
รูปที่ 3.17 หัววัดแสงมัวร์	42
รูปที่ 3.18 แหล่งจ่ายไฟชนิดโปรแกรมได้	42
รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ควบคุมการสลับขั้วแหล่งจ่ายไฟ	43
รูปที่ 3.20 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	43
รูปที่ 3.21 แผนภาพวงจรของระบบการวัด	44
รูปที่ 3.22 รูปไอคอนของ Langmuir Probe Controller	45
รูปที่ 3.23 รูปหน้าจอโปรแกรมของ Langmuir Probe Controller	46
รูปที่ 4.1 การวัดกระแสและแรงดัน	47
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์กระแสและแรงดัน	48
รูปที่ 4.3 กราฟของการเลือกช่วงทรานซิชัน	48
รูปที่ 4.4 กราฟระหว่าง $\ln I_e$ กับ แรงดันในช่วง Transition	49
รูปที่ 4.5 กราฟหาความชันระหว่าง $\ln I_e$ กับ แรงดันในช่วง Transition	49
รูปที่ 4.6 กราฟการหาค่าศักย์ของพลาสมา	50
รูปที่ 4.7 ค่าที่ใช้ในการคำนวณ	51
รูปที่ 4.8 กราฟ I-V Characteristic ของ Ar Plasma $6 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ ที่กำลัง 55 วัตต์	54
รูปที่ 4.9 กราฟ I-V Characteristic ของ Ar Plasma $6 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ ที่กำลัง 57 วัตต์	57
รูปที่ 4.10 กราฟ I-V Characteristic ของ Ar Plasma $6 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ ที่กำลัง 60 วัตต์	60
รูปที่ 4.11 กราฟ I-V Characteristic ของ Ar Plasma $6 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ ที่กำลัง 61 วัตต์	63
รูปที่ 4.12 กราฟ I-V Characteristic ของ Ar Plasma $6 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ ที่กำลัง 62 วัตต์	66
รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ที่กำลังจ่ายให้กับแมกนีตรอนค่าต่างๆ	67
รูปที่ 4.14 กราฟ I-V Characteristic ของ Ar Plasma ที่ระยะขจัด -2 มิลลิเมตร	70
รูปที่ 4.15 กราฟ I-V Characteristic ของ Ar Plasma ที่ระยะขจัด -1 มิลลิเมตร	73
รูปที่ 4.16 กราฟ I-V Characteristic ของ Ar Plasma ที่ระยะขจัด 0 มิลลิเมตร	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 กราฟ I-V Characteristic ของAr Plasma ที่ระยะขจัด 1 มิลลิเมตร	79
รูปที่ 4.18 กราฟ I-V Characteristic ของAr Plasma ที่ระยะขจัด 1 มิลลิเมตร	82
รูปที่ 4.19 รูปแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่น ของอิเล็กตรอนกับการขจัดของหัววัด	83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลาสมา (plasma) คือ สถานะที่สี่ของสสารโดยเกิดจากการให้พลังงานแก่อะตอมก๊าซที่เป็นกลาง จนเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา โดยปกติแล้วเมื่อทำการเพิ่มพลังงานให้กับสสารที่อยู่ในสถานะของแข็งจนถึงจุดหลอมเหลวจะทำให้ของแข็งกลายเป็นของเหลว จากของเหลวแล้วทำการเพิ่มพลังงานจนเปลี่ยนสถานะไปเป็นก๊าซ และในที่สุดเมื่อทำการเพิ่มพลังงานไปกระตุ้นจะทำให้อะตอมของก๊าซที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนประจุบวกที่เรียกว่า “พลาสมา”¹ โดยปกติแล้ววิธีการกระตุ้นให้อะตอมของก๊าซที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave induced plasma) ที่ความถี่ 2.45 GHz มาทำการสร้างพลาสมา และในกระบวนการสร้างพลาสมาขึ้นมานั้นมีความจำเป็นที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของพลาสมา

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาคือ อุณหภูมิของพลาสมา (plasma temperature) และ ความหนาแน่นของพลาสมา (plasma density) ด้วยหัววัดพารามิเตอร์ของพลาสมาชนิด แลงมัวร์ (Langmuir probe) หรืออีกชื่อหนึ่งคือหัววัด อิเล็กโตรสแตติก (electrostatic probe) ซึ่งหัววัดจะมีลักษณะเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติทนต่อความร้อนสูงและมีค่าสปีดเทอเรียลด์ (sputter yield) ต่ำ สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ได้โดยตรงในบริเวณที่เกิดพลาสมา จึงเป็นข้อดีในการวัดด้วยวิธีชนิดนี้

ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและประยุกต์ใช้งานพลาสมากันอย่างกว้างขวาง อาทิ เช่น การเคลือบ (coating) และการปรับปรุง (treatment) ผิวหน้าวัสดุให้มีคุณสมบัติต่างๆ อย่างเช่น ทนต่อความร้อนสูง เพิ่มสมบัติกันน้ำ (hydrophobic) จากการสร้างโพลิเมอร์โดยพลาสมา (plasma polymerizations)² และที่ใช้ประโยชน์จากพลาสมาอย่างมากในอุตสาหกรรมเชื่อมหรือตัดแผ่นโลหะ และในอนาคตจะมีการใช้ประโยชน์อย่างมากมาไม่ว่าจะเป็น การใช้พลาสมาช่วยในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์หรือการนำพลาสมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจะเป็นการใช้ทรัพยากรต่างๆให้คุ้มค่าที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟ
2. เพื่อทำการสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ
3. เพื่อทำการออกแบบและสร้างหัววัดชนิดแลงมัวร์ สำหรับใช้ในการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมา
4. เพื่อศึกษาและทำการวัดความหนาแน่นและอุณหภูมิของอนุภาคในพลาสมาด้วยหัววัดแลงมัวร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับขอบเขตในการศึกษาของโครงการนี้สามารถแบ่งได้เป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

1.3.1 ส่วนของทฤษฎี เป็นการศึกษาทฤษฎีและหลักการของการกำเนิดพลาสมาโดยวิธีกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ (MIP) นอกจากนี้ยังต้องทำการศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของหัววัดพารามิเตอร์ของพลาสมาชนิดแลงมัวร์ซึ่งหัววัดนี้ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิและความหนาแน่นของอนุภาคในพลาสมา

1.3.2 ส่วนของเทคนิคการวัด วิธีการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมานั้นมีอยู่ด้วยกันหลายเทคนิค สำหรับโครงการพิเศษนี้จะใช้วิธีการวัดหัววัดชนิดแลงมัวร์ซึ่งวิธีการนี้จะบ่งบอกได้ถึงอุณหภูมิและความหนาแน่นของอนุภาคที่มีอยู่ในพลาสมา โดยจะทำการวิเคราะห์ได้จากกราฟความ สัมพันธ์ระหว่างกระแสและโวลเตจ

1.3.3 ส่วนของผลและการสรุป เป็นส่วนที่ทำการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดชนิดแลงมัวร์ที่ทำการสร้างขึ้น พร้อมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและโวลเตจเพื่อทำการหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและไอออน และความหนาแน่นของทั้งอิเล็กตรอนและไอออนที่มีอยู่ในพลาสมา

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ	2548										2549	
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.ค.	ม.ค.		
1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของงานวิจัย	↕											
2. ทำการสร้างและทดสอบระบบ		↕										
3. ทำการทดลองและจัดเก็บข้อมูล				↕								
4. ตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ทั้งหมด							↕					
5. จัดทำเอกสารประกอบ								↕				
6. ตรวจสอบความถูกต้องครั้งสุดท้าย										↕		

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการทำงาน (Gantt chart)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและกระบวนการกำเนิดพลาสติกกระดุนด้วยไมโครเวฟ
2. ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานและองค์ประกอบในการสร้างหัววัดชนิดแลงมัวร์
3. ทำให้ทราบสมบัติของพลาสติกและค่าพารามิเตอร์ต่างๆของพลาสติก
4. ทำให้ได้รับความรู้เพิ่มเติมจากการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆตลอดจนทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้องกับโครงงานพิเศษนี้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านที่เกี่ยวข้องอีกต่อไป
5. เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าหัววัดชนิดแลงมัวร์จากต่างประเทศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

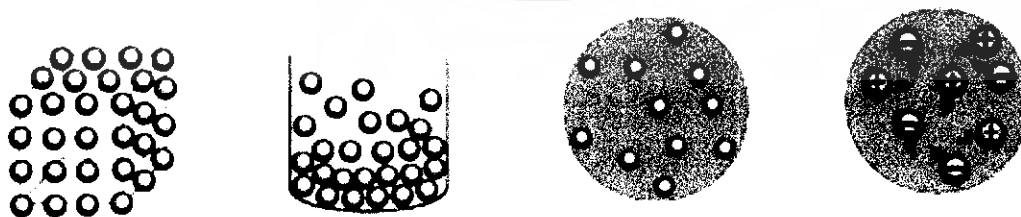
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

พลาสมา(plasma) คือสถานะที่ 4 ของสสาร นั่นคือเมื่อเพิ่มพลังงานให้กับสสารซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ เริ่มจากสสารในสถานะของแข็งจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและจากสถานะของเหลวเป็นแก๊สในที่สุด ถ้ายังให้พลังงานต่อไป อะตอมของแก๊สจะแตกตัวอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม อะตอมจะมีสภาพเป็นไอออน เรียกสถานะนี้ว่า “พลาสมา” โดยทั่วไปอนุภาคอิสระนอกจากจะเป็นอนุภาคที่มีประจุได้แก่อิออนบวก ไอออนลบ อิเล็กตรอนและอะตอมที่เป็นกลางคั่งนั้น อนุภาคในพลาสมาเหล่านี้มีสภาพต่างจากอนุภาคในสถานะแก๊สปกติ โดยที่ปฏิภริยาระหว่างอนุภาคภายในพลาสมาโดยรวมและปฏิภริยาที่มีกับสนามภายนอกจึงต่างไปจากสถานะแก๊สโดยทั่วไป

2.2 นิยามของพลาสมา

พลาสมา คือ แก๊สประหนึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า(quasineutral gas) เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งจะประกอบด้วยอนุภาคประจุบวก ประจุลบ และอนุภาคที่เป็นกลาง โดยแสดงพฤติกรรมร่วม (collective behavior)³ กล่าวคือ เมื่ออนุภาคที่มีประจุในพลาสมาเกิดการเคลื่อนที่อนุภาคเหล่านี้จะสามารถทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุบวกหรือลบในบริเวณหนึ่งๆซึ่งทำให้เกิดสนาม ไฟฟ้าขึ้น นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุยังทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนี้ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุตัวอื่นๆที่อยู่ไกลออกไป พลาสมาเป็นสถานะที่สี่ของสสาร (4th state of matter) คือ ของแข็ง เมื่อได้รับพลังงานที่เพียงพอจะหลอมเหลวเป็น ของเหลว จากของเหลวจะระเหยกลายเป็น แก๊ส และจะสามารถแตกตัวเป็น พลาสมา ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสมา ถูกค้นพบโดย Sir William Crookes ในปี ค.ศ. 1879 ซึ่งพบอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าสามารถเห็นรังสีที่ปล่อยออกมาจากขั้วไฟฟ้าของหลอดบรรจุก๊าซที่มีความดันต่ำ จึงเรียกว่า “cathode rays” ต่อมานักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบล Irving Langmuir ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปลดปล่อยประจุจากขดลวดความร้อน (thermionic emission) และเขาได้นิยามคำว่า พลาสมา คือ ก๊าซที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionized gases) ในปี ค.ศ. 1924

2.3 แหล่งกำเนิดพลาสมา

พลาสมาเกิดขึ้นโดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลางเกิดการแตกตัว ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็นไอออนบริเวณผิวหน้า (surface ionization) การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (photo ionization) และการปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า (field emission) แต่วิธีที่แพร่หลายที่สุดได้แก่ วิธีแก๊สดีสชาร์จ (gas discharge) เมื่อโมเลกุลของแก๊สได้รับพลังงานเพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม ขบวนการนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออน (ionization) เมื่ออัตราการเกิดอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับหรือมากกว่าอัตราการสูญเสีย แสดงว่ามีการแตกตัวเป็นพลาสมาเกิดขึ้น พลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกจากอะตอม เรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (ionization energy) ในกรณีของแข็งได้รับพลังงานแล้วอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของของแข็งนั้นเรียกขบวนการนี้ว่า การปล่อยอิเล็กตรอน (electron emission) และพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดได้ เรียกว่า ฟังก์ชันงาน (work function) การแตกตัวเป็นไอออนและการปล่อยอิเล็กตรอนเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในการสร้างพลาสมา ปรากฏการณ์ทั้งสองสามารถแบ่งตามขบวนการเกิดได้หลายแบบ ดังกล่าวข้างต้น

2.3.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน (ionization by collision)

เมื่ออิเล็กตรอน ไอออน หรือ อะตอมที่เป็นกลางวิ่งด้วยความเร็วค่าหนึ่งเข้าชนกับอะตอมใด ๆ จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน ถ้าหลังการชนอะตอมที่ถูกชนไม่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excitation) หรือไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้จะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ในทางกลับกันถ้าอะตอมของแก๊สที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น หรือ ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้ก็จะเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision)

ในกรณีที่อนุภาคที่เข้าชนเป็นอิเล็กตรอน ถ้าการชนเป็นผลให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การการแตกตัวเป็นไอออนแบบการชนด้วยอิเล็กตรอน (electron

impact ionization) ในกรณีนี้อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม นั่นคือ

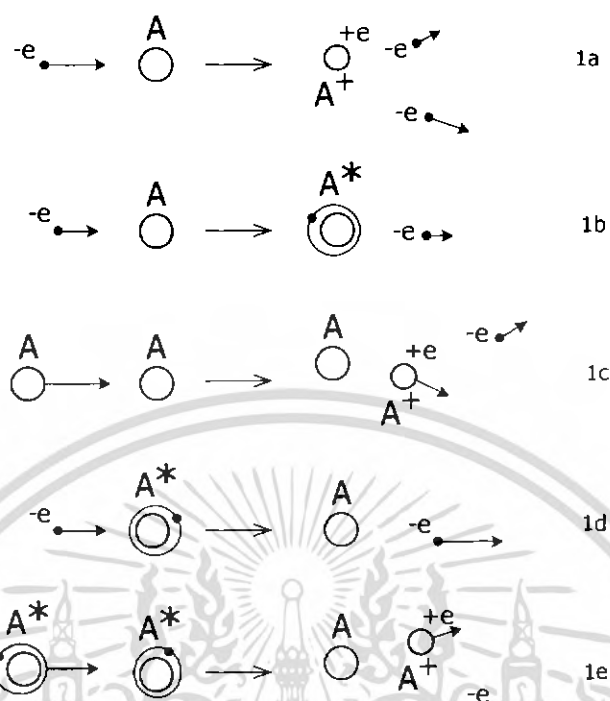
$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.1)$$

เมื่อ m คือ มวลของอิเล็กตรอน
 v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน
 W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

หลังการชนอิเล็กตรอนที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์ลดลง อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมจะมีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.2a ในกรณีการชนแบบนี้พลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอะตอมมีมวลมากเมื่อเทียบกับมวลของอิเล็กตรอน ในบางกรณีอะตอมที่ถูกชนจะไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนเพียงแต่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 2.2b ถ้าก่อนที่อะตอมนี้จะกลับสู่สถานะพื้น (ground state) มีอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งเข้าชนอาจเป็นผลให้อะตอมนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนได้ การแตกตัวเป็นไอออนแบบนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบขั้น (step ionization) กรณีนี้เป็นไปได้เมื่ออิเล็กตรอนที่เข้าชนมีความหนาแน่นสูงและสถานะถูกกระตุ้นของอะตอมเป็นสถานะกึ่งเสถียร (metastable excited state) ซึ่งมีช่วงชีวิต (lifetime) ยาวกว่าสถานะถูกกระตุ้นปกติ

การแตกตัวเป็นไอออนอาจเกิดจากการชนด้วยอะตอมที่เป็นกลางก็ได้ถ้าอะตอมที่เข้าชนมีพลังงานจลน์มากพอ หลังการชนจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัม ทำให้อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ในขณะที่อะตอมที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.2c

ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้ว (เช่น อะตอมหลังถูกชนในรูปที่ 2.2b) หลังจากการชนอะตอมที่ถูกชนจะเป็นกลางและอิเล็กตรอนเข้าชนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.2d แต่ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้วนั้นถูกชนด้วยอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเช่นกัน หลังการชนอะตอมที่เข้าชนจะถ่ายเทพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ให้แก่อะตอมที่ถูกชนทำให้อะตอมที่เข้าชนเป็นกลาง ในขณะที่อะตอมที่ถูกชนจะถูกทำให้แตกตัว ดังรูปที่ 2.2e



รูปที่ 2.2 การชนของอิเล็กตรอนและอะตอม

A คืออะตอมที่เป็นกลาง

A^+ คืออะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน (ไอออนบวก)

A^* คืออะตอมที่สถานะถูกกระตุ้น

2.3.2 การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (photo-ionization)

เมื่ออะตอมดูดกลืนโฟตอนจะส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับต่ำกว่าไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่าและอะตอมนี้จะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนในอะตอมที่ถูกกระตุ้นเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับที่สูงกว่ามายังระดับที่ต่ำกว่าจะปล่อยโฟตอนออกมา กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



เมื่อ

A คือ อะตอมที่เป็นกลาง

A^* คือ อะตอมที่ถูกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าโฟตอนมีพลังงาน $h\nu$ มากพอ ถูกดูดกลืนโดยอะตอมที่เป็นกลาง อะตอมนั้นก็จะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น หรือ เกิดการแตกตัวเป็นไอออนถ้า

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

เมื่อ W คือ ระดับพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้นหรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออน หรืออาจเขียนได้ว่า

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

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

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

ในกรณีที่พลังงานของโฟตอน $h\nu$ มีค่ามากกว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการกระตุ้นอะตอม พลังงานส่วนที่เหลือนั้นอาจถูกปล่อยออกมาในรูปของโฟตอน โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$h(V_1 - V_2) = W_c \quad (2.6)$$

เมื่อ V_1 คือ ความถี่ของโฟตอนที่ถูกดูดกลืน
 V_2 คือ ความถี่ของโฟตอนที่ปล่อยออกมา
 W_c คือ พลังงานที่ต้องใช้ในการกระตุ้นอะตอม

พลังงานส่วนเกินนี้อาจเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกกระตุ้นได้ ในกรณีที่อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนพลังงานส่วนเกินของโฟตอนนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมด้วยวิธีนี้เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)

2.3.3 การปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า (field emission)

สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงพอสามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของโลหะได้ โดยสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปนั้นจะมีผลให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่ผิวโลหะมีค่าลดลง ทำให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง กล่าวคือสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi level) มีโอกาสที่จะสามารถผ่านทะลุกำแพงศักย์ที่ผิวของโลหะออกไปได้ ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การทะลุผ่าน (Tunnel effect)

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

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

ในกรณีที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก ∞ ถึง ตำแหน่ง x พลังงานศักย์ไฟฟ้า W_e ที่ตำแหน่ง x มีค่า

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

ซึ่งแสดงได้ด้วยกราฟไฮเปอร์โบลา ดังกราฟเส้นที่ 1 ในรูปที่ 2.3

ผลของการเร่งอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ป้อนเข้าไปในแนวตั้งฉากกับผิวโลหะจะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง x ใดๆ ดังนี้

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

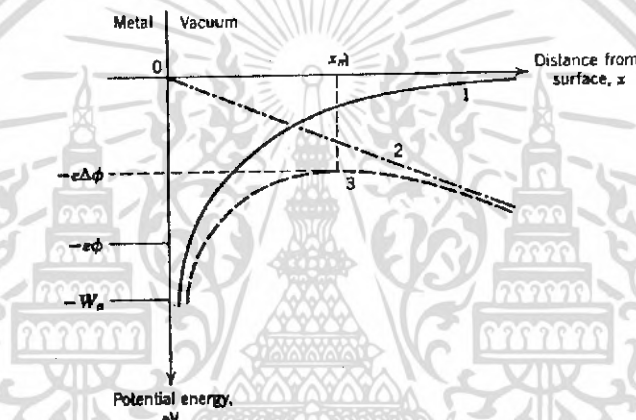
ซึ่งมีลักษณะดังกราฟเส้นที่ 2 ในรูปที่ 2.3 ดังนั้น พลังงานศักย์รวมที่ตำแหน่ง x คือ

$$W_I = W_e + W_E = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x} - eEx \quad (2.10)$$

ดังแสดงด้วยกราฟเส้นที่ 3 ในรูปที่ 2.3

จากรูปที่ 2.3 พบว่าที่ตำแหน่ง x_m ค่าของกำแพงศักย์จะลดลง ΔW ซึ่งเป็นตำแหน่งที่กำแพงศักย์มีค่าต่ำสุด ดังนั้นเราสามารถหาจุด x_m ได้จาก

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



รูปที่ 2.3 กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่ลดต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก

- (1) กำแพงศักย์เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก
- (2) กำแพงศักย์จากสนามไฟฟ้าภายนอก
- (3) กำแพงศักย์รวม

ดังนั้นจะได้ว่า

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

แทนค่า x ในสมการ (2.10) ด้วยค่า x_m จะได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3.4 การปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectric emission)

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อแสงที่มีพลังงานที่เหมาะสมตกกระทบยังโลหะแล้วมีอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะนั้น อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)

แสงในย่านอุลตราไวโอเลตจะมีพลังงานมากกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ เมื่อตกกระทบยังผิวของโลหะจะทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาได้และพลังงานส่วนเกินของโฟตอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ซึ่งใช้ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ของไอน์สไตน์ (Einstein's relation) คือ

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - h\nu_0 \quad (2.15)$$

เมื่อ

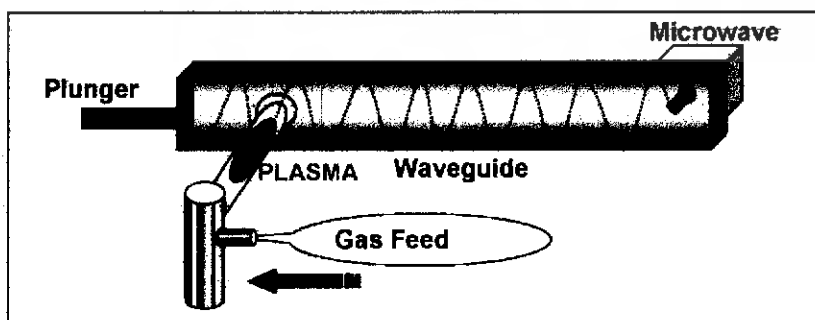
m คือ มวลของอิเล็กตรอน

v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

$h\nu$ คือ พลังงานของโฟตอน

$h\nu_0$ คือ ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ

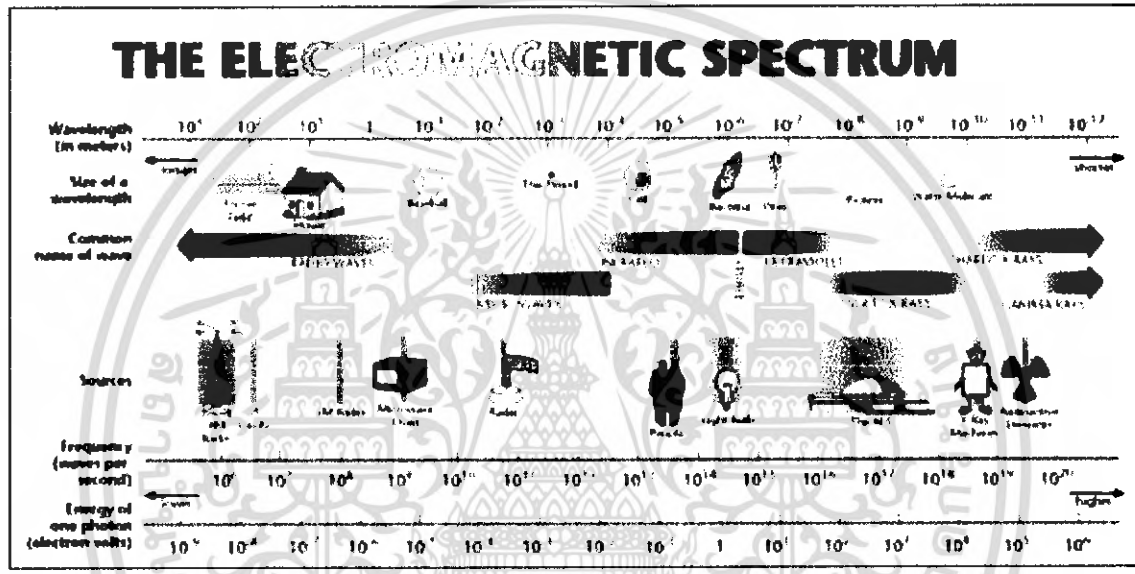
2.3.5 การแตกตัวเป็นไอออนโดยกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave induced Plasma)



รูป 2.4 การแตกตัวเป็นไอออนโดยกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นไมโครเวฟ คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าย่าน อินฟราเรดแต่จะสั้นกว่า ความยาวคลื่นวิทยุ โดยคลื่นไมโครเวฟมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 1 มิลลิเมตร (300 GHz) ถึง 100 เซนติเมตร (0.3 GHz) ซึ่งคลื่นไมโครเวฟแบ่งเป็นสามย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (ultra-high frequency, UHF) มีความถี่ตั้งแต่ 0.3 ถึง 3 GHz ย่านความถี่เอสเอชเอฟ (super high frequency, SHF) มีความถี่ตั้งแต่ 3 ถึง 30 GHz และย่านความถี่อีเอชเอฟ (extremely high frequency, EHF) มีความถี่ตั้งแต่ 30 ถึง 300 GHz ดังรูป



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อก๊าซซึ่งอยู่ภายในหลอดแก้ว ถูกกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเกิด การสะสมพลังงานของอิเล็กตรอนและเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากกว่าพลังงานไอออไนซ์เซชัน (ionization energy) ของอะตอมทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา

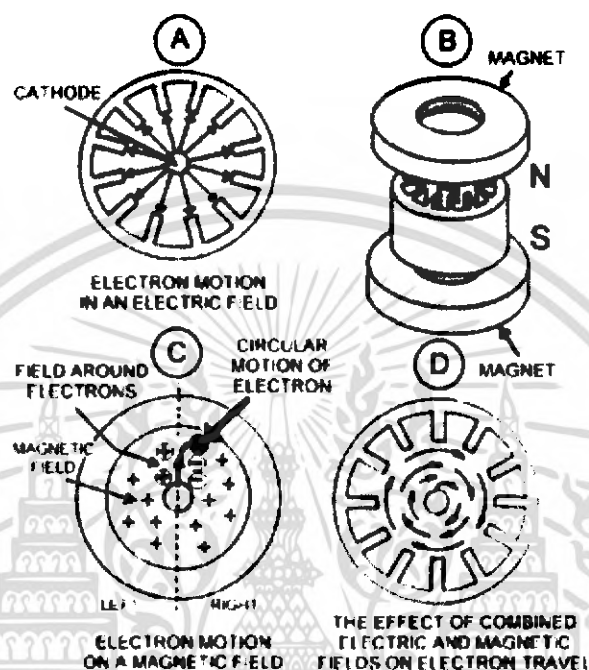
2.4 ส่วนประกอบสำคัญสำหรับการสร้างพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟ

2.4.1 แมกเนตรอน

แมกเนตรอน เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีเอาต์พุตและประสิทธิภาพของพลังงานที่สูง ในขณะเดียวกัน แมกเนตรอนเป็นออสซิลเลเตอร์ที่มีโครงสร้างดัง รูปที่ 2.6 จะประกอบด้วยขั้วแคโทด ซึ่งทำมาจากไส้ร้อน(hot filament) และมีขั้วแอโนดอยู่ล้อมรอบซึ่งต่อเข้ากับขั้วบวกของศักย์ไฟฟ้าค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยระหว่างขั้วทั้งสองจะเป็นพื้นที่ว่าง และมีสนามแม่เหล็กวางอยู่ในแนวแกนกลางตั้งฉากกับทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง อิเล็กตรอนที่หลุดจากขั้วแคโทดและถูกสนามไฟฟ้าดึงไปยังขั้วแอโนดจะได้รับแรงกระทำจากสนามแม่เหล็กทำให้เส้นทางของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไป



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแมกเนตรอน

การทำงานของแมกเนตรอนนั้นจะอาศัยการถ่ายเทพลังงานจลน์จากอิเล็กตรอนให้กับสนามไมโครเวฟ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกมาจากขั้วแคโทดและจะถูกเร่งด้วยแรงดันของขั้วแอโนด โดยมีสนามของคลื่นไมโครเวฟช่วยทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของอิเล็กตรอนขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนบางส่วนจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้น (รับพลังงานจากสนาม) และบางส่วนจะถูกดูดให้มีความเร็วต่ำลง (ถ่ายเทพลังงานให้กับสนาม) และกลุ่มอิเล็กตรอนนี้จะได้รับแรงจากสนามแม่เหล็กและหมุนไปรอบ ๆ แกนของขั้วแคโทด โดยที่เราทำการนำขั้วโลหะสอดเข้าไปซึ่งเรียกว่า antenna เพื่อเอาคลื่นออกมาใช้ผ่านทางท่อนำคลื่น (waveguide)

2.4.2 ท่อนำคลื่น (waveguide)

ท่อนำคลื่น เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เป็นโพรงแบบง่ายซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางภายในท่อนำคลื่นโดยที่สามารถมีสนามในรูปแบบต่างๆ ได้ ซึ่งสนามต่างๆ มีทั้งส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าที่อยู่ในทิศทางของการเคลื่อนที่ ถ้าคลื่นมีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการเคลื่อนที่และมืองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ที่จะถูกเรียกว่า คลื่น TE ส่วนคลื่น TM มีสนามแม่เหล็กในระนาบตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ องค์ประกอบของมีสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ที่ท่อนำคลื่นมีขนาดและรูปร่างต่างๆขึ้นกับช่วงความถี่ที่ใช้งานที่ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดต่างๆและช่วงคามการใช้งานแสดงดังตารางที่ 2.1 ในโครงการพิเศษนี้ใช้ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด WR 340 ส่งผ่านคลื่นในโหมด TE₁₀₆

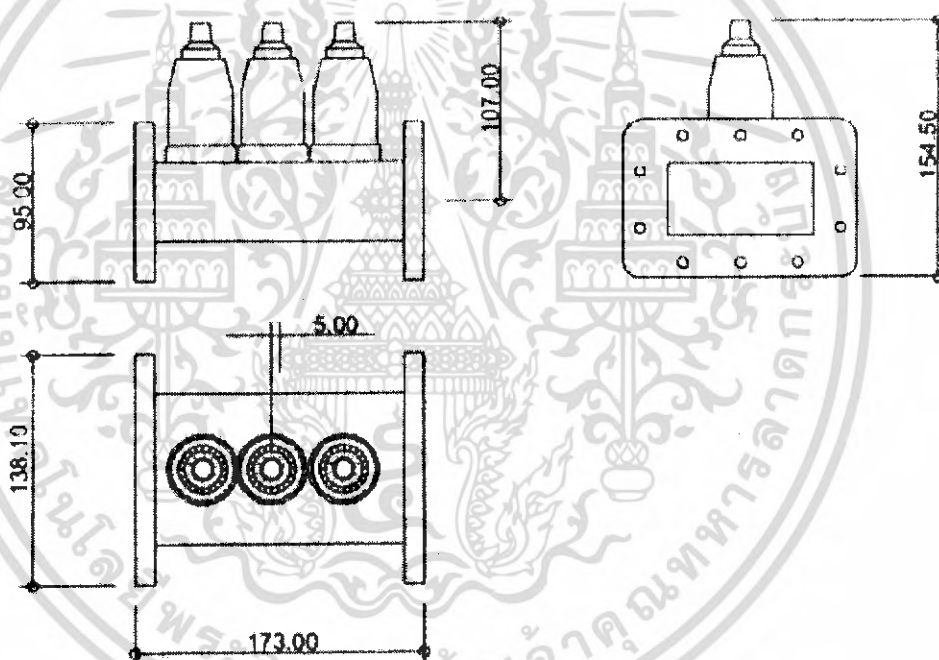
ตารางที่ 2.1 ขนาดมาตรฐานของท่อนำคลื่นชนิดสี่เหลี่ยม

WG Designations	Frequency Range, GHz	Cut-off Freq., GHz	CW Power Rating, (MW)	Attenuation, dB/10m	Internal Dimensions	
					Inches	mm approx
WR2300	0.32~0.49	0.256	153.0~212.0	0.017~0.010	23.0×11.5	584.0×292.0
WR2100	0.35~0.53	0.281	120.0~173.0	0.018~0.011	21.0×10.5	533.0×267.0
WR1800	0.41~0.625	0.328	93.4~131.9	0.019~0.013	18.0×9.0	457.0×229.0
WR1500	0.49~0.75	0.393	67.6~93.3	0.023~0.017	15.0×7.5	381.0×191.0
WR1150	0.64~0.96	0.513	35.0~53.8	0.043~0.025	11.5×5.75	292.0×146.0
WR975	0.75~1.12	0.605	27.0~38.5	0.046~0.032	9.75×4.875	248.0×124.0
WR770	0.96~1.45	0.766	17.2~24.1	0.067~0.045	7.7×3.85	196.0×98.0
WR510	1.45~2.20	1.157	7.5~10.7		5.1×2.55	131.0×65.0
WR430	1.70~2.60	1.372	5.2~7.5	0.196~0.128	4.3×2.15	109.0×55.0
WR340	2.20~3.30	1.736	3.1~4.5	0.292~0.191	3.4×1.7	86.0×43.0
WR284	2.60~3.95	2.078	2.2~3.2	0.367~0.251	2.84×1.34	72.14×34.04
WR229	3.30~4.90	2.577	1.6~2.2		2.29×1.145	58.17×29.08
WR187	3.95~5.85	3.152	1.4~2.0	0.693~0.373	1.872×0.872	47.55×22.15
WR159	4.90~7.05	3.711	0.79~1.0		1.59×0.795	40.39×20.19
WR137	5.85~8.20	4.301	0.56~0.71	0.957~0.767	1.372×0.622	34.85×15.80
WR112	7.05~10.0	5.259	0.35~0.46	1.37~1.07	1.122×0.497	28.50×12.60
WR90	8.20~12.40	6.557	0.20~0.29	2.15~1.49	0.9×0.4	22.86×10.16
WR75	10.0~15.0	7.868	0.17~0.23		0.75×0.375	19.05×9.53
WR62	12.4~18.0	9.486	0.12~0.16	3.17~2.77	0.622×0.311	15.80×7.90
WR51	15.0~22.0	11.574	0.080~0.107		0.510×0.255	12.95×6.48
WR42	18.0~26.5	14.047	0.043~0.058	6.90~4.93	0.420×0.170	10.67×4.32
WR34	22.0~33.0	17.328	0.034~0.048		0.340×0.170	8.66×4.32
WR28	26.5~40.0	21.081	0.022~0.031	7.3~5.0	0.280×0.140	7.11×3.56
WR22	33.0~50.0	26.342	0.014~0.020	0.224~0.112	0.224×0.112	5.69×2.84
WR19	40.0~60.0	31.357	0.011~0.015		0.188×0.094	4.78×2.39
WR15	50.0~75.0	39.863	0.0063~0.0090		0.148×0.074	3.76×1.88
WR12	60.0~90.0	48.350	0.0042~0.0060		0.122×0.061	3.10×1.55
WR10	75.0~110.0	59.010	0.0030~0.0041		0.100×0.050	2.54×1.27
WR8	90.0~140.0	73.840	0.0018~0.0026	51.33	0.080×0.040	2.03×1.02
WR7	110.0~170.0	90.840	0.0012~0.0017	54.46	0.065×0.0325	1.7×0.82
WR5	140.0~220.0	115.75	0.00071~0.00107	103.64	0.051×0.0255	1.3×0.65
WR4	170.0~260.0	131.520	0.00052~0.00075	128.85	0.043×0.0215	1.1×0.55
WR3	220.0~325.0	173.280	0.00035~0.00047	171.116	0.034×0.017	0.87×0.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 สตัปจูนเนอร์(stub tuner)

สตัปจูนเนอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทำหน้าที่ปรับอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นให้เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของโหลด (ซึ่งในที่นี้คือพลาสมา) เพื่อให้สามารถส่งผ่านกำลังจากแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (แมกเนตรอน) ไปยังพลาสมาได้สูงสุด สตัปจูนเนอร์ประกอบด้วยแท่งโลหะ 1 ถึง 3 แท่งสอดในทิสตังฉากเข้าไปในท่อนำคลื่น โดยแท่งโลหะเหล่านี้สามารถปรับความลึกของส่วนที่สอดเข้าไป ท่อนำคลื่นได้ สตัปจูนเนอร์สามารถปรับอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นได้โดยการปรับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.7 สตัปจูนเนอร์สำหรับท่อนำคลื่นชนิด WR-340

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.2 ช่วงความถี่ของ Stub tuner ชนิด double-stub และ triple-stub

Type	Frequency Range (GHz)	Connector – Model			Stub Travel		Stub Spacing	
		Type N ¹	7mm ²	SMA ³	Inches	(cm)	Inches	(cm)
Double-Stub	0.2 - 0.5	1778G	2612B7	---	30.00	(76.2)	4.6	(11.7)
	0.4 - 1.0	1778A	2612B1	1719A	15.00	(38.1)	4.6	(11.7)
	0.8 - 4.0	1778B	2612B2	1719B	7.50	(19.1)	2.0	(5.1)
	2.0 - 12.0	1778C	2612B3	1719C	3.00	(7.6)	0.75	(1.9)
	2.0 - 18.0	1778E	---	---	3.00	(7.6)	0.5	(1.3)
	4.0 - 18.0	1778D	2612B4	1719D	1.75	(4.4)	0.5	(1.3)
Triple-Stub	0.2 - 0.5	1878G	2612C7	---	30.00	(76.2)	4.6 (11.7) / 2.0 (5.1)	
	0.4 - 1.0	1878A	2612C1	1819A	15.00	(38.1)	4.6 (11.7) / 2.0 (5.1)	
	0.8 - 4.0	1878B	2612C2	1819B	7.50	(19.1)	1.0 (2.5) / 0.75 (1.9)	
	2.0 - 18.0	1878C	2612C3	1819C	3.00	(7.6)	0.75 (1.9) / 0.5 (1.3)	
	4.0 - 18.0	1878D	2612C4	1819D	1.75	(4.4)	0.75 (1.9) / 0.5 (1.3)	

2.4.4 ปังเกอร์(plunger)

ปังเกอร์เป็นแผ่นโลหะมีขนาดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น ติดตั้งอยู่ที่ปลายด้านตรงข้ามกับแมกเนตรอนของท่อนำคลื่น สามารถเลื่อนเข้าออกได้เพื่อปรับความยาวของ cavity ซึ่งทำให้เกิดการกำหนดที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะทำการคลื่นไมโครเวฟมีกำลังสูงสุดที่ตำแหน่งที่ติดตั้งหลอดพลาสมา

2.4.5 หลอดพลาสมา(plasma tube)

หลอดพลาสมาเป็นมีลักษณะเป็นท่อแก้วควอทซ์ซึ่งทำจาก ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) มาจากทราย ซิลิกาบริสุทธิ์ มีจุดหลอมเหลวที่ 2000 °C (3632 °F) จึงเหมาะสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูงอย่างเช่น การแตกตัวของก๊าซทำให้เกิดพลาสมา

2.5 สมบัติของพลาสมา (plasma properties)

พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายสมบัติของพลาสมาที่สำคัญ ๆ มีดังต่อไปนี้

2.5.1 ความหนาแน่นของพลาสมา (plasma density)

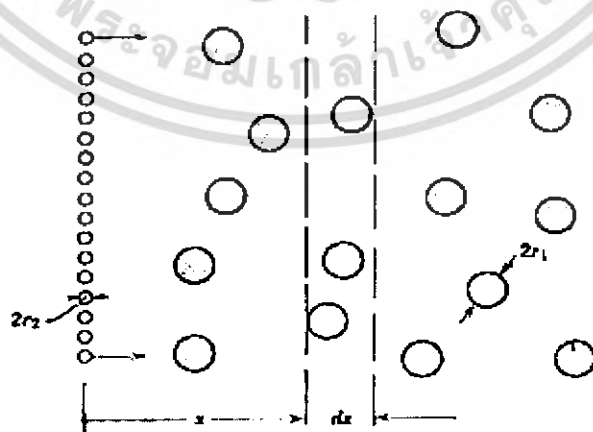
พลาสมามีส่วนประกอบที่เป็นไอออน อิเล็กตรอน และ อะตอมที่ยังไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน ผสมกันอยู่ โดยพลาสมาจะมีความหนาแน่นขององค์ประกอบต่าง ๆ แตกต่างกัน คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) ความหนาแน่นของไอออน (n_i) และ ความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง (n_n) ความหนาแน่นของอนุภาคทั้งสามนี้จะเป็นตัวบ่งบอกเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน⁶

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

ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวมีค่ามากกว่า 10 % ถือว่า แก๊สมีการแตกตัวเป็นไอออนในปริมาณมาก ดังนั้นในการพิจารณาพฤติกรรมของตัวกลางต้องพิจารณาผลของพลาสมาเป็นหลัก แต่ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวน้อยกว่า 1 % จะต้องพิจารณาถึงผลของแรงปฏิกิริยาของอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าด้วย

2.5.2 ระยะปลอดการชน (free path)

ระยะปลอดการชน คือ ระยะทางที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่มีการชนกับอนุภาคใด ๆ ภายในระบบ และเป็นตัวกำหนดว่าพลาสมาจะสามารถดำรงสถานะอย่างต่อเนื่องได้หรือไม่ ซึ่งเวลานำมาใช้เราจะใช้เป็นค่าเฉลี่ย หรือเรียกว่าระยะปลอดการชนเฉลี่ย (Mean Free Path, $\bar{\lambda}$)



รูปที่ 2.8 แสดงไดอะแกรมของลำอนุภาครัศมีขนาด r_2 ตกกระทบกับโมเลกุลแก๊สรัศมีขนาด r_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะปลอดการชนของอนุภาคขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอนุภาคหรือจำนวน โมเลกุลและ อุณหภูมิของระบบ กำหนดให้ระยะระหว่างรัศมีของโมเลกุลที่ไม่เคลื่อนที่ r_1 กับรัศมีของอนุภาคที่เล็กกว่า r_2 ที่เคลื่อนเข้าชน ดังแสดง ดังรูปที่ 2.5 สมมติให้รูปร่างของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนและ โมเลกุลที่อยู่กับที่มีลักษณะเป็นของแข็งทรงกลมคล้ายลูกบิลเลียด ดังนั้นการชนกันจะเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของทั้งสองอนุภาคมีระยะเป็น $r_1 + r_2$ ดังนั้นพื้นที่ที่เกิดการชนกันจะมีค่าเป็น $\pi(r_1 + r_2)^2$ สำหรับแก๊สหนึ่ง โมเลกุล แต่สำหรับปริมาตรของแก๊สทั้งหมดที่มีจำนวน N โมเลกุล จะมีพื้นที่ในการชนกันทั้งหมด $N\pi(r_1 + r_2)^2$ ซึ่งเรียกพื้นที่ของการชนนี้ว่า พื้นที่ขังผล (effective area)

พิจารณาชั้นบาง ๆ dx ดังใน รูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นระยะทางที่ต่อจากระยะ x ที่เริ่มจากจุดกำเนิด และ $n(x)$ เป็นจำนวนอนุภาคที่หลุดออกไปจากระยะ x ดังนั้นการลดลงของจำนวนอนุภาคเนื่องจากการกระเจิง (scattering) ในชั้นบาง ๆ dx จะมีค่าเป็น

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

สมมติให้จำนวนอนุภาคที่ผ่านเข้ามาใน โมเดลนี้ (ที่ $x = 0$) เป็น n_0 เพราะฉะนั้นเมื่อทำการอินทิเกรต สมการ (2.17) จะได้

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

ทำการหาอนุพันธ์สมการ (2.18) จะได้

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

โอกาสที่จะพบระยะปลอดการชนที่มีค่าเป็น x มีค่าเท่ากับส่วนกลับของโอกาสที่จะเกิดการชนกัน ระหว่างอนุภาคในระยะ x ถึง $x+dx$ ค่าของระยะปลอดการเฉลี่ยจึงมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \bar{\lambda} = \frac{\int_0^\infty x f(x) dx}{\int_0^\infty f(x) dx} \\ &= \frac{1}{N\pi(r_1 + r_2)^2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าอนุภาคตกกระทบเป็นไอออนของแก๊สชนิดเดียวกัน จะเห็นว่า $r_1 = r_2 = r$ จากสมการ (2.20) จะได้
ระยะปลอดภัยของไอออนกับอนุภาคที่เป็นกลางมีค่าเป็น

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

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

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

สำหรับกรณีของแก๊ส ระยะปลอดภัยของโมเลกุลเฉลี่ย ($\bar{\lambda}$) จะมีค่าเป็น

$$\bar{\lambda}_g = \frac{l}{\sqrt{2}} \bar{\lambda}_i = \frac{kT}{4\sqrt{2}\pi r_1^2 p} \quad (2.23)$$

เมื่อ

r คือ รัศมีโมเลกุลของแก๊ส

p คือ ความดันของระบบ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

การชนกันระหว่างอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้ามาชนกับโมเลกุล อาจจะทำให้เกิดขบวนการแตกตัว
เป็นไอออน ขบวนการถูกกระตุ้น (excitation) และ อื่น ๆ อีก

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในสนามไฟฟ้าก็จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้านั้น ซึ่งถ้าเคลื่อนที่ไปโดยไม่มีการชนกับอนุภาคใด ๆ อิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อถึงระยะทางค่าหนึ่งอิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์มากกว่าพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (eV_i) และ ถ้าเกิดชนกับอะตอมของแก๊สแล้วจะทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ ระยะทางนี้คือระยะปลอดภัยที่ทำให้แก๊สเกิดการแตกตัว ถ้าให้ λ_i คือระยะปลอดภัยของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ E ที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform electric field)
 e คือ ประจุอิเล็กตรอน
 eV_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

จากสมการข้างต้น

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

เมื่อ V_i คือ ionization potential (มีค่า 15.7 โวลต์ สำหรับแก๊สอาร์กอน)
 จากสมการ (2.25) เห็นว่า ค่าสนามไฟฟ้าที่จะเร่งให้อนุภาคมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สได้ คือ

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

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

2.5.3 อุณหภูมิของพลาสมา (plasma temperature)

ในงานด้านฟิสิกส์ของพลาสมานิยมกำหนดหน่วยของพลังงานเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) แต่สำหรับพลาสมาแล้วนิยามที่จะอธิบายพลังงานพลาสมาในรูปอุณหภูมิพลาสมาของแทน ดังนั้นอุณหภูมิของพลาสมาจึงถูกใช้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการอธิบายพลังงานของอนุภาคในพลาสมา โดยพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคจะแปรผันกับอุณหภูมิตามสมการ

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

โดยทั่วไปกำหนดอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ และ อุณหภูมิของพลาสมาสามารถคำนวณได้จากพลังงานเฉลี่ยของพลาสมา ตัวอย่างเช่นอุณหภูมิของพลาสมา 1 eV จะมีอุณหภูมิ 11,600 K

2.5.4 สภาพความต้านทานของพลาสมา (plasma resistivity)

ความต้านทานของพลาสมา เกิดขึ้นเนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนหรืออนุภาคที่เป็นกลาง ความต้านทานของพลาสมาจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ซึ่งเปรียบเสมือนว่าอิเล็กตรอนในพลาสมามีพลังงานเพิ่มขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนหรือกับอนุภาคที่เป็นกลางจะลดลงเมื่อความเร็วของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับความต้านทานของโลหะ

2.5.5 การไหลของพลาสมา (plasma flow)

เนื่องจากพลาสมาเป็นอนุภาคที่ถูกทำให้มีประจุ ดังนั้นการไหลของพลาสมา จึงมีลักษณะคล้ายกับการไหลของอิเล็กตรอน ในโลหะกระแสไฟฟ้าเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนเพียงอย่างเดียว ไอออนหรือโครงผลึกจะไม่มีเคลื่อนที่ แต่ในพลาสมาจะมีทั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน ดังนั้น กระแสที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลรวมของทั้งกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนและไอออน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมหาได้จากสมการ

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

เมื่อ

J คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวม

J_i คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าไอออน

J_e คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอน

ในพลาสมา อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่สวนทางกับไอออนบวก ดังนั้นถ้าให้กระแสไอออนมีค่าเป็นบวกกระแสอิเล็กตรอนจะมีค่าเป็นลบ โดยจะต้องคำนึงถึงเครื่องหมายของกระแสด้วย

2.5.6 พลาสมาชีท (plasma sheath)

อนุภาคภายในพลาสมาจะมีปฏิกิริยาต่อกันผ่านทางสนามไฟฟ้าและอิทธิพลของสนามไฟฟ้าของอนุภาคที่มีในพลาสมาจะมีเพียงระยะจำกัดเรียกว่า ระยะทางการสกรีน (screening distance) ที่ระยะทางมากกว่านี้สนามของอนุภาคจะถูกหักล้างโดยอนุภาคตัวอื่นในพลาสมา ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำต่อพลาสมา สนามไฟฟ้าจากภายนอกจะถูกหักล้างโดยสนามจากภายในทำให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกไม่สามารถผ่านพลาสมาได้ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับที่โลหะไม่ยอมให้สนามไฟฟ้าภายนอกผ่าน เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกทำให้อนุภาคบริเวณผิวของพลาสมา มีการจัดเรียงตัวใหม่และเป็นผลให้สนามภายนอกมีค่าลดลงอย่างเอกซ์โปตามระยะทางลึกเข้าไปในพลาสมา

ระยะทางที่สนามภายนอกสามารถผ่านเข้าไปได้จะขึ้นกับความหนาแน่น และ อุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาเมื่อพลาสมาสัมผัสกับผนัง (Material Wall) บริเวณที่สัมผัสกันระหว่างพลาสมา กับผนังจะไม่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ความหนาของบริเวณนี้เรียกว่า “พลาสมาชีท” ซึ่งเกิดขึ้นจาก อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออน จึงทำให้ผนังมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา เป็น ผลให้เกิดแรงผลักอิเล็กตรอนตัวต่อไป ในขณะที่ขั้วกันจะเร่งให้ไอออนบวกเคลื่อนมายังผนังด้วยอัตรา ที่สูงขึ้น ที่สภาวะสมดุลจึงเกิดเป็นชั้นของประจุบวกสุทธิลึกเข้าไปในพลาสมาซึ่งเรียกว่า พลาสมาชีท นั้นเอง ความหนาของพลาสมาชีทขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนใน พลาสมา โดยสเกลของความหนาของพลาสมาชีทนี้เรียกว่าความยาวเดอบาย (Debye Length, λ_D)

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

หรือ

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

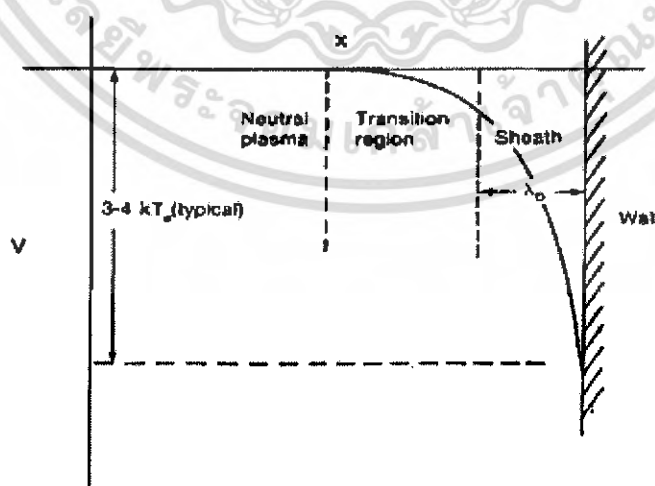
เมื่อ

T_e คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (eV)

n_e คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (cm^{-3})

k คือ ค่าคงที่ของ โบลต์ซมันน์

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.9 แสดงบริเวณส่วนที่เป็นพลาสมาชีท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาอนุภาคที่มีประจุ q ตัวหนึ่ง (isolated charge particle) ค่าศักย์ไฟฟ้า V ของอนุภาคนี้ จะมีค่าลดลงตามระยะทาง r โดย

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

ในทำนองเดียวกันศักย์ไฟฟ้าของพลาสมาซึ่งมีค่าลดลงตามระยะทางที่ลึกเข้าไปในพลาสมา เช่นกัน ด้วยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

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

จากสมการจะพบว่าที่ระยะทางเท่ากับ λ_D ลึกเข้าไปในพลาสมา พลาสมาจะมีศักย์ไฟฟ้าลดลงเหลือเพียง $1/e$ เท่า ของระดับแรงดันของขั้วพลาสมา (plasma-electrode potential)

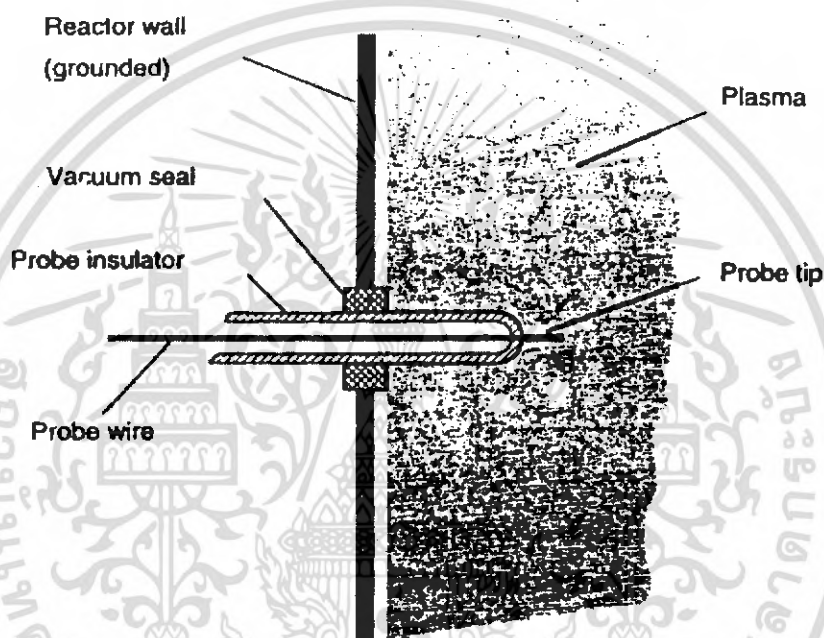
สรุปได้ว่า พลาสมาซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ (localized electric field) ซึ่งจะแยกส่วนที่เป็นพลาสมาออกจากผนังของวัสดุซึ่งจะทำหน้าที่กักกั้นอนุภาคที่มีสภาพความคล่องตัว (mobility) มากกว่าไว้ในพลาสมาแต่จะเร่งหรือคูดอนุภาคที่มีสภาพความคล่องตัวน้อยกว่าออกมาจากพลาสมา ซึ่งความหนาของพลาสมาจะขึ้นอยู่กับความยาวเดอบาย

ในบริเวณที่เป็นพลาสมาซึ่งเป็นบริเวณที่สมมุติว่าไม่มีการชนกันของอนุภาคและ ไม่มีการแตกตัว ในขณะที่บริเวณที่เป็นเนื้อพลาสมา (bulk plasma) เป็นบริเวณที่สมมุติว่าเป็นกลางทางไฟฟ้างั้น การอธิบายพฤติกรรมของบริเวณทั้งสองจึงจำเป็นต้องอธิบายด้วยรูปแบบที่ต่างกันโดยที่จะต้องเชื่อมโยงรอยต่อระหว่างเนื้อพลาสมากับส่วนที่เป็นชิทได้อย่างต่อเนื่อง แต่จากกฎของ Child-Langmuir กำหนดว่าที่รอยต่อของชิทกับพลาสมา มีค่าแรงดันพลาสมา (plasma potential) สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของประจุเป็นศูนย์ ซึ่งเมื่อนำค่าดังกล่าวมาพิจารณาทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของพลาสมากับขอบของชิทขึ้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว Godyak และ Sternberg ได้ สมมุติว่า ระหว่างรอยต่อมีค่าสนามไฟฟ้าเป็น $kt_e/e\lambda_{Ds}$ แทนที่จะเป็นศูนย์ เมื่อ λ_{Ds} คือ ความยาวเดอบายที่ขอบชิท

2.6 หัววัดแลงมัวร์ (langmuir probe)

หัววัดอิเล็กโตรสแตติก (electrostatic probe) หรือ หัววัดแลงมัวร์ เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาโดยตรง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สามารถวัดด้วยวิธีการนี้ คือ ความหนาแน่นของพลาสมา (n) อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) ความต่างศักย์ของพลาสมา (V_p) และ ค่าศักย์ลอยของหัววัด (V_n)

หัววัดแสงมัวร์ เป็นหัววัดที่เป็นขั้วไฟฟ้าโลหะมีฉนวนหุ้มยกเว้นบริเวณส่วนปลายซึ่งเป็นบริเวณที่ต้องสัมผัสกับพลาสมา⁷ ดังในรูปที่ 2.10 หัววัดทำจากโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงและมีค่าของอนุภาคที่หลุดออกจากพื้นผิว (sputter yield) ที่ต่ำ เช่น ทังสเตน (tungsten) โมลิบดีนัม (molybdenum) หรือแพลทินัม (platinum) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่าน้อยกว่า 1 mm ทำการอุดรอยรั่วสุญญากาศ (vacuum seal) ด้วยฉนวนชนิดทำปฏิกิริยาช้าที่อุณหภูมิสูง ได้แก่ แก้ว คิวอर्थ อลูมินา หรือ เซรามิก สำหรับเทคโนโลยีสุญญากาศ



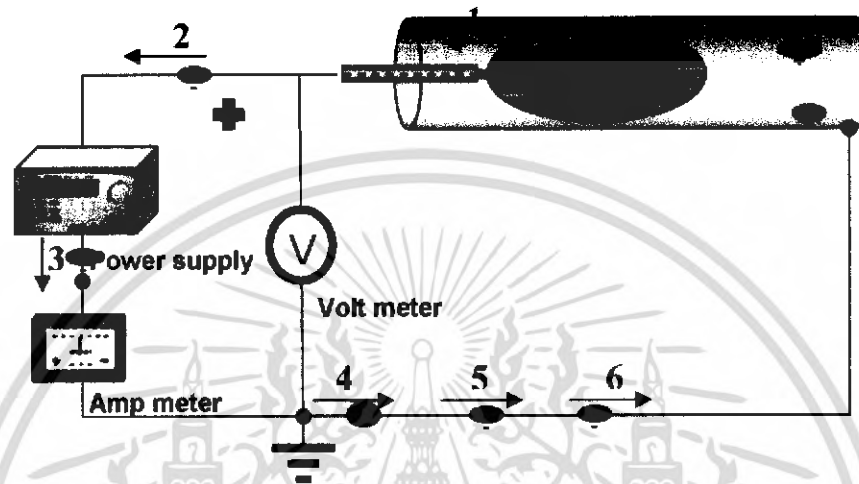
รูปที่ 2.10 แผนภาพของหัววัดแสงมัวร์ชนิดเดี่ยว

หัววัดแสงมัวร์จะวัดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพในพลาสมาจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการแจกแจงของอนุภาคและพลังงาน ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของหัววัด และสมบัติของพลาสมาชนิดนั้นๆ โดยที่หัววัดที่มีรัศมีของหัววัด (r_p) มากกว่าความยาวเดอบาย (λ_D) หรือความหนาของพลาสมาชีท จะเรียกว่า หัววัดสำหรับชีทบาง (thin sheath probe)

การใช้งานหัววัดแสงมัวร์ทำโดยเริ่มจากป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายภายนอกปรับค่าได้เพื่อทำการปรับค่าแรงดันคร่อมหัววัดจากด้านล่างไปยังด้านบน และวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านหัววัด เพื่อนำไปหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I – V characteristic) ของหัววัด ดังที่แสดงในรูปที่

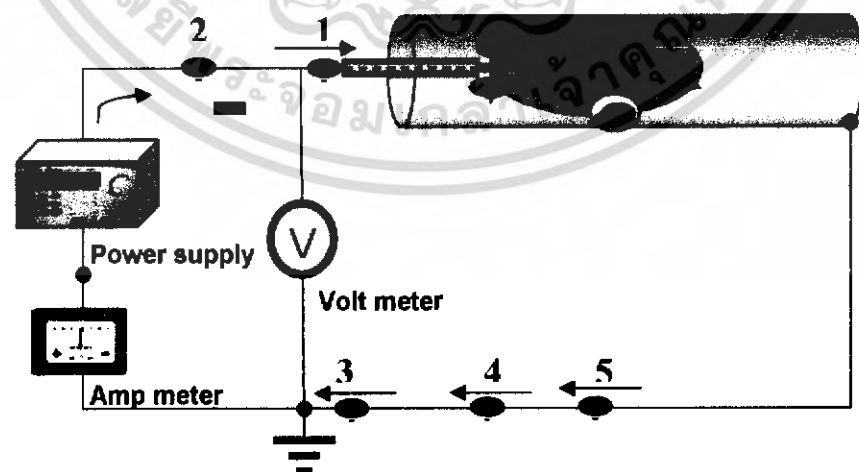
2.11

เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าบวก ตกคร่อมหัววัดจะทำให้ อิเล็กตรอนไหลเข้ามาที่หัววัด เมื่อเพิ่มแรงดันมากขึ้นเป็นผลให้อิเล็กตรอนไหลผ่านหัววัดมากขึ้นจนเกิดการสะสมของประจุลบ โดยกระแสไหลผ่านมีค่าคงที่เป็นกระแสของอิเล็กตรอน (electron saturation current)



รูปที่ 2.11a แผนภาพการเคลื่อนที่ขณะแรงดันตกร่อมหัววัดมีค่าเป็นบวก

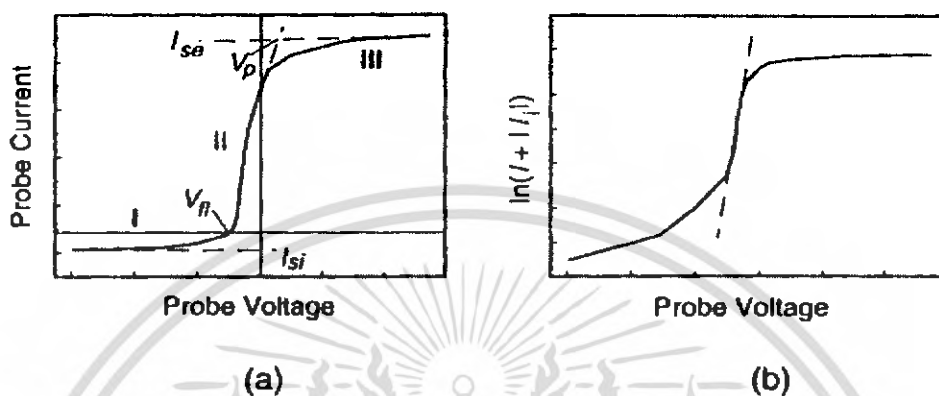
เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าลบทำให้ประจุบวกมาสะสมอยู่ที่หัววัด จะสามารถวัดค่าของกระแสไอออนบวกมีค่าเป็นลบเพราะเกิดจากประจุลบวิ่งขึ้นมารวมตัวกับประจุบวกที่สะสมอยู่บริเวณหัววัดกลายเป็นอะตอมกลาง เมื่อเพิ่มความต่างศักย์มากขึ้นจะทำให้ได้ค่า ศักย์ลอย คือเมื่อกระแสเป็นศูนย์



รูปที่ 2.11b แผนภาพการเคลื่อนที่ขณะแรงดันตกร่อมหัววัดมีค่าเป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.12 (a) กราฟคุณลักษณะของหัววัด (I-V characteristic) รูปที่ 2.12 (b) กราฟคุณลักษณะของหัววัดในสเกลเซมิลอการิทึม (Semi logarithmic I-V characteristic) ระหว่างค่าแรงดันตกคร่อมหัววัด (แกน X) กับกระแสที่ไหลผ่านหัววัด(แกน Y)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของหัววัดแลงมัวร์ชนิดเดี่ยว

2.6.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากหัววัดแลงมัวร์ชนิดหัววัดเดี่ยว (single langmuir probe analysis)

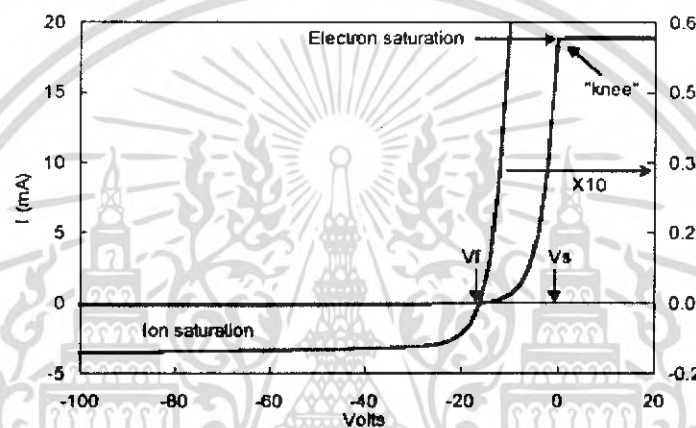
ภายในพลาสมาจะประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุหลักๆ 2 ชนิดที่มีจำนวนเท่ากัน คือ อิเล็กตรอน และ ไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ค่าความเร็วเฉลี่ยของไอออนซึ่งมีค่าน้อยกว่าอิเล็กตรอน ในพลาสมาที่ไม่มีการรบกวน (unperturbed plasma) ดังนั้นบริเวณที่สัมผัสพลาสมาของหัววัดมีพื้นที่ (probe area : A) ของพื้นที่รอบผิวเส้นลวด จะมีการไหลของอิเล็กตรอนมากกว่าการไหลของไอออน

ศักย์ของพลาสมา (plasma potential: V_p) หาได้จากจุดสัมผัสของกราฟ I-V characteristic ในบริเวณ transition region ตัดกับเส้นสัมผัสบริเวณกระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว

ศักย์ลอยของหัววัด (floating potential : V_n) เป็นศักย์ที่หายไปของหัววัด เนื่องจากการสะสมของประจุที่บริเวณหัววัด ทำให้ไม่มีการไหลของกระแส

เมื่อมีความต่างศักย์ของหัววัดสูงกว่าศักย์ของพลาสมาจนทำให้กระแสของอิเล็กตรอนคงที่ ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า กระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว (electron saturation currents : I_{sc}) บริเวณนี้หัววัดจะวัดได้เฉพาะกระแสอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกทั้งหมดจะถูกผลักออกจากหัววัด ดังใน รูป 2.12(a) และเมื่อลดความต่างศักย์ให้ต่ำกว่าศักย์ของพลาสมาจะทำให้อิเล็กตรอนมีค่าลดลงจนถึงที่ศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่ง กระแสอิเล็กตรอนและกระแสของไอออนที่บริเวณหัววัดมีค่าเท่ากัน ($j_e = j_i$) จนทำให้กระแสที่ไหลผ่านหัววัดมีค่าเป็นศูนย์ จากกราฟลักษณะของกระแสและแรงดันจะสังเกตได้ว่ามี 3 บริเวณ คือ บริเวณกระแสไอออนคงที่ (I) บริเวณเปลี่ยนแปลง(II) และบริเวณอิเล็กตรอนคงที่(III)สำหรับบริเวณกระแส

ไอออนคงที่(I)เป็นบริเวณที่เกิดขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าของหัววัดมีค่าติดลบมากๆจนอิเล็กตรอนทั้งหมดไม่สามารถไปถึงหัววัดทำให้กระแสที่วัดได้เกิดจากไอออนบวกเพียงอย่างเดียวเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณกระแสไอออนอิ่มตัว(ion saturation) ส่วนบริเวณการเปลี่ยนแปลง(II)บริเวณนี้กระแสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อศักย์ของหัววัดเปลี่ยนค่าไปในบริเวณนี้กระแสรวมประกอบด้วยกระแสไอออนบวกและกระแสอิเล็กตรอน เรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณทรานซิชัน(transition region) และบริเวณอิเล็กตรอนคงที่(III)บริเวณหัววัดจะวัดได้เฉพาะกระแสอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกทั้งหมดจะถูกผลักออกจากหัววัดเรียกบริเวณนี้ว่ากระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว (electron saturation current : I_{sc}) ดังกราฟรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟ I-V อุดมคติ กราฟทางด้นซ้ายเพิ่มขึ้นเป็น 10 เท่า กระแสไอออน

โดยที่ค่าศักย์ล้อยของพลาสมา (V_p) จะมีค่ากระแสไหลผ่านหัววัดมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถหาได้จากศักย์ของพลาสมาซึ่งที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$V_p = V_f - \frac{kT_e}{2e} \ln\left(\frac{\pi m_i}{2me}\right) \quad (2.33)$$

ค่าศักย์ของพลาสมา(V_p) สามารถหาได้จากจุดตัดของกราฟความสัมพันธ์เอกซ์โปของกระแสและแรงดัน บริเวณช่วง Transition กับ ช่วง Electron Saturation มีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$V_p = V_f + \frac{kT_e}{2e} \ln\left(\frac{\pi m_i}{2me}\right) \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ศักย์ของพลาสมา(V_p) เป็นค่าคงที่และความชันของกราฟลอการิทึมของพลาสมาอาร์กอนในช่วงทรานซิชันกระแสอิเล็กตรอน I_e เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของหัววัดมีค่าเท่ากับ $(1/T_e)$

ดังนั้นสามารถนำค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน(kT_e)ที่ได้ไปทำการคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากสมการ

$$I_{es} = \frac{e A n_e \bar{v}}{4} = e n_e A \left(\frac{K T_e}{2 \pi m} \right)^{1/2} \quad (2.35)$$

เมื่อ I_{es} คือ กระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว (วิเคราะห์ได้จากกราฟ I-V)

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน

n_e คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (cm^{-3})

A คือ พื้นที่ผิวที่สัมผัสพลาสมาของหัววัด (cm^2)

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

หัววัดจะทำงานภายใต้สภาวะความดัน (p) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 Torr ที่มีระยะปลดการชนเฉลี่ย (λ) ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดของหัววัด การเพิ่มขึ้นของศักย์ดักก่อกอหัววัดจะทำให้กระแสของอิเล็กตรอน (I_e) เพิ่มขึ้นในบริเวณ (II) และจะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\ln I_e = \frac{V}{K T_e} + \ln A_s J_0 \quad (2.36)$$

โดยที่ A_s = พื้นที่ของระนาบที่ทำการวัด

J_0 = ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนแบบสุ่ม

$K T_e$ = เป็นค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนในหน่วย (eV)

กระแสที่ไหลผ่านหัววัด (I) เป็นค่าผลต่างระหว่าง อิเล็กตรอน กับ กระแสของไอออน ดังนี้

$$I_e = I + |I_i| \quad (2.37)$$

จากสมการ (2.36)

$$kT_e = \frac{dV}{d[\ln(I + |I_i|)]} \approx \frac{\Delta V}{\Delta[\ln(I + |I_i|)]} \quad (2.38)$$

ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) สามารถหาได้จากความชันของ $\log(I_e)$ กับแรงดันของหัววัด ในช่วงบริเวณ Transition region (II) ดังแสดงในรูป รูป 2.12 (b)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

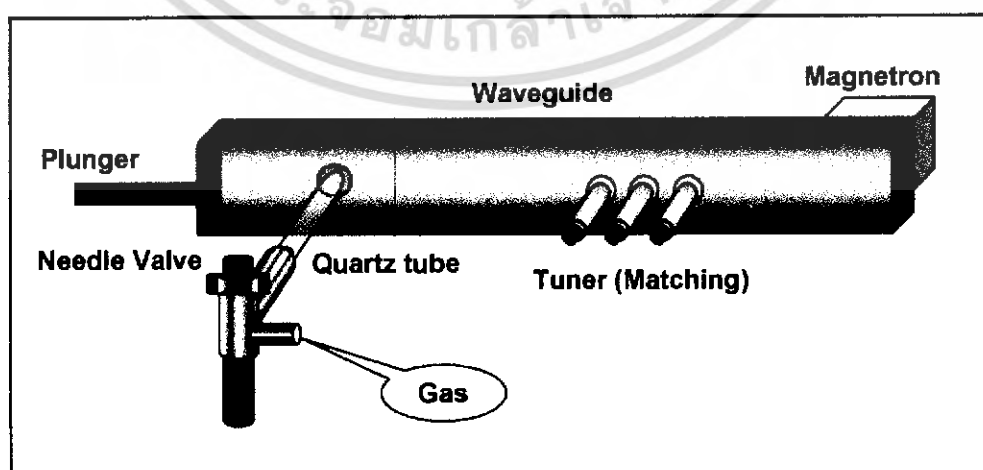
ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์ของพลาสมาซึ่งใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz มากระตุ้นทำให้ก๊าซ อาร์กอน (Ar) เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา ภายในหลอดแก้วควอทซ์ มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ความดันภายในหลอดประมาณ 10^{-3} mbar และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของพลาสมาที่เกิดขึ้นด้วยหัววัดแลงมัวร์ โดยมีรายละเอียดต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ และ หัววัดแลงมัวร์

ทำการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบการเกิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อการเกิดพลาสมา วิธีการกำเนิดพลาสมา และศึกษาลักษณะของหัววัดแลงมัวร์ (Langmuir probe) ส่วนประกอบของหัววัด และวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของหัววัด ตลอดจนวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจากพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวัด

3.2 การสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการสร้างพลาสมาโดยชนิดกระตุ้นด้วย คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ที่ออกมาจากตัวแมกเนตรอน ซึ่งจะมีระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ภายในท่อนำคลื่น (waveguide) ไปชนกับตัวสะท้อนคลื่น (plunger) จนเกิดการสะท้อนฟุ้งขึ้นภายในท่อ



รูปที่ 3.1 แผนภาพการเกิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

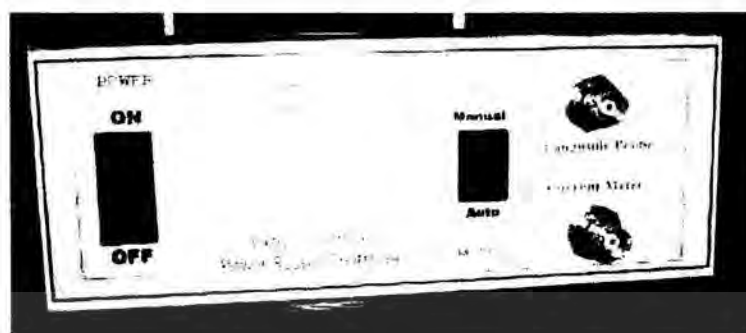
ภายในหลอดแก้ววอทซ์สุญญากาศ จะมีไม้สุญญากาศทำหน้าที่ในการรักษาระดับความดัน เมื่อทำการปล่อยแก๊สเข้าไปในหลอดแก้ว ผ่านทาง วาล์วควบคุมการไหล (needle valve) และปรับตัวสะท้อนคลื่นและตัวปรับการดูดกลืนคลื่น (tuner) หรือเป็นการปรับให้มีการส่งผ่านคลื่นไปทำให้การแตกตัวของแก๊สที่ จนทำให้เกิดการสั่นพ้องมากที่สุดที่บริเวณหลอดแก้วจนทำให้อะตอมของแก๊สที่เคลื่อนที่เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาและเกิดการคายพลังงานในรูปของแสงยูเอมวี (glow discharge)



รูปที่ 3.2 พลาสมาที่เกิดขึ้นภายในหลอดแก้ววอทซ์

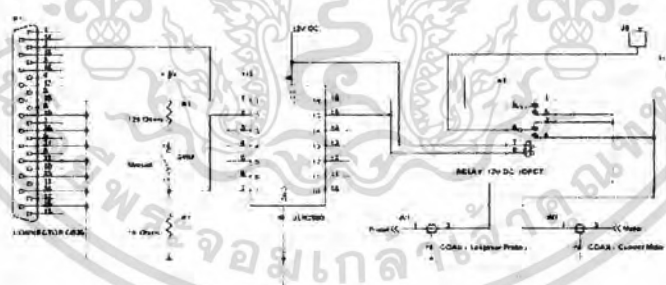
3.3 การสร้างอุปกรณ์สลับขั้วไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟสำหรับหัววัดแสงมัวร์

เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟที่ใช้งานไม่มีการจ่ายไฟด้านลบ และตัวหัววัดแสงมัวร์มีการวัดการไหลของกระแสไอออนบวกและอิเล็กตรอน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่าย ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงมีความจำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์สลับขั้วของแหล่งจ่ายไฟให้กับตัวหัววัดทั้งด้านบวกและด้านลบ ซึ่งจะทำให้การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ควบคุมแหล่งจ่ายไฟโดยการสลับขั้วระหว่าง บวก กับ ลบ ใช้ในการสลับขั้วแหล่งจ่ายไฟเพื่อให้สามารถป้อนแรงดันตกรวมไปยังหัววัดได้ทั้งทางด้านบวกและด้านลบควบคุมได้ทั้ง กคสวิตซ์ (manual) หรือ ควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์สลับขั้วแหล่งจ่ายไฟ

ตัวอุปกรณ์สลับขั้วไฟฟ้านี้จะเลือกใช้รีเลย์ (SPDT) มาใช้ในการสลับขั้ว ซึ่งจะมีตัวควบคุมเป็นไอซีดาร์ลิงตัน เบอร์ ULN2003 โดยมีการออกแบบให้รีเลย์ทำงานจาก 2 ระบบ คือ ควบคุมการทำงานโดยคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน D₁ (parallel port) 2. ควบคุมจากสวิตช์บนหน้าปัด (manual) โดยการควบคุมทั้งสองวิธีนั้นเมื่อทำงานจะส่งสัญญาณ TTL ไปกระตุ้นแผงวงจรรวมวงจรขับเคลื่อนแบบคถึงตัน จะทำหน้าที่ให้ไฟเลี้ยง 12 V dc ที่จ่ายให้กับไอซีไพล์ไปหนึ่ย่นำขดตัวขดลวดของ Relay DPDT 12 V dc ทำให้เกิดการสลับขั้วระหว่างด้านบวกกับด้านลบของสัญญาณ ไฟฟ้าที่ต่อมาจากแหล่งจ่ายไฟ

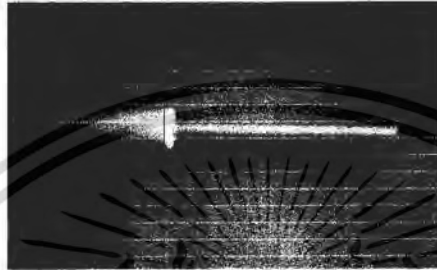


รูปที่ 3.4 วงจรควบคุมสลับขั้วแหล่งจ่ายไฟ(ดูเพิ่มเติมจากภาคผนวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสร้างหัววัดแสงมัวร์

การวัดด้วยหัววัดแสงมัวร์เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพมากเพราะวัดจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงอนุภาค(Particle Flux) ที่อยู่ในพลาสมาโดยตรงแต่จะเป็นการรบกวน (Perturbation) พลาสมา ดังนั้นการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงการรบกวนซึ่งเราได้เลือกใช้โลหะ ทั้งสแตน ๑ 0.5 mm ยาว 5 mm



รูปที่ 3.5 หัววัดแสงมัวร์ชนิดขั้วโลหะทั้งสแตน

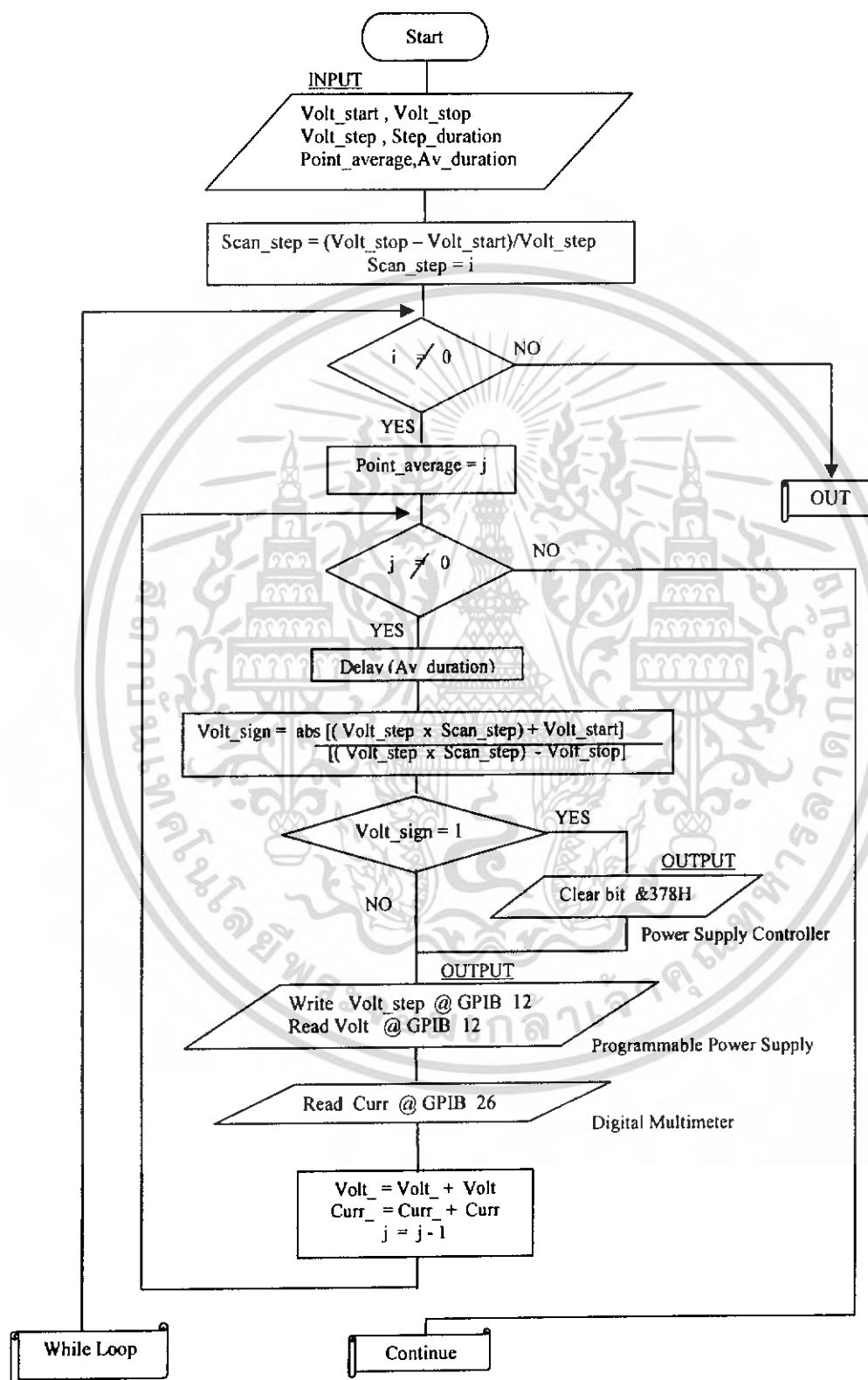
ตัวหัววัดจะติดกับตัวเลื่อนในสุญญากาศ(vacuum linear translator) ซึ่งตัวขั้วของหัววัดจะต่อกับแหล่งจ่ายไฟเพื่อดึงไอออนจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหัววัด จากนั้นทำการวัดค่าของกระแสที่ไหลผ่านหัววัด คือ กระแสของไอออนบวกเมื่อแรงดันตกคร่อมเป็นลบ และกระแสของอิเล็กตรอนเมื่อแรงดันตกคร่อมเป็นบวก



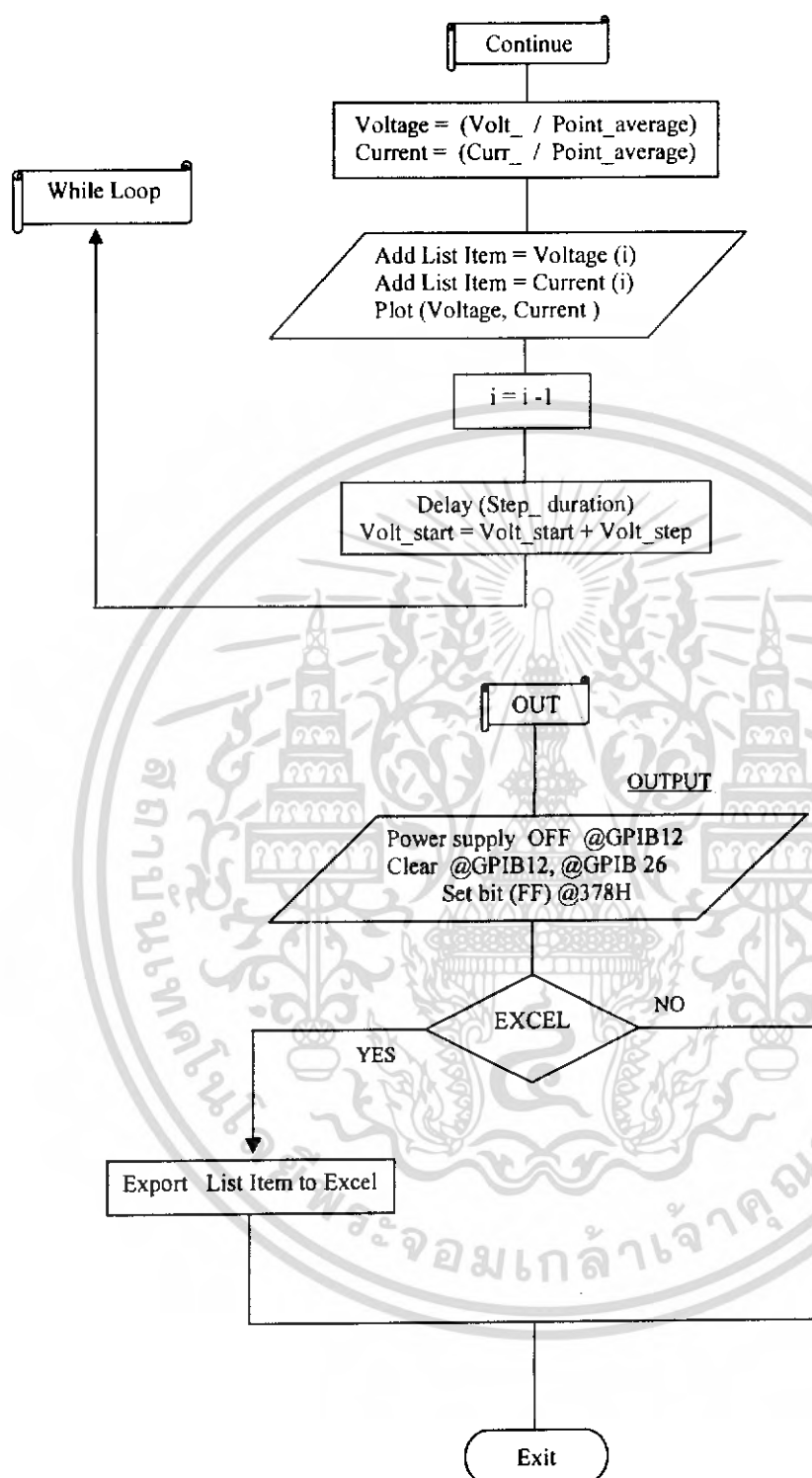
รูปที่ 3.6 ระบบการวัดฟารามีเตอร์ของพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบวัดพารามิเตอร์ของพลาสมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



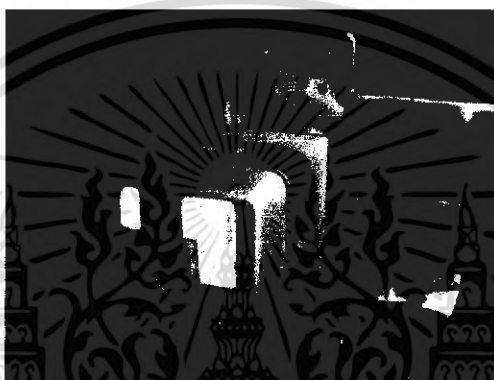
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ คือ

3.6.1 แมกเนตรอน

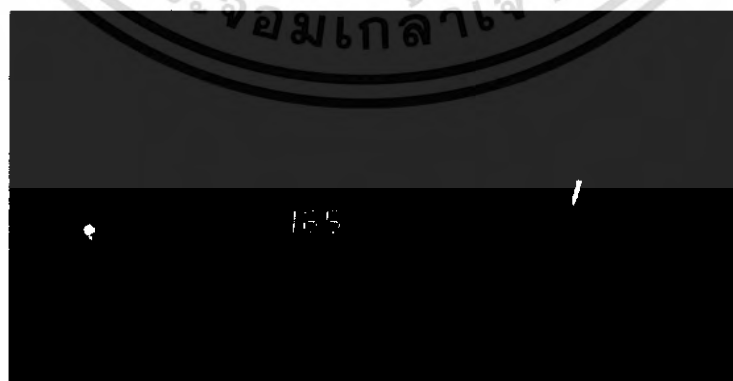
แมกเนตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่น 2.45 GHz 800 W ใช้กระแส Filament 10 A , แรงดัน Voltages 3 Volt โดยทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วแคโทดและทำการเร่งด้วยสนามแม่เหล็กและหมุนไปรอบ จนได้เป็นคลื่น EM ออกมา



รูปที่ 3.7 แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

3.6.2 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกเนตรอน

แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับแมกเนตรอนประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสที่แปลงจากกระแสสลับ 220 Volt ให้เป็นกระแสตรงซึ่งทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับตัวแมกเนตรอน 0-5000 Volt โดยการปรับ เวก์แรก และอีกส่วนหนึ่งเป็นไฟโวลต์เลี้ยงให้หลอดด้วยแรงดันไฟฟ้า 3 volt และกระแส 10 A



รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกเนตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3. เครื่องรักษาอุณหภูมิแมกเนตรอน

เครื่องรักษาอุณหภูมิแมกเนตรอนใช้ระบบทำความเย็นด้วยน้ำ ให้กับหัวแมกเนตรอนโดยใช้น้ำเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่หัวแมกเนตรอนด้วยการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องให้คงที่หรือไม่ให้ร้อนจัดจนเกินไปเพื่อรักษาแมกเนตรอนให้คงที่ทำให้หัวแมกเนตรอน Generate คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้สม่ำเสมอ



รูปที่ 3.9 เครื่องรักษาอุณหภูมิชนิดใช้น้ำ

3.6.4 ชุดอุปกรณ์ระบบพลาสมา

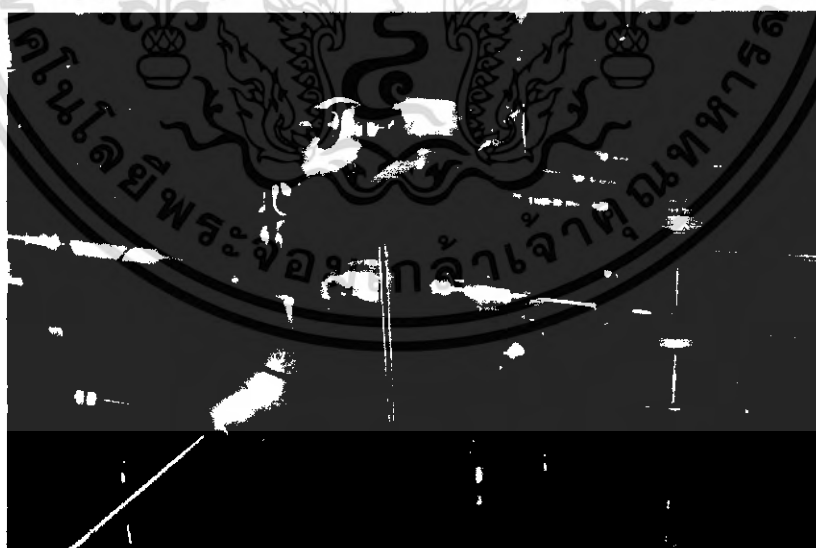
ชุดอุปกรณ์ระบบพลาสมาประกอบไปด้วย ท่อนำคลื่น แบบ WR340 ซึ่งเป็นท่อที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าใช้งานได้ดีในช่วง 2.2 – 3.3 GHz ซึ่งใช้โหมดการที่ TE คือ มีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ ส่วนสตัปจูนเนอร์ (stub tuner) ทำหน้าที่ปรับ impedance matching ระหว่างสัญญาณที่ส่งมาในท่อนำคลื่น โดยจะต้องมีค่าเท่ากับ load เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณและปึงเกอร์ (plunger) ทำหน้าที่รับการชนของสนามไฟฟ้าที่ออกมาจากแมกเนตรอนและสะท้อนกลับไปยังท่อนำคลื่น โดยจะปรับจนกว่าจะเกิดการ Resonance ขึ้นบริเวณจุดกำเนิดพลาสมา



รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์ระบบพลาสมา

3.6.5 ชุดอุปกรณ์ระบบสุญญากาศ

ประกอบด้วย แคมเบอร์สุญญากาศเนื่องจากภายในระบบต้องทำให้ความดันต่ำที่สภาวะสุญญากาศเพื่อทำให้เกิดพลาสมา ส่วนหลอดแก้วควอทซ์เป็นบริเวณที่เกิดพลาสมา ดังนั้นคุณลักษณะของหลอดแก้วจะต้องทนต่ออุณหภูมิสูงและความดันต่ำๆ มีขนาดกว้าง 1 cm ยาว 13 cm และ วาล์วควบคุมการไหล (Needle Valve) เป็นอุปกรณ์กำหนดอัตราการไหลของแก๊ส ซึ่งปัจจัยหลักของการเกิดพลาสมาจะต้องมีปริมาณของแก๊สเพียงพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซ



รูปที่ 3.11 ชุดอุปกรณ์ระบบสุญญากาศ

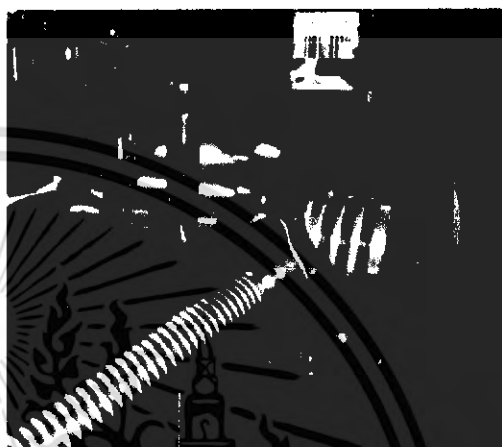
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.6 ปั๊มสุญญากาศ

ปั๊มสุญญากาศ 2 ชนิดประกอบด้วย ปั๊มโรตารี (Rotary pump) รุ่น Balzers DUO 004B ทำงานในช่วงตั้งแต่ความดันบรรยากาศถึง 1×10^{-3} mbar และ เทอร์โบโมเลกูลาร์ (Terbomolecular Pump) รุ่น LEYBOLD TURBOVAC 50 ทำงานที่ความดัน 1×10^{-2} mbar ถึง 1×10^{-6} mbar



รูปที่ 3.12 ปั๊มโรตารี



รูปที่ 3.13 ปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์

3.6.7 ระบบเกจวัดสุญญากาศ

ระบบเกจวัดสุญญากาศมี 2 ชนิดประกอบด้วย EDWARD Penning Gauge (AIM-S-NW25): ทำงานที่ความดัน 1×10^{-3} ถึง 1×10^{-7} mbar และ EDWARD Pirani Gauge (APG-M-NW16): ทำงานที่ความดัน บรรยากาศ - 1×10^{-3} mbar



รูปที่ 3.14 เกจวัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.8 ส่วนแสดงผล

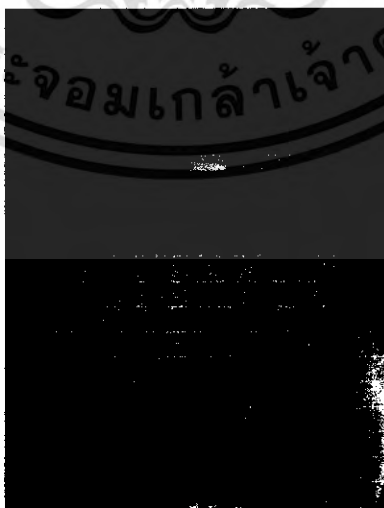
ส่วนแสดงผลใช้ร่วมกับ Pressure gauge ได้แก่ ตัวควบคุมเกจ (EDWARD: Active Gauge Controller) ทำหน้าที่ในการแสดงผลความดันที่ตรวจจับ โดย panning gauge กับ pirani gauge และตัวควบคุมการทำงานของปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ (LEYBOLD: Terbomolecular Controller)



รูปที่ 3.15 ชุดควบคุมและแสดงผล

3.6.9 อุปกรณ์ตรวจสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ

ใช้ตรวจสอบการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รั่วออกมายังตัวอุปกรณ์ตรวจจับ (holaday) จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ตัวตรวจจับ ไหลผ่านตัวหน้าปัดซึ่งจะตรวจจับการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟในหน่วยของมิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ตรวจสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.10 หัววัดแสงมัวร์

หัววัดแสงมัวร์ จะติดตั้งอยู่บนแกนปรับเลื่อนในสุญญากาศ(vacuum linear translator) ซึ่งจะต่อสายสัญญาณของหัววัดออกมาภายนอกผ่านทางข้อต่อBNC เพื่อเข้าไปยังระบบวัดผ่านทางอุปกรณ์ langmuir probe power supply controller ด้วยสายนำสัญญาณแบบ coaxial



รูปที่ 3.17 หัววัดแสงมัวร์ที่ติดตั้งบนแกนปรับเลื่อนในสุญญากาศ

3.6.11 แหล่งจ่ายไฟชนิดโปรแกรมได้ (programmable power supply)

แหล่งจ่ายไฟรุ่น GW: PSM-6003 สามารถใช้งานได้ทั้งแบบ manual และ แบบ automatic ทำหน้าที่จ่ายแรงดันตกคร่อมให้กับหัววัด สามารถจ่ายแรงดันได้ตั้งแต่ 0-60 โวลต์ มีความละเอียดของทศนิยม 3 ตำแหน่ง และ ควบคุมการทำงานโดยคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม และ พอร์ต GPIB ซึ่งจ่ายแรงดันระหว่าง 0-60 volt

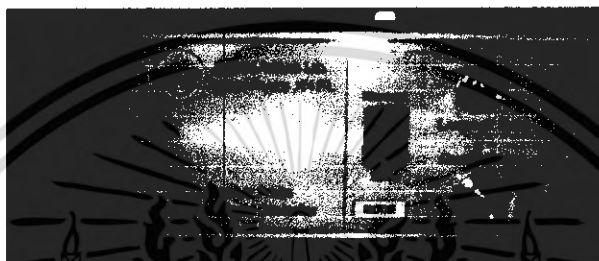


รูปที่ 3.18 แหล่งจ่ายไฟชนิดโปรแกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.12 อุปกรณ์ควบคุมการสลับขั้วแหล่งจ่ายไฟ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สลับขั้วแหล่งจ่ายไฟทั้งทางด้านบวกและลบ มีการทำงาน 2 ระบบคือ 1. ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตนานา(parallel port) และระบบควบคุมสวิตช์บนหน้าปัด(manual) ใช้รีเลย์ (SPDT) ในการสลับขั้ว โดยไอซีคาร์ลิงตัน เบอร์ ULN2003 เป็นตัวควบคุมโดยการจ่ายไฟเลี้ยง 12 volt dc ให้กับไอซีไหลไปเหนี่ยวนำขดลวดของ Relay DPDT 12Vdc ทำให้เกิดการสับขั้วระหว่างด้านบวกกับด้านลบ



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ควบคุมการสลับขั้วแหล่งจ่ายไฟ

3.6.13 คิวติดอลมัลติมิเตอร์ (Agilent: Digital Multimeter 34401A)

คิวติดอลมัลติมิเตอร์ สามารถได้ทั้งกระแสและแรงดัน โดยมีความละเอียดสามารถปรับทศนิยมได้ 3 ตำแหน่ง ควบคุมและแสดงผลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ได้ผ่านพอร์ต GPIB



รูปที่ 3.20 คิวติดอลมัลติมิเตอร์

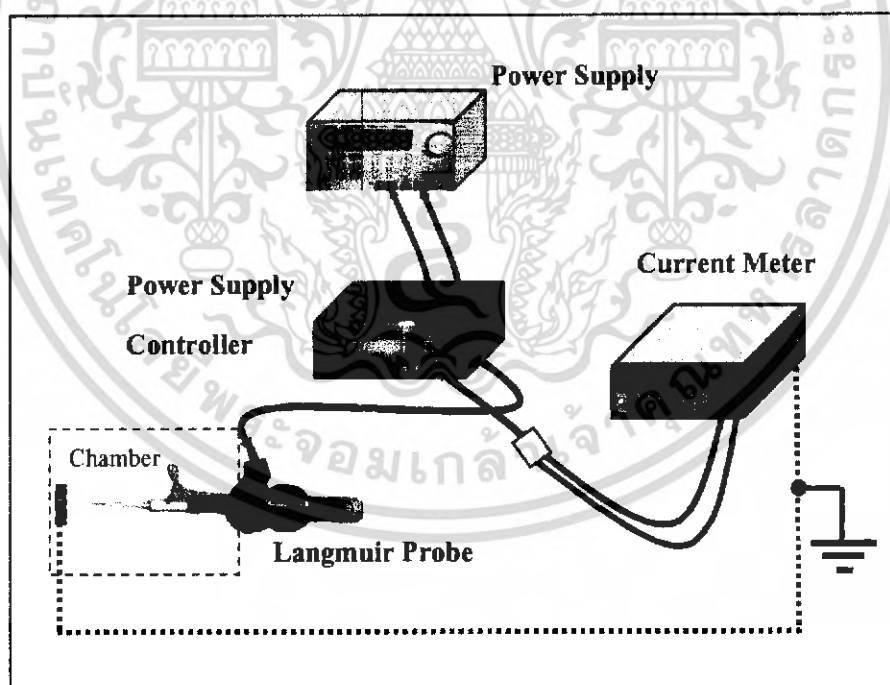
3.7 การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัดแสงมัวร์

เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้ศึกษาว่ามีความใกล้เคียงหรือถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยในขั้นตอนนี้เราจะทำการทดลองเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดและกระแสที่ไหลผ่านหัววัดซึ่งต้องทำการทดลองหลายๆครั้งสำหรับการเลือกช่วงกำลังและความดันที่เหมาะสมเพื่อให้พลาสมามีความเสถียรสูงสุดและทำการเปรียบเทียบกำลังและความดันในช่วงต่างๆ โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังต่อไปนี้

3.7.1 การหาค่าสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัววัดแสงมัวร์

โดยในขั้นตอนนี้เราจะทำการทดลองเพื่อหาค่ากระแสที่ไหลผ่านหัววัดกับแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆที่จ่ายให้กับหัววัด โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.7.1.1 จัดเตรียมอุปกรณ์ของระบบการวัดที่ใช้ในการทดลองดังแผนภาพ



รูปที่ 3.21 แผนภาพวงจรของระบบการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1.2 เปิดระบบปั๊มโรตารี แล้วทิ้งไว้สักครู่ประมาณ 20 นาทีจนกว่าปั๊มรักษาความดันประมาณ

$$9.5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$$

3.7.1.3 เปิดเกจตัวที่สองให้ทำงาน

3.7.1.4 เปิดน้ำเพื่อทำความเย็น (Cooling) ให้ตัวแมกนีตรอน

3.7.1.5 เปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ให้ไฟสีเขียวขึ้นที่ normal

3.7.1.6 รอให้ความดันคงที่ที่ประมาณ -6 mbar เริ่มทำการทดลองได้

3.7.1.7 ป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าแบบผ่านทางวาล์วปรับละเอียด (needle valve) จนมีความดันคงที่ที่ 8×10^{-4} mbar ซึ่งเป็นค่าที่พลาสมามีความเสถียรสูงสุดในการทดลอง

3.7.1.8 เปิดแหล่งจ่ายกำลังไมโครเวฟและปรับกำลังไมโครเวฟไปที่ความดันที่ต้องการในที่นี้คือ 60 W ซึ่งเป็นค่าที่ พลาสมามีความเสถียรสูงสุดในการทดลองเช่นกัน (พร้อมทั้ง บันทึกค่ากำลัง)

3.7.1.9 ทำการปรับระยะ Resonance Cavity ด้วย Plunger เพื่อให้เกิดคลื่นนิ่งที่เหมาะสมหรือ

เกิดแอมพลิจูดสูงสุดที่ตำแหน่งของหลอดแก้วซึ่งวางขวางท่อนำคลื่น (wave guide)

หมายเหตุ เนื่องจากวิธีดังกล่าวข้างต้นสามารถทำให้เกิดพลาสมาได้แต่การที่จะทำให้เกิดพลาสมาที่ เกิดมีลักษณะเสถียรจะต้องทำการปรับ Tuning โดยที่ Tuning เป็นอุปกรณ์ในการปรับ Impedance Matching เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของพลาสมาซึ่งง่ายต่อการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

3.7.1.10 ทำการปรับ Tuning เพื่อให้เกิดพลาสมาเกิดขึ้นอย่างมีเสถียรภาพ

3.7.1.11 เปิดโปรแกรม Plasma Langmuir Probe Controller

หลังจากทำการทดลองเสร็จในแต่ละครั้งจะต้องปรับความดันให้มีค่าต่ำๆ ประมาณ 5×10^{-5} mbar ก่อนที่จะปิดปั๊มจะต้องลดความดันลงและรอให้ปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์หยุดหมุนก่อน แล้วค่อยปิดปั๊ม

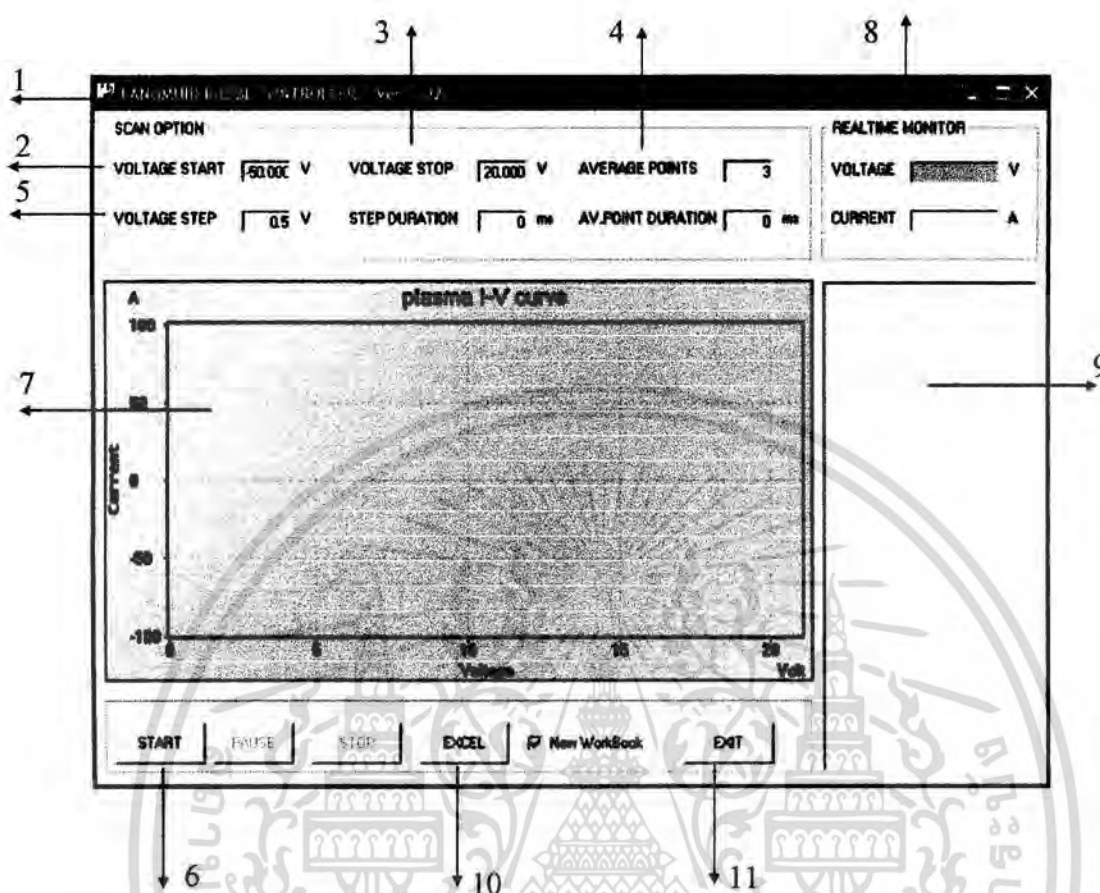
3.7.2 การทำงานของโปรแกรมควบคุมระบบวัดพารามิเตอร์ของพลาสมา

ส่วนของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานและแสดงผลจะทำหน้าที่ในการแสดงรูปภาพ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัดที่วัดได้บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งลักษณะของ โปรแกรมมีดังนี้เลือกไอคอน Langmuir Probe Controller เพื่อ ทำการเปิด โปรแกรมดังรูป



Langmuir Probe Controller.exe
Surface Laboratory, KMITL

รูปที่ 3.22 รูปไอคอนของ Langmuir Probe Controller



รูปที่ 3.23 หน้าจอโปรแกรมของ Plasma Langmuir Controller

- 1 Plasma Langmuir Probe Controller : จะแสดงชื่อ Program ที่ถูกใช้งาน
- 2 Voltage Start : เป็นเมนูให้เลือกขีดค่าเริ่มต้นของ voltage ที่ทำการทดลองในที่นี้ใช้ที่ 50 volt
- 3 Voltage Stop : เป็นเมนูให้เลือกขีดค่า voltage เพื่อให้โปรแกรมหยุดรันในที่นี้ใช้ที่ 20 volt
- 4 Average Points : เป็นการเลือกจำนวนข้อมูลแล้วมาทำการเฉลี่ยในที่นี้เลือกใช้ 3 ข้อมูล
- 5 Voltage step : เป็นการเลือกค่าความละเอียดของช่วงข้อมูลในการพลอตกราฟ
- 6 Start : เป็นตัวควบคุมการเริ่มใช้โปรแกรม
- 7 Plasma I-V curve : เป็นจอแสดงผลการทดลอง โดยจะแสดง curve ตลอดการทดลอง
- 8 Real time Monitor : เป็นช่องที่แสดงค่ากระแสและแรงดันขณะทำการทดลอง โดยแสดงเป็น real time ตลอดทำการทดลอง
- 9 Monitor : เป็นจอแสดงผลการทดลอง โดยจะแสดงเป็นตัวเลขตลอดทำการทดลอง
- 10 Excel : เมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นแล้วกด Excel ระบบจะทำการเชื่อมต่อ Excel อัตโนมัติ
- 11 Exit : กด Exit เมื่อต้องการออกจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากที่กล่าวมาในตอนต้นแล้วว่าการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัดแสงมัวร์ จะแบ่งส่วนการศึกษออกเป็นสองส่วนในส่วนแรกจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่กำลังจ่ายให้กับเมกนีตรอนในค่าต่างๆและในส่วนที่สองจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับระยะการจัดของหัววัด

4.1 วิธีการวิเคราะห์ผลจากกราฟ

การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาขั้นตอนนี้

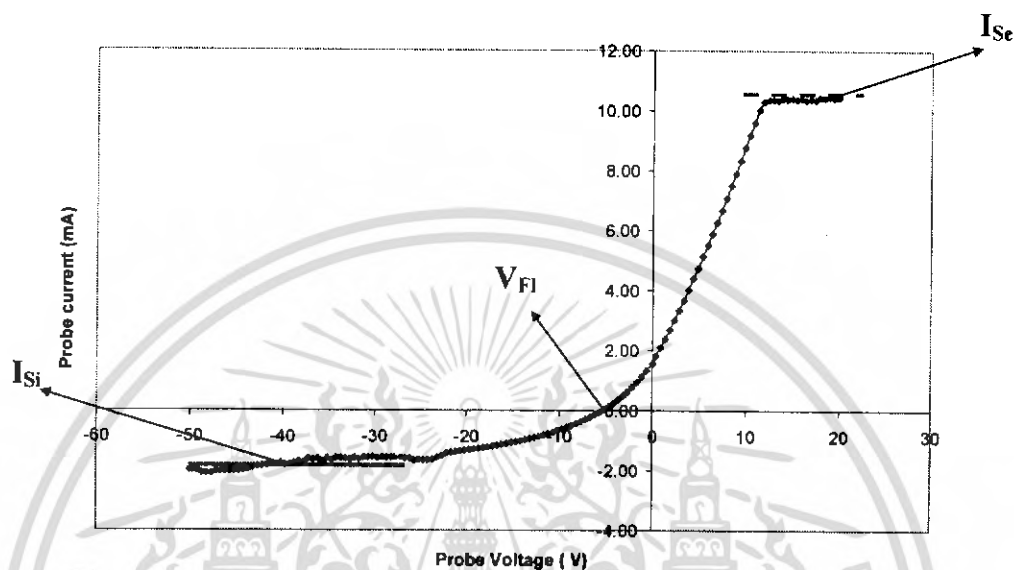
4.1.1 ทำการทดลองเพื่อหาค่า Probe bias(V) , Probe Current(mA) ดังรูป

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2								
3	-50.003	-1.76E-03	-1.76	-1.17	0.34	0.01	0.02	#NUM!
4	-49.000	-1.75E-03	-1.75	-1.16	0.50	0.01	-0.02	#NUM!
5	-49.166	-1.76E-03	-1.76	-1.17	0.50	0.01	0.013	#NUM!
6	-48.000	-1.75E-03	-1.75	-1.16	0.50	0.00	-0	#NUM!
7	-48.167	-1.76E-03	-1.76	-1.17	0.50	0.00	0.008	#NUM!
8	-47.000	-1.75E-03	-1.75	-1.16	0.50	0.00	-0.01	#NUM!
9	-47.167	-1.76E-03	-1.76	-1.17	0.50	0.00	0.003	#NUM!
10	-46.007	-1.76E-03	-1.76	-1.17	0.50	0.00	-0	#NUM!
11	-46.167	-1.76E-03	-1.76	-1.17	0.50	0.01	0.015	#NUM!
12	-45.007	-1.75E-03	-1.75	-1.16	0.50	0.00	0.008	#NUM!
13	-45.167	-1.75E-03	-1.75	-1.16	0.50	0.01	0.012	#NUM!
14	-44.007	-1.74E-03	-1.74	-1.16	0.50	0.00	0.002	#NUM!
15	-44.167	-1.74E-03	-1.74	-1.16	0.50	0.00	0.007	#NUM!
16	-43.000	-1.73E-03	-1.73	-1.14	0.50	0.00	-0.01	#NUM!
17	-43.166	-1.74E-03	-1.74	-1.15	0.50	0.01	0.011	#NUM!
18	-42.007	-1.73E-03	-1.73	-1.14	0.50	0.00	0.005	#NUM!
19	-42.166	-1.73E-03	-1.73	-1.14	0.50	0.00	-0	#NUM!
20	-41.007	-1.73E-03	-1.73	-1.14	0.50	0.00	0.004	#NUM!
21	-41.166	-1.73E-03	-1.73	-1.14	0.50	0.01	0.016	#NUM!
22	-40.000	-1.72E-03	-1.72	-1.13	0.50	0.00	-0	#NUM!
23	-40.166	-1.73E-03	-1.73	-1.14	0.50	0.00	-0	#NUM!
24	-39.000	-1.73E-03	-1.73	-1.14	0.50	0.01	0.011	#NUM!
25	-39.166	-1.72E-03	-1.72	-1.13	0.50	0.01	0.013	#NUM!
26	-38.000	-1.72E-03	-1.72	-1.13	0.50	0.00	0.003	#NUM!
27	-38.166	-1.71E-03	-1.71	-1.12	0.50	0.00	0.003	#NUM!
28	-37.000	-1.71E-03	-1.71	-1.12	0.50	0.00	0.003	#NUM!
29	-37.166	-1.71E-03	-1.71	-1.12	0.50	0.00	-0.01	#NUM!
30	-36.000	-1.71E-03	-1.71	-1.12	0.50	0.00	-0.01	#NUM!
31	-36.166	-1.72E-03	-1.72	-1.13	0.50	0.01	0.012	#NUM!
32	-35.007	-1.71E-03	-1.71	-1.12	0.50	0.00	9E-04	#NUM!
33	-35.166	-1.71E-03	-1.71	-1.12	0.50	0.00	-0	#NUM!
34	-34.000	-1.71E-03	-1.71	-1.12	0.50	0.00	-0	#NUM!

รูปที่ 4.1 การวัดกระแสและแรงดัน

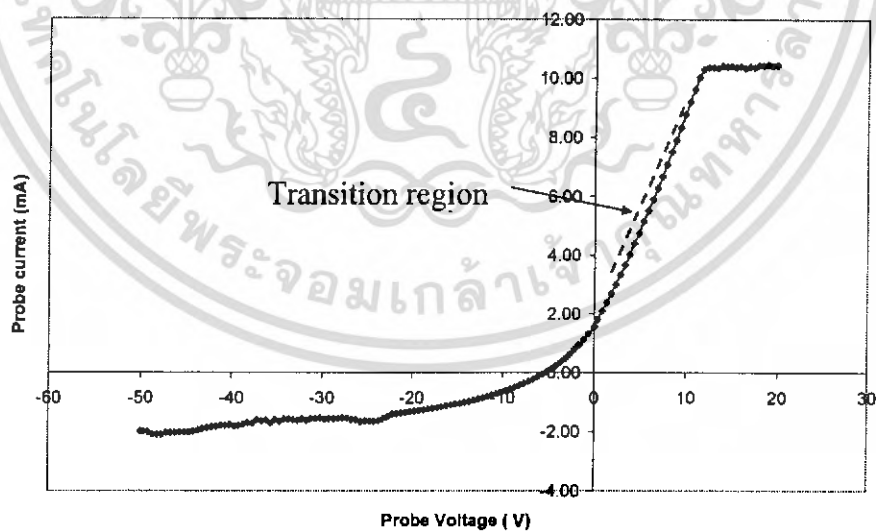
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2. นำผลที่ได้มาพลอตกราฟ I-V Characteristic จะสามารถหาค่า ศักย์ลอยของพลาสมา (Floating Potential: V_{fl}), กระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว (Electron Saturation Current: I_{se}), กระแสไอออนอิ่มตัว (Ion Saturation : I_{si}) ดังรูป



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน

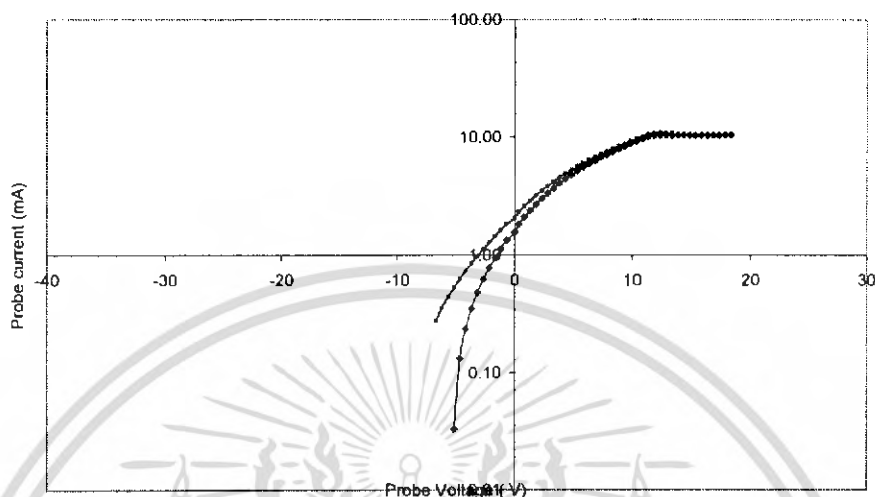
4.1.3. เลือกช่วง Transition มาพลอตกราฟระหว่าง $\ln I$ กับ แรงดันในช่วง Transition ดังรูป



รูปที่ 4.3 กราฟของการเลือกช่วงทรานซิชัน

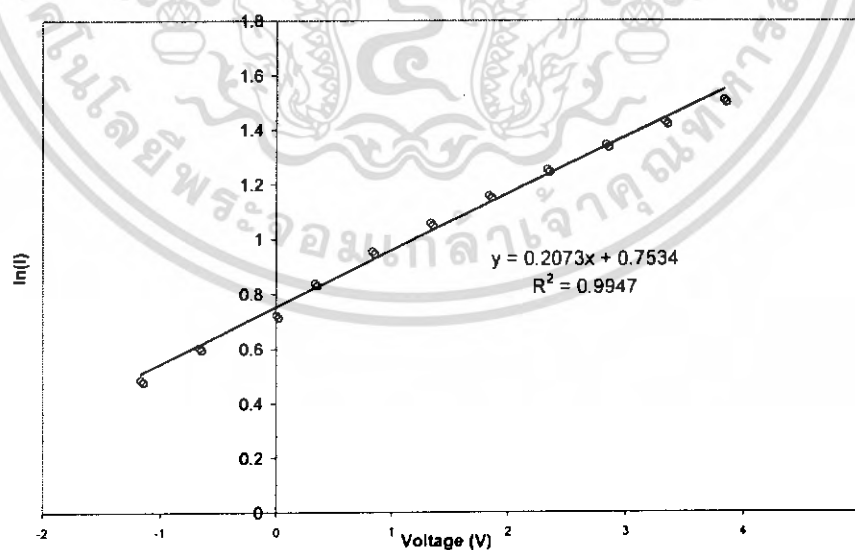
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4. นำค่ากระแสที่ได้ลบกระแสอิเล็กตรอนอิสระ ($I - I_0 = I_t$) และพล็อตกราฟระหว่าง $\ln I_t$ กับ แรงดันในช่วง Transition จะได้กราฟดังรูปเส้นบน



รูปที่ 4.4 กราฟระหว่าง $\ln I_t$ กับ แรงดันในช่วง Transition

4.1.5. หาค่าความชันของกราฟเส้นบน เพื่อนำค่าความชันไปหาค่า kT_e (slope = $1/kT_e$) ดังรูป



รูปที่ 4.5 กราฟหาความชันระหว่าง $\ln I_t$ กับ แรงดันในช่วง Transition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6. นำความชันที่หาได้จากข้อที่ 5 มาหาค่า T_{ev}

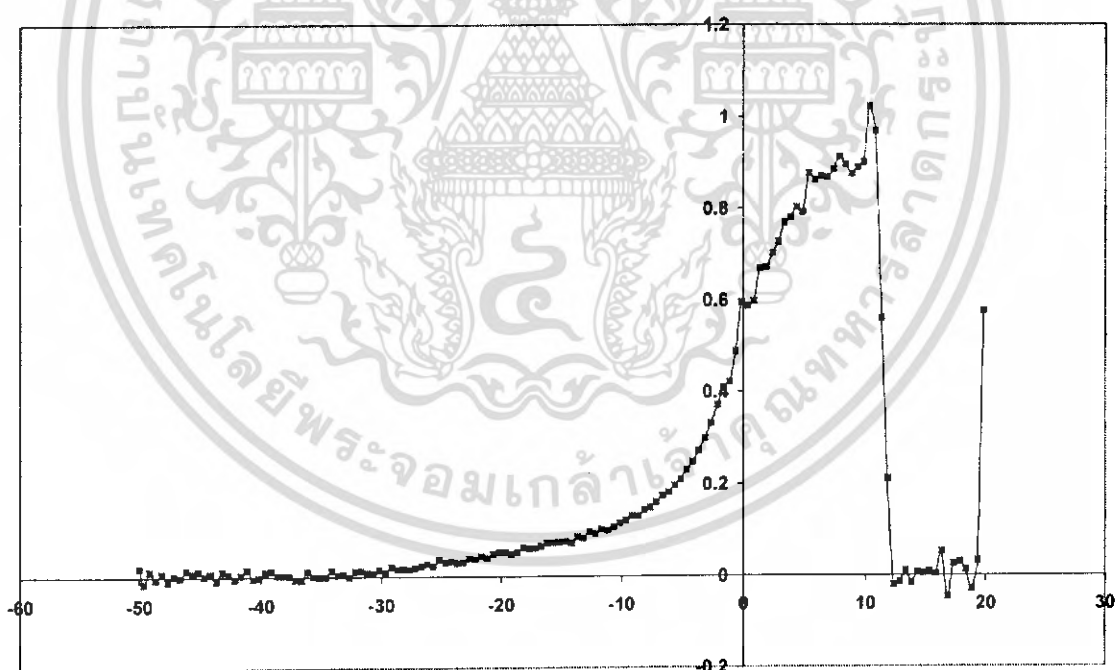
$$I_e = I_{es} \exp\left[\frac{eV}{KT_e}\right] \quad (4.1)$$

$$\ln I_e = I_{es} \left[\frac{eV}{KT_e} \right] \quad (4.2)$$

$$Y = mx + c \quad (4.3)$$

$$\text{Slope} = 1/T_{ev} \quad (4.4)$$

4.1.7 หาค่า V_p โดยการหาค่าอนุพันธ์ระหว่าง dI กับ dV จะให้ค่าสูงสุดดังกราฟ



รูปที่ 4.6 กราฟการหาค่าศักย์ของพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.8. สามารถหาค่า V_{th} ได้จากค่าแรงดันที่มีกระแสเป็นศูนย์และหาค่า n_e ได้จากการแทนค่าลงในสมการ

$$I_{es} = en_e A \left(\frac{K T_e}{2 \pi m} \right)^{1/2} \quad 4.5$$

0.011404	0.45	0.025	0.07265
----------	------	-------	---------

E (eV)	$K T_e$ (J/K)	n_e (cm ⁻³)
4.36454	6.98E-19	8.88E+10

รูปที่ 4.7 ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลของกำลังของคลื่นไมโครเวฟต่อพารามิเตอร์ของพลาสมาที่กำลังจ่าย

55w,57w,60w,61w และ 62w

ผลการทดลอง จากการดำเนินการวิจัยได้ผลการวิจัยดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-1.98E-03	-1.98	-33.667	-1.58E-03	-1.58
-49.667	-1.99E-03	-1.99	-33.167	-1.60E-03	-1.60
-49.167	-2.01E-03	-2.01	-32.666	-1.62E-03	-1.62
-48.667	-2.09E-03	-2.09	-32.166	-1.57E-03	-1.57
-48.167	-2.09E-03	-2.09	-31.667	-1.61E-03	-1.61
-47.667	-2.10E-03	-2.10	-31.167	-1.56E-03	-1.56
-47.167	-2.03E-03	-2.03	-30.667	-1.56E-03	-1.56
-46.667	-2.03E-03	-2.03	-30.166	-1.54E-03	-1.54
-46.167	-2.03E-03	-2.03	-29.667	-1.58E-03	-1.58
-45.667	-2.02E-03	-2.02	-29.167	-1.55E-03	-1.55
-45.167	-2.02E-03	-2.02	-28.667	-1.56E-03	-1.56
-44.667	-2.02E-03	-2.02	-28.167	-1.56E-03	-1.56
-44.167	-1.99E-03	-1.99	-27.667	-1.54E-03	-1.54
-43.667	-1.96E-03	-1.96	-27.167	-1.54E-03	-1.54
-43.167	-1.90E-03	-1.90	-26.667	-1.59E-03	-1.59
-42.667	-1.86E-03	-1.86	-26.167	-1.59E-03	-1.59
-42.167	-1.84E-03	-1.84	-25.667	-1.66E-03	-1.66
-41.666	-1.82E-03	-1.82	-25.167	-1.64E-03	-1.64
-41.167	-1.80E-03	-1.80	-24.667	-1.65E-03	-1.65
-40.667	-1.79E-03	-1.79	-24.167	-1.65E-03	-1.65
-40.166	-1.76E-03	-1.76	-23.667	-1.63E-03	-1.63
-39.666	-1.81E-03	-1.81	-23.167	-1.56E-03	-1.56
-39.166	-1.80E-03	-1.80	-22.667	-1.51E-03	-1.51
-38.666	-1.75E-03	-1.75	-22.167	-1.41E-03	-1.41
-38.167	-1.70E-03	-1.70	-21.667	-1.40E-03	-1.40
-37.667	-1.72E-03	-1.72	-21.167	-1.37E-03	-1.37
-37.167	-1.60E-03	-1.60	-20.667	-1.35E-03	-1.35
-36.667	-1.64E-03	-1.64	-20.167	-1.32E-03	-1.32
-36.167	-1.61E-03	-1.61	-19.667	-1.30E-03	-1.30
-35.667	-1.71E-03	-1.71	-19.167	-1.28E-03	-1.28
-35.167	-1.59E-03	-1.59	-18.667	-1.26E-03	-1.26
-34.667	-1.66E-03	-1.66	-18.167	-1.24E-03	-1.24
-34.167	-1.57E-03	-1.57	-17.667	-1.21E-03	-1.21

ก๊าซอาร์กอนที่กำลัง 55 วัตต์(ความดัน 8×10^{-4} mbar)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

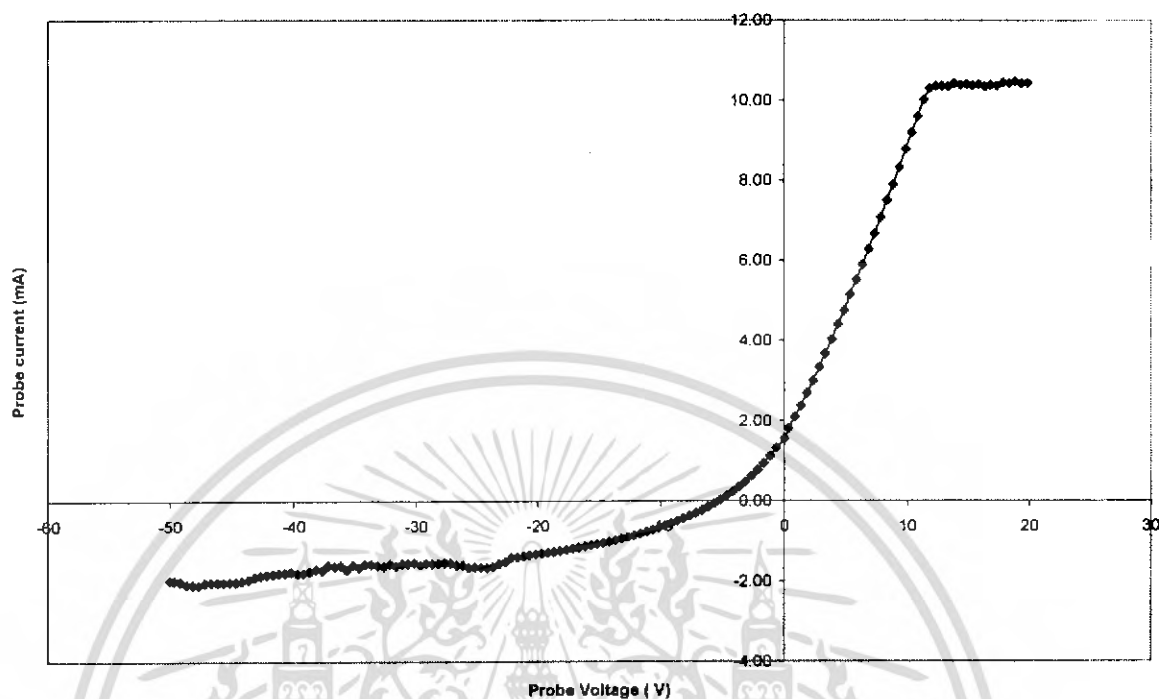
ตารางที่ 4.1(ต่อ) ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	-1.18E-03	-1.18	1.834	2.69E-03	2.69
-16.667	-1.16E-03	-1.16	2.333	3.00E-03	3.00
-16.167	-1.13E-03	-1.13	2.834	3.34E-03	3.34
-15.667	-1.10E-03	-1.10	3.334	3.67E-03	3.67
-15.167	-1.07E-03	-1.07	3.834	4.03E-03	4.03
-14.667	-1.04E-03	-1.04	4.334	4.40E-03	4.40
-14.167	-1.01E-03	-1.01	4.834	4.75E-03	4.75
-13.667	-9.74E-04	-0.97	5.334	5.15E-03	5.15
-13.167	-9.34E-04	-0.93	5.834	5.52E-03	5.52
-12.667	-8.96E-04	-0.90	6.334	5.89E-03	5.89
-12.167	-8.55E-04	-0.86	6.834	6.28E-03	6.28
-11.667	-8.11E-04	-0.81	7.334	6.67E-03	6.67
-11.167	-7.65E-04	-0.77	7.834	7.08E-03	7.08
-10.667	-7.16E-04	-0.72	8.334	7.51E-03	7.51
-10.167	-6.65E-04	-0.67	8.834	7.90E-03	7.90
-9.667	-6.12E-04	-0.61	9.334	8.33E-03	8.33
-9.167	-5.55E-04	-0.56	9.834	8.78E-03	8.78
-8.667	-4.95E-04	-0.49	10.334	9.20E-03	9.20
-8.167	-4.32E-04	-0.43	10.834	9.61E-03	9.61
-7.667	-3.66E-04	-0.37	11.334	1.00E-02	10.03
-7.167	-2.95E-04	-0.30	11.834	1.03E-02	10.31
-6.667	-2.22E-04	-0.22	12.334	1.04E-02	10.37
-6.167	-1.40E-04	-0.14	12.834	1.04E-02	10.37
-5.667	-5.74E-05	-0.06	13.334	1.04E-02	10.35
-5.167	3.30E-05	0.03	13.834	1.04E-02	10.43
-4.667	1.32E-04	0.13	14.334	1.04E-02	10.39
-4.167	2.35E-04	0.24	14.834	1.04E-02	10.41
-3.667	3.54E-04	0.35	15.334	1.04E-02	10.38
-3.167	4.83E-04	0.48	15.834	1.04E-02	10.41
-2.667	6.27E-04	0.63	16.334	1.04E-02	10.36
-2.168	7.80E-04	0.78	16.834	1.04E-02	10.40
-1.667	9.43E-04	0.94	17.334	1.04E-02	10.37
-1.167	1.13E-03	1.13	17.833	1.05E-02	10.45
-0.667	1.33E-03	1.33	18.333	1.04E-02	10.43
0	1.56E-03	1.56	18.834	1.05E-02	10.47
0.334	1.81E-03	1.81	19.333	1.04E-02	10.43
0.834	2.10E-03	2.10	19.833	1.04E-02	10.44
1.333	2.38E-03	2.38			

ก๊าซอาร์กอนที่กำลัง 55 วัตต์(ความดัน $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma 6×10^{-4} mbar ที่กำลัง 55 วัตต์



รูปที่ 4.8 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์จากกราฟ

Slope	I_{s1} (mA)	V_f (V)	V_p (V)	I_{s2}
0.207275	-0.50	-5.6	11.33	0.010415

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2$ Te
0.45	0.025	0.072649	3.255769231

พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

T (eV)	KTe (J)	n_e (cm^{-3})
4.824508	7.72E-19	7.71E+10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-2.39E-03	-2.39	-33.666	-1.91E-03	-1.91
-49.667	-2.12E-03	-2.12	-33.166	-1.87E-03	-1.87
-49.167	-2.06E-03	-2.06	-32.666	-1.90E-03	-1.90
-48.667	-2.05E-03	-2.05	-32.166	-1.89E-03	-1.89
-48.167	-2.05E-03	-2.05	-31.667	-1.83E-03	-1.83
-47.667	-2.15E-03	-2.15	-31.167	-1.83E-03	-1.83
-47.167	-2.15E-03	-2.15	-30.667	-1.83E-03	-1.83
-46.667	-2.03E-03	-2.03	-30.167	-1.82E-03	-1.82
-46.167	-2.02E-03	-2.02	-29.667	-1.69E-03	-1.69
-45.667	-2.01E-03	-2.01	-29.167	-1.74E-03	-1.74
-45.167	-2.00E-03	-2.00	-28.667	-1.59E-03	-1.59
-44.667	-2.00E-03	-2.00	-28.167	-1.56E-03	-1.56
-44.167	-2.00E-03	-2.00	-27.667	-1.52E-03	-1.52
-43.667	-2.00E-03	-2.00	-27.167	-1.51E-03	-1.51
-43.167	-1.99E-03	-1.99	-26.667	-1.49E-03	-1.49
-42.667	-1.99E-03	-1.99	-26.167	-1.48E-03	-1.48
-42.167	-1.99E-03	-1.99	-25.667	-1.47E-03	-1.47
-41.666	-1.98E-03	-1.98	-25.167	-1.46E-03	-1.46
-41.167	-1.98E-03	-1.98	-24.667	-1.45E-03	-1.45
-40.666	-2.05E-03	-2.05	-24.167	-1.43E-03	-1.43
-40.166	-1.97E-03	-1.97	-23.667	-1.42E-03	-1.42
-39.666	-1.97E-03	-1.97	-23.167	-1.40E-03	-1.40
-39.166	-1.96E-03	-1.96	-22.667	-1.39E-03	-1.39
-38.667	-1.96E-03	-1.96	-22.167	-1.38E-03	-1.38
-38.167	-1.95E-03	-1.95	-21.667	-1.36E-03	-1.36
-37.667	-1.94E-03	-1.94	-21.167	-1.34E-03	-1.34
-37.167	-1.94E-03	-1.94	-20.667	-1.32E-03	-1.32
-36.667	-1.94E-03	-1.94	-20.167	-1.29E-03	-1.29
-36.167	-1.93E-03	-1.93	-19.667	-1.28E-03	-1.28
-35.667	-1.93E-03	-1.93	-19.167	-1.25E-03	-1.25
-35.167	-1.93E-03	-1.93	-18.667	-1.23E-03	-1.23
-34.667	-1.91E-03	-1.91	-18.167	-1.21E-03	-1.21
-34.167	-1.90E-03	-1.90	-17.667	-1.18E-03	-1.18

ก๊าซอาร์กอนที่กำลัง 57 วัตต์ (ความดัน $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

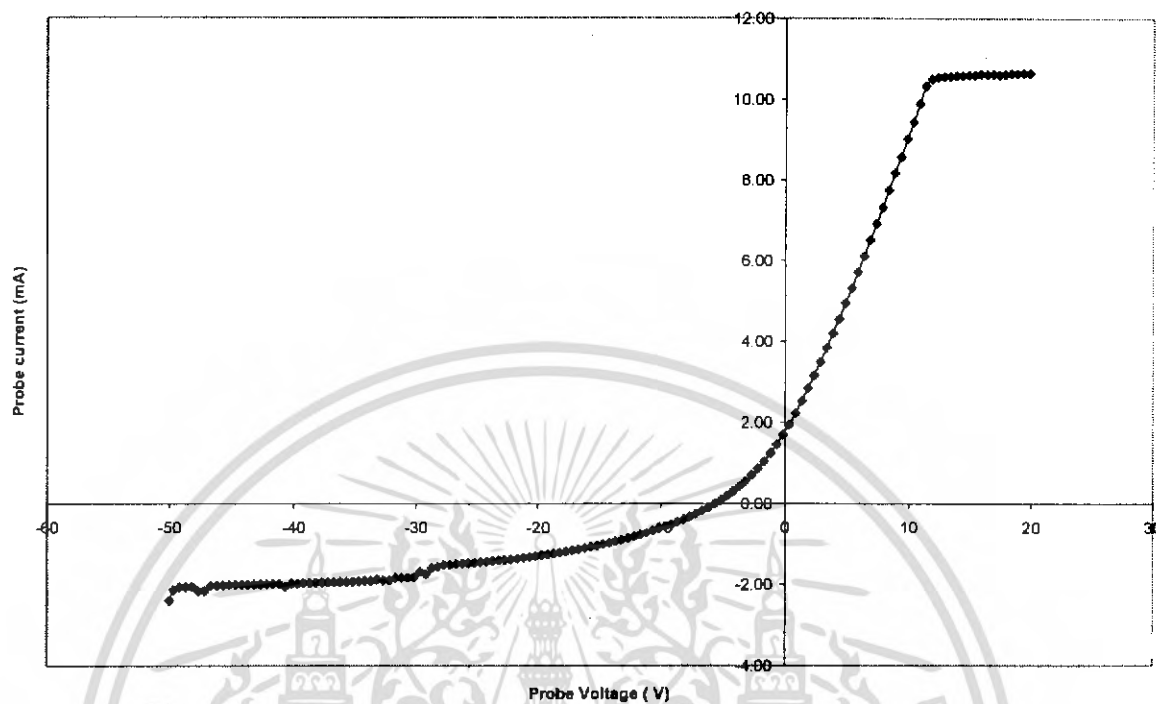
ตารางที่ 4.2(ต่อ) ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	-1.15E-03	-1.15	1.833	2.84E-03	2.84
-16.667	-1.13E-03	-1.13	2.333	3.16E-03	3.16
-16.167	-1.10E-03	-1.10	2.833	3.50E-03	3.50
-15.667	-1.07E-03	-1.07	3.333	3.85E-03	3.85
-15.167	-1.04E-03	-1.04	3.833	4.20E-03	4.20
-14.667	-1.00E-03	-1.00	4.333	4.56E-03	4.56
-14.167	-9.68E-04	-0.97	4.833	4.95E-03	4.95
-13.667	-9.29E-04	-0.93	5.333	5.33E-03	5.33
-13.167	-8.92E-04	-0.89	5.833	5.72E-03	5.72
-12.667	-8.52E-04	-0.85	6.333	6.11E-03	6.11
-12.167	-8.12E-04	-0.81	6.833	6.52E-03	6.52
-11.667	-7.65E-04	-0.76	7.333	6.92E-03	6.92
-11.167	-7.19E-04	-0.72	7.833	7.33E-03	7.33
-10.667	-6.70E-04	-0.67	8.333	7.75E-03	7.75
-10.167	-6.20E-04	-0.62	8.833	8.17E-03	8.17
-9.667	-5.65E-04	-0.57	9.333	8.57E-03	8.57
-9.167	-5.10E-04	-0.51	9.833	9.03E-03	9.03
-8.667	-4.49E-04	-0.45	10.333	9.44E-03	9.44
-8.167	-3.87E-04	-0.39	10.833	9.90E-03	9.90
-7.667	-3.21E-04	-0.32	11.333	1.03E-02	10.33
-7.167	-2.50E-04	-0.25	11.833	1.05E-02	10.51
-6.667	-1.74E-04	-0.17	12.333	1.06E-02	10.55
-6.167	-9.44E-05	-0.09	12.833	1.06E-02	10.57
-5.667	-9.09E-06	-0.01	13.333	1.06E-02	10.57
-5.167	8.79E-05	0.09	13.833	1.06E-02	10.59
-4.667	1.87E-04	0.19	14.333	1.06E-02	10.59
-4.167	3.00E-04	0.30	14.833	1.06E-02	10.61
-3.667	4.19E-04	0.42	15.333	1.06E-02	10.61
-3.167	5.50E-04	0.55	15.833	1.06E-02	10.62
-2.667	6.96E-04	0.70	16.333	1.06E-02	10.62
-2.167	8.59E-04	0.86	16.833	1.06E-02	10.63
-1.667	1.04E-03	1.04	17.333	1.06E-02	10.61
-1.167	1.24E-03	1.24	17.833	1.06E-02	10.63
-0.667	1.45E-03	1.45	18.333	1.06E-02	10.65
-0.167	1.70E-03	1.70	18.833	1.06E-02	10.64
0.333	1.95E-03	1.95	19.333	1.07E-02	10.65
0.833	2.23E-03	2.23	19.833	1.07E-02	10.65
1.333	2.53E-03	2.53			

ก๊าซอาร์กอนที่กำลัง 57 วัตต์(ความดัน 8×10^{-4} mbar)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma 6×10^{-4} mbar ที่กำลัง 57 วัตต์



รูปที่ 4.9 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์จากกราฟ

Slope	I_{si} (mA)	V_f (V)	V_p (V)	I_{se}
0.210042	-0.54	-5.5	11.33	0.010645

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2 T_e$
0.45	0.025	0.072649	3.236538462

พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

T (eV)	$K T_e$ (J)	n_e (cm^{-3})
4.76096	7.62E-19	7.93E+10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-1.70E-03	-1.70	-33.667	-1.65E-03	-1.65
-49.666	-1.70E-03	-1.70	-33.167	-1.65E-03	-1.65
-49.166	-1.70E-03	-1.70	-32.667	-1.64E-03	-1.64
-48.667	-1.70E-03	-1.70	-32.166	-1.64E-03	-1.64
-48.167	-1.70E-03	-1.70	-31.667	-1.64E-03	-1.64
-47.667	-1.70E-03	-1.70	-31.167	-1.63E-03	-1.63
-47.167	-1.71E-03	-1.71	-30.667	-1.63E-03	-1.63
-46.666	-1.70E-03	-1.70	-30.167	-1.62E-03	-1.62
-46.167	-1.70E-03	-1.70	-29.667	-1.61E-03	-1.61
-45.667	-1.70E-03	-1.70	-29.167	-1.61E-03	-1.61
-45.167	-1.70E-03	-1.70	-28.667	-1.60E-03	-1.60
-44.666	-1.70E-03	-1.70	-28.167	-1.59E-03	-1.59
-44.167	-1.70E-03	-1.70	-27.667	-1.58E-03	-1.58
-43.667	-1.69E-03	-1.69	-27.167	-1.57E-03	-1.57
-43.167	-1.69E-03	-1.69	-26.667	-1.57E-03	-1.57
-42.667	-1.69E-03	-1.69	-26.167	-1.55E-03	-1.55
-42.167	-1.69E-03	-1.69	-25.667	-1.54E-03	-1.54
-41.667	-1.69E-03	-1.69	-25.167	-1.53E-03	-1.53
-41.167	-1.68E-03	-1.68	-24.667	-1.52E-03	-1.52
-40.667	-1.68E-03	-1.68	-24.167	-1.50E-03	-1.50
-40.166	-1.68E-03	-1.68	-23.667	-1.48E-03	-1.48
-39.666	-1.67E-03	-1.67	-23.167	-1.46E-03	-1.46
-39.167	-1.67E-03	-1.67	-22.667	-1.45E-03	-1.45
-38.667	-1.67E-03	-1.67	-22.167	-1.43E-03	-1.43
-38.166	-1.67E-03	-1.67	-21.667	-1.41E-03	-1.41
-37.667	-1.67E-03	-1.67	-21.167	-1.39E-03	-1.39
-37.167	-1.67E-03	-1.67	-20.667	-1.36E-03	-1.36
-36.667	-1.66E-03	-1.66	-20.167	-1.34E-03	-1.34
-36.167	-1.66E-03	-1.66	-19.667	-1.33E-03	-1.33
-35.667	-1.66E-03	-1.66	-19.167	-1.31E-03	-1.31
-35.167	-1.66E-03	-1.66	-18.667	-1.28E-03	-1.28
-34.667	-1.65E-03	-1.65	-18.167	-1.26E-03	-1.26
-34.167	-1.65E-03	-1.65	-17.667	-1.23E-03	-1.23

ก๊าซอาร์กอนที่กำลัง 60 วัตต์(ความดัน $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

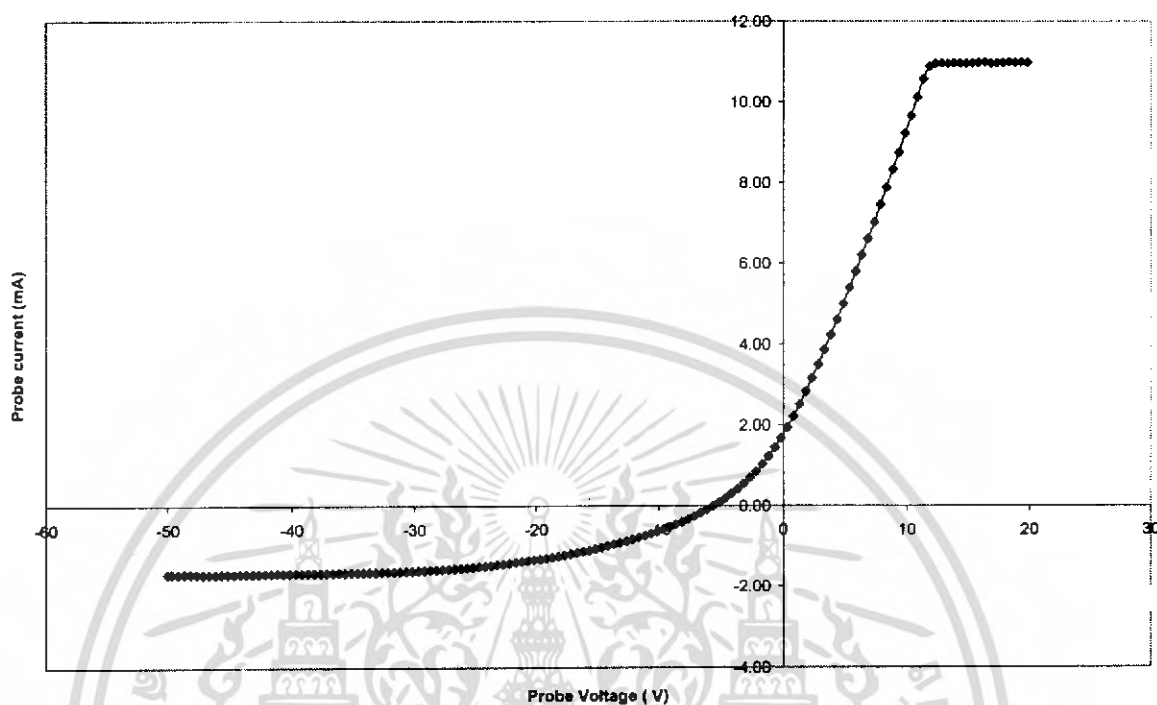
ตารางที่ 4.3(ต่อ) ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	-1.20E-03	-1.20	1.833	2.84E-03	2.84
-16.667	-1.17E-03	-1.17	2.333	3.17E-03	3.17
-16.167	-1.14E-03	-1.14	2.833	3.50E-03	3.50
-15.667	-1.11E-03	-1.11	3.333	3.86E-03	3.86
-15.167	-1.07E-03	-1.07	3.833	4.23E-03	4.23
-14.667	-1.04E-03	-1.04	4.333	4.61E-03	4.61
-14.167	-9.96E-04	-1.00	4.833	4.99E-03	4.99
-13.667	-9.56E-04	-0.96	5.333	5.39E-03	5.39
-13.167	-9.19E-04	-0.92	5.833	5.80E-03	5.80
-12.667	-8.78E-04	-0.88	6.333	6.20E-03	6.20
-12.167	-8.36E-04	-0.84	6.833	6.61E-03	6.61
-11.667	-7.87E-04	-0.79	7.333	7.02E-03	7.02
-11.167	-7.41E-04	-0.74	7.833	7.46E-03	7.46
-10.667	-6.90E-04	-0.69	8.333	7.88E-03	7.88
-10.167	-6.38E-04	-0.64	8.833	8.33E-03	8.33
-9.667	-5.82E-04	-0.58	9.333	8.75E-03	8.75
-9.167	-5.25E-04	-0.53	9.833	9.23E-03	9.23
-8.667	-4.63E-04	-0.46	10.333	9.66E-03	9.66
-8.167	-3.99E-04	-0.40	10.833	1.01E-02	10.12
-7.667	-3.28E-04	-0.33	11.333	1.06E-02	10.57
-7.167	-2.58E-04	-0.26	11.833	1.09E-02	10.88
-6.667	-1.79E-04	-0.18	12.333	1.10E-02	10.96
-6.167	-9.47E-05	-0.09	12.833	1.10E-02	10.96
-5.667	-8.86E-06	-0.01	13.333	1.10E-02	10.96
-5.167	8.75E-05	0.09	13.833	1.10E-02	10.97
-4.667	1.89E-04	0.19	14.333	1.10E-02	10.96
-4.167	3.02E-04	0.30	14.833	1.10E-02	10.96
-3.667	4.19E-04	0.42	15.333	1.10E-02	10.97
-3.167	5.52E-04	0.55	15.833	1.10E-02	10.98
-2.667	6.97E-04	0.70	16.333	1.10E-02	10.99
-2.167	8.60E-04	0.86	16.833	1.10E-02	10.96
-1.667	1.04E-03	1.04	17.333	1.10E-02	10.97
-1.167	1.23E-03	1.23	17.833	1.10E-02	10.98
-0.667	1.45E-03	1.45	18.333	1.10E-02	11.00
-0.167	1.69E-03	1.69	18.833	1.10E-02	10.98
0.333	1.94E-03	1.94	19.333	1.10E-02	10.99
0.833	2.22E-03	2.22	19.833	1.10E-02	10.98
1.333	2.52E-03	2.52			

ก๊าซอาร์กอนที่ก่้าง 60 วัตต์(ความดัน 8×10^{-4} mbar)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma 6×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์



รูปที่ 4.10 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์จากกราฟ

Slope	I_{si} (mA)	V_f (V)	V_p (V)	I_{se}
0.2243711	-0.48	-5.6	11.33	0.010977

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2$ Te
0.45	0.025	0.072649	3.255769231

พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

T (eV)	KTe (J)	n_e (cm^{-3})
4.4569022	7.13E-19	8.46E+10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-2.01E-03	-2.01	-33.666	-1.64E-03	-1.64
-49.666	-2.00E-03	-2.00	-33.166	-1.64E-03	-1.64
-49.166	-2.00E-03	-2.00	-32.666	-1.64E-03	-1.64
-48.666	-1.99E-03	-1.99	-32.166	-1.64E-03	-1.64
-48.166	-1.98E-03	-1.98	-31.667	-1.63E-03	-1.63
-47.666	-1.98E-03	-1.98	-31.167	-1.63E-03	-1.63
-47.167	-1.95E-03	-1.95	-30.667	-1.63E-03	-1.63
-46.666	-1.87E-03	-1.87	-30.167	-1.62E-03	-1.62
-46.167	-1.72E-03	-1.72	-29.667	-1.61E-03	-1.61
-45.667	-1.68E-03	-1.68	-29.167	-1.60E-03	-1.60
-45.167	-1.68E-03	-1.68	-28.667	-1.60E-03	-1.60
-44.667	-1.68E-03	-1.68	-28.167	-1.59E-03	-1.59
-44.167	-1.68E-03	-1.68	-27.667	-1.58E-03	-1.58
-43.666	-1.67E-03	-1.67	-27.167	-1.57E-03	-1.57
-43.166	-1.67E-03	-1.67	-26.667	-1.56E-03	-1.56
-42.667	-1.67E-03	-1.67	-26.167	-1.55E-03	-1.55
-42.167	-1.67E-03	-1.67	-25.667	-1.53E-03	-1.53
-41.667	-1.67E-03	-1.67	-25.167	-1.52E-03	-1.52
-41.166	-1.67E-03	-1.67	-24.667	-1.50E-03	-1.50
-40.667	-1.67E-03	-1.67	-24.167	-1.49E-03	-1.49
-40.166	-1.67E-03	-1.67	-23.667	-1.47E-03	-1.47
-39.666	-1.67E-03	-1.67	-23.167	-1.46E-03	-1.46
-39.166	-1.66E-03	-1.66	-22.667	-1.44E-03	-1.44
-38.667	-1.66E-03	-1.66	-22.167	-1.42E-03	-1.42
-38.166	-1.66E-03	-1.66	-21.667	-1.40E-03	-1.40
-37.667	-1.66E-03	-1.66	-21.167	-1.38E-03	-1.38
-37.167	-1.66E-03	-1.66	-20.667	-1.36E-03	-1.36
-36.667	-1.66E-03	-1.66	-20.167	-1.33E-03	-1.33
-36.167	-1.65E-03	-1.65	-19.667	-1.30E-03	-1.30
-35.667	-1.65E-03	-1.65	-19.167	-1.28E-03	-1.28
-35.167	-1.65E-03	-1.65	-18.667	-1.25E-03	-1.25
-34.666	-1.65E-03	-1.65	-18.167	-1.23E-03	-1.23
-34.166	-1.64E-03	-1.64	-17.667	-1.20E-03	-1.20

ก๊าซอาร์กอนที่ก่้าง 61 วัตต์ (ความดัน $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

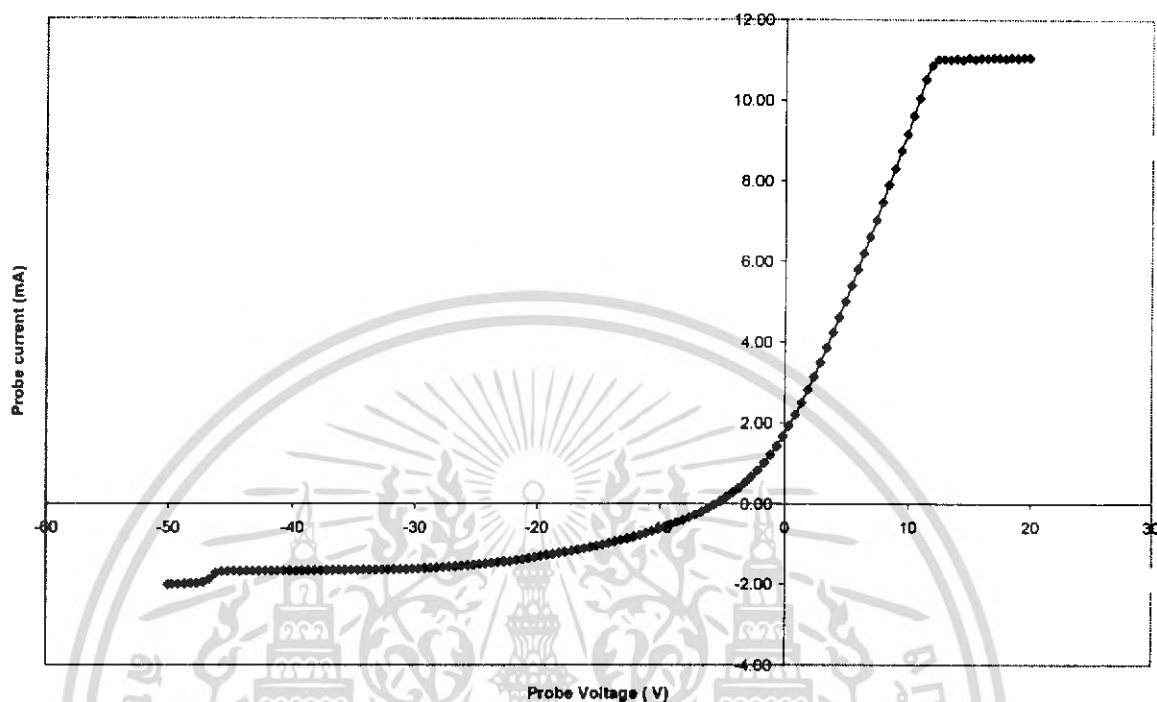
ตารางที่ 4.4 (ต่อ)ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias 1(V)	I-V Characteristic		Probe bias 2(V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	-1.17E-03	-1.17	1.833	2.82E-03	2.82
-16.667	-1.14E-03	-1.14	2.333	3.15E-03	3.15
-16.167	-1.11E-03	-1.11	2.833	3.50E-03	3.50
-15.667	-1.08E-03	-1.08	3.333	3.87E-03	3.87
-15.167	-1.05E-03	-1.05	3.833	4.24E-03	4.24
-14.667	-1.01E-03	-1.01	4.333	4.61E-03	4.61
-14.167	-9.80E-04	-0.98	4.833	5.00E-03	5.00
-13.667	-9.42E-04	-0.94	5.333	5.40E-03	5.40
-13.167	-9.06E-04	-0.91	5.833	5.80E-03	5.80
-12.667	-8.63E-04	-0.86	6.333	6.20E-03	6.20
-12.167	-8.22E-04	-0.82	6.833	6.61E-03	6.61
-11.667	-7.79E-04	-0.78	7.333	7.02E-03	7.02
-11.167	-7.30E-04	-0.73	7.833	7.47E-03	7.47
-10.667	-6.83E-04	-0.68	8.333	7.90E-03	7.90
-10.167	-6.34E-04	-0.63	8.833	8.31E-03	8.31
-9.667	-5.79E-04	-0.58	9.333	8.75E-03	8.75
-9.167	-5.21E-04	-0.52	9.833	9.16E-03	9.16
-8.667	-4.63E-04	-0.46	10.333	9.62E-03	9.62
-8.167	-4.01E-04	-0.40	10.833	1.01E-02	10.05
-7.667	-3.35E-04	-0.34	11.333	1.05E-02	10.53
-7.167	-2.66E-04	-0.27	11.833	1.09E-02	10.88
-6.667	-1.91E-04	-0.19	12.333	1.10E-02	11.02
-6.167	-1.09E-04	-0.11	12.833	1.10E-02	11.03
-5.667	-2.33E-05	-0.02	13.333	1.10E-02	11.02
-5.167	7.00E-05	0.07	13.833	1.10E-02	11.04
-4.667	1.70E-04	0.17	14.333	1.10E-02	11.01
-4.167	2.79E-04	0.28	14.833	1.11E-02	11.06
-3.667	4.00E-04	0.40	15.333	1.10E-02	11.03
-3.167	5.30E-04	0.53	15.833	1.11E-02	11.06
-2.667	6.75E-04	0.68	16.333	1.11E-02	11.05
-2.167	8.34E-04	0.83	16.833	1.11E-02	11.07
-1.667	1.01E-03	1.01	17.333	1.11E-02	11.06
-1.167	1.21E-03	1.21	17.833	1.10E-02	11.04
-0.667	1.43E-03	1.43	18.333	1.11E-02	11.07
-0.167	1.67E-03	1.67	18.833	1.11E-02	11.06
0.333	1.93E-03	1.93	19.333	1.11E-02	11.08
0.833	2.21E-03	2.21	19.833	1.11E-02	11.06
1.333	2.51E-03	2.51			

ก๊าซอาร์กอนที่กำลัง 61 วัตต์(ความดัน $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma 6×10^{-4} mbar ที่กำลัง 61 วัตต์



รูปที่ 4.11 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์จากกราฟ

Slope	I_{s1} (mA)	V_f (V)	V_p (V)	I_{s2}
0.228552	-0.48	-5.6	11.33	0.011062

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2 T_e$
0.45	0.025	0.072649	3.255769231

พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

T (eV)	$K T_e$ (J)	n_e (cm^{-3})
4.375377	7.00E-19	8.60E+10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-1.76E-03	-1.76	-33.666	-1.70E-03	-1.70
-49.666	-1.75E-03	-1.75	-33.166	-1.70E-03	-1.70
-49.166	-1.76E-03	-1.76	-32.666	-1.70E-03	-1.70
-48.666	-1.75E-03	-1.75	-32.166	-1.70E-03	-1.70
-48.167	-1.76E-03	-1.76	-31.666	-1.69E-03	-1.69
-47.666	-1.75E-03	-1.75	-31.167	-1.69E-03	-1.69
-47.167	-1.76E-03	-1.76	-30.666	-1.68E-03	-1.68
-46.667	-1.76E-03	-1.76	-30.167	-1.68E-03	-1.68
-46.167	-1.76E-03	-1.76	-29.667	-1.67E-03	-1.67
-45.667	-1.75E-03	-1.75	-29.167	-1.67E-03	-1.67
-45.167	-1.75E-03	-1.75	-28.667	-1.66E-03	-1.66
-44.667	-1.74E-03	-1.74	-28.167	-1.65E-03	-1.65
-44.167	-1.74E-03	-1.74	-27.667	-1.64E-03	-1.64
-43.666	-1.73E-03	-1.73	-27.167	-1.63E-03	-1.63
-43.166	-1.74E-03	-1.74	-26.667	-1.62E-03	-1.62
-42.667	-1.73E-03	-1.73	-26.167	-1.61E-03	-1.61
-42.166	-1.73E-03	-1.73	-25.667	-1.60E-03	-1.60
-41.667	-1.73E-03	-1.73	-25.167	-1.58E-03	-1.58
-41.166	-1.73E-03	-1.73	-24.667	-1.57E-03	-1.57
-40.666	-1.72E-03	-1.72	-24.167	-1.55E-03	-1.55
-40.166	-1.73E-03	-1.73	-23.667	-1.53E-03	-1.53
-39.666	-1.73E-03	-1.73	-23.167	-1.52E-03	-1.52
-39.166	-1.72E-03	-1.72	-22.667	-1.50E-03	-1.50
-38.666	-1.72E-03	-1.72	-22.167	-1.48E-03	-1.48
-38.166	-1.71E-03	-1.71	-21.667	-1.46E-03	-1.46
-37.666	-1.71E-03	-1.71	-21.167	-1.44E-03	-1.44
-37.166	-1.71E-03	-1.71	-20.667	-1.42E-03	-1.42
-36.666	-1.71E-03	-1.71	-20.167	-1.40E-03	-1.40
-36.166	-1.72E-03	-1.72	-19.667	-1.37E-03	-1.37
-35.667	-1.71E-03	-1.71	-19.167	-1.34E-03	-1.34
-35.166	-1.71E-03	-1.71	-18.667	-1.32E-03	-1.32
-34.666	-1.71E-03	-1.71	-18.167	-1.29E-03	-1.29
-34.167	-1.71E-03	-1.71	-17.667	-1.26E-03	-1.26

ก๊าซอาร์กอนที่กำลั 62 วัตต์(ความดัน $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

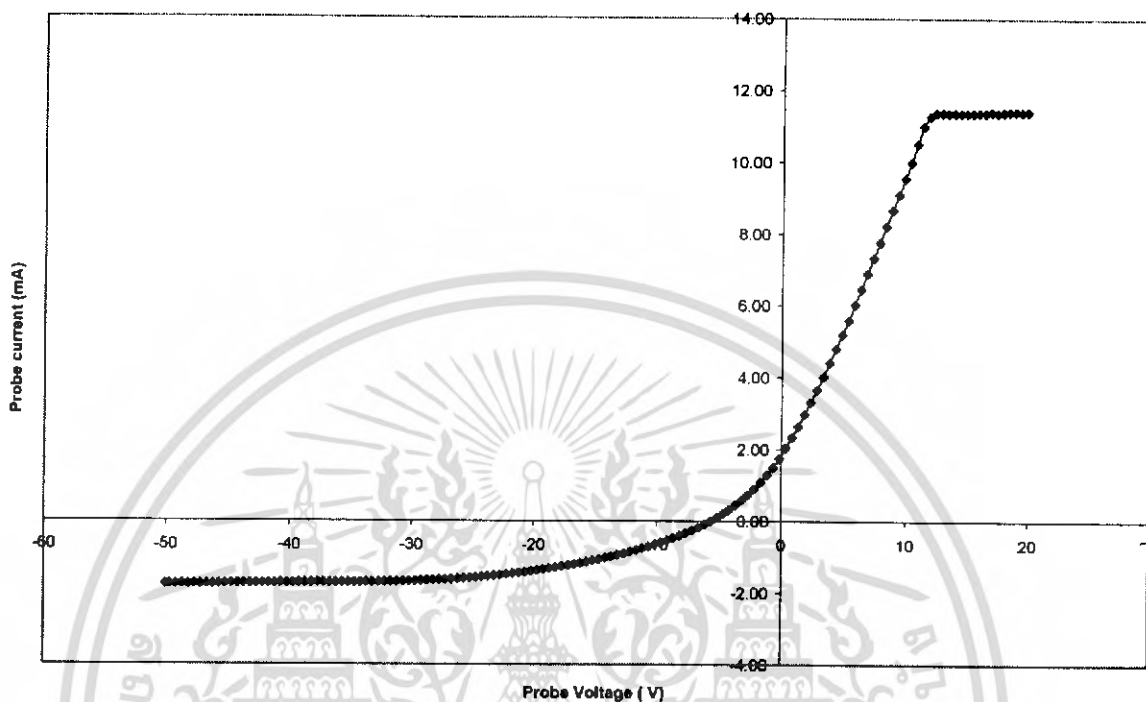
ตารางที่ 4.5(ต่อ) ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	-1.23E-03	-1.23	1.833	2.97E-03	2.97
-16.667	-1.20E-03	-1.20	2.333	3.30E-03	3.30
-16.167	-1.17E-03	-1.17	2.833	3.66E-03	3.66
-15.667	-1.13E-03	-1.13	3.333	4.02E-03	4.02
-15.167	-1.10E-03	-1.10	3.833	4.40E-03	4.40
-14.667	-1.06E-03	-1.06	4.333	4.79E-03	4.79
-14.167	-1.02E-03	-1.02	4.833	5.19E-03	5.19
-13.667	-9.84E-04	-0.98	5.333	5.59E-03	5.59
-13.167	-9.41E-04	-0.94	5.833	6.03E-03	6.03
-12.667	-9.00E-04	-0.90	6.333	6.46E-03	6.46
-12.167	-8.51E-04	-0.85	6.833	6.89E-03	6.89
-11.667	-8.05E-04	-0.80	7.333	7.33E-03	7.33
-11.167	-7.54E-04	-0.75	7.833	7.77E-03	7.77
-10.667	-7.04E-04	-0.70	8.333	8.23E-03	8.23
-10.167	-6.50E-04	-0.65	8.833	8.68E-03	8.68
-9.667	-5.92E-04	-0.59	9.333	9.11E-03	9.11
-9.167	-5.31E-04	-0.53	9.833	9.56E-03	9.56
-8.667	-4.66E-04	-0.47	10.333	1.00E-02	10.01
-8.167	-4.00E-04	-0.40	10.833	1.05E-02	10.52
-7.667	-3.29E-04	-0.33	11.333	1.10E-02	11.00
-7.167	-2.55E-04	-0.25	11.833	1.13E-02	11.28
-6.667	-1.74E-04	-0.17	12.333	1.14E-02	11.39
-6.167	-8.66E-05	-0.09	12.833	1.14E-02	11.38
-5.667	4.50E-06	0.00	13.333	1.14E-02	11.37
-5.167	1.03E-04	0.10	13.833	1.14E-02	11.38
-4.667	2.08E-04	0.21	14.333	1.14E-02	11.37
-4.167	3.23E-04	0.32	14.833	1.14E-02	11.37
-3.667	4.47E-04	0.45	15.333	1.14E-02	11.37
-3.167	5.84E-04	0.58	15.833	1.14E-02	11.38
-2.667	7.33E-04	0.73	16.333	1.14E-02	11.38
-2.167	8.99E-04	0.90	16.833	1.14E-02	11.41
-1.667	1.08E-03	1.08	17.333	1.14E-02	11.38
-1.167	1.29E-03	1.29	17.833	1.14E-02	11.40
-0.667	1.50E-03	1.50	18.333	1.14E-02	11.41
-0.167	1.74E-03	1.74	18.833	1.14E-02	11.42
0.333	2.04E-03	2.04	19.333	1.14E-02	11.40
0.833	2.34E-03	2.34	19.833	1.14E-02	11.42
1.333	2.63E-03	2.63			

ก๊าซอาร์กอนที่กำลัง 62 วัตต์(ความดัน 8×10^{-4} mbar)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma 6×10^{-4} mbar ที่กำลัง 62 วัตต์



รูปที่ 4.12 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์จากกราฟ

Slope	I_s (mA)	V_f (V)	V_p (V)	I_{se}
0.229119	-0.59	-5.67	11.33	0.011404

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2 T_e$
0.45	0.025	0.072649	3.269230769

พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

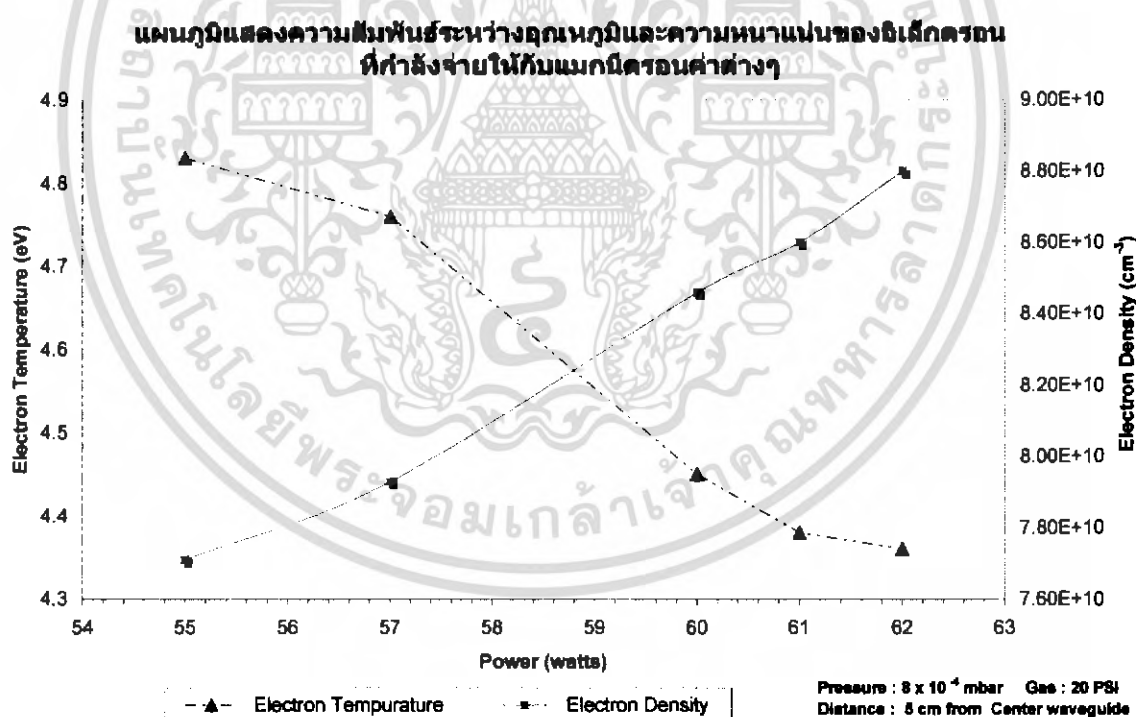
T (eV)	$K T_e$ (J)	n_e (cm^{-3})
4.364538	6.98×10^{-19}	8.88×10^{10}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่กำลังจ่ายให้กับแมกนีตรอนค่าต่างๆ

Power (watts)	T_{ev} (eV)	n_e (cm^{-3})	V_f (V)	V_p (V)	$V_p - V_f = 5.4 T_e$
55	4.83	$7.71\text{E}+10$	-5.3	11.58	3.13
57	4.76	$7.93\text{E}+10$	-5.5	11.33	3.12
60	4.45	$8.46\text{E}+10$	-5.6	11.33	3.14
61	4.38	$8.60\text{E}+10$	-5.6	11.33	3.14
62	4.36	$8.80\text{E}+10$	-5.67	11.33	3.15

Probe 5cm from center of Waveguide 25.71 mm



รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่กำลังจ่ายให้กับแมกนีตรอนค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาผลของระยะขั้วของหัววัดต่อพารามิเตอร์ของพลาสมาที่ระยะ -2,-1, 0,1 และ 2

ผลการทดลอง จากการดำเนินการวิจัยได้ผลการวิจัยดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-1.74E-03	-1.74	-33.668	-7.66E-04	-0.77
-49.668	-1.71E-03	-1.71	-33.168	-7.54E-04	-0.75
-49.168	-1.68E-03	-1.68	-32.668	-7.52E-04	-0.75
-48.668	-1.63E-03	-1.63	-32.168	-7.52E-04	-0.75
-48.167	-1.55E-03	-1.55	-31.668	-7.61E-04	-0.76
-47.668	-1.21E-03	-1.21	-31.168	-7.60E-04	-0.76
-47.168	-1.05E-03	-1.05	-30.668	-7.51E-04	-0.75
-46.668	-9.88E-04	-0.99	-30.168	-7.49E-04	-0.75
-46.168	-9.04E-04	-0.90	-29.667	-7.47E-04	-0.75
-45.668	-8.30E-04	-0.83	-29.167	-7.47E-04	-0.75
-45.168	-8.10E-04	-0.81	-28.667	-7.31E-04	-0.73
-44.668	-7.95E-04	-0.80	-28.167	-7.33E-04	-0.73
-44.168	-7.83E-04	-0.78	-27.667	-7.24E-04	-0.72
-43.667	-7.85E-04	-0.79	-27.167	-7.21E-04	-0.72
-43.168	-7.60E-04	-0.76	-26.667	-7.08E-04	-0.71
-42.668	-7.68E-04	-0.77	-26.167	-7.20E-04	-0.72
-42.168	-7.60E-04	-0.76	-25.667	-7.12E-04	-0.71
-41.668	-7.55E-04	-0.75	-25.167	-7.00E-04	-0.70
-41.168	-7.59E-04	-0.76	-24.667	-6.94E-04	-0.69
-40.668	-7.55E-04	-0.75	-24.167	-6.85E-04	-0.69
-40.167	-7.57E-04	-0.76	-23.667	-6.84E-04	-0.68
-39.668	-7.47E-04	-0.75	-23.167	-6.79E-04	-0.68
-39.168	-7.51E-04	-0.75	-22.668	-6.67E-04	-0.67
-38.668	-7.46E-04	-0.75	-22.167	-6.59E-04	-0.66
-38.168	-7.51E-04	-0.75	-21.667	-6.57E-04	-0.66
-37.668	-7.43E-04	-0.74	-21.168	-6.40E-04	-0.64
-37.168	-7.44E-04	-0.74	-20.667	-6.33E-04	-0.63
-36.668	-7.45E-04	-0.75	-20.167	-6.18E-04	-0.62
-36.168	-7.48E-04	-0.75	-19.667	-6.18E-04	-0.62
-35.668	-7.50E-04	-0.75	-19.167	-6.06E-04	-0.61
-35.168	-7.53E-04	-0.75	-18.667	-5.97E-04	-0.60
-34.668	-7.60E-04	-0.76	-18.167	-5.84E-04	-0.58
-34.168	-7.78E-04	-0.78	-17.667	-5.73E-04	-0.57

ก๊าซอาร์กอนที่ระยะการขจัด -2 มิลลิเมตร (ความดัน $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ ที่กำลัง 60 วัตต์)

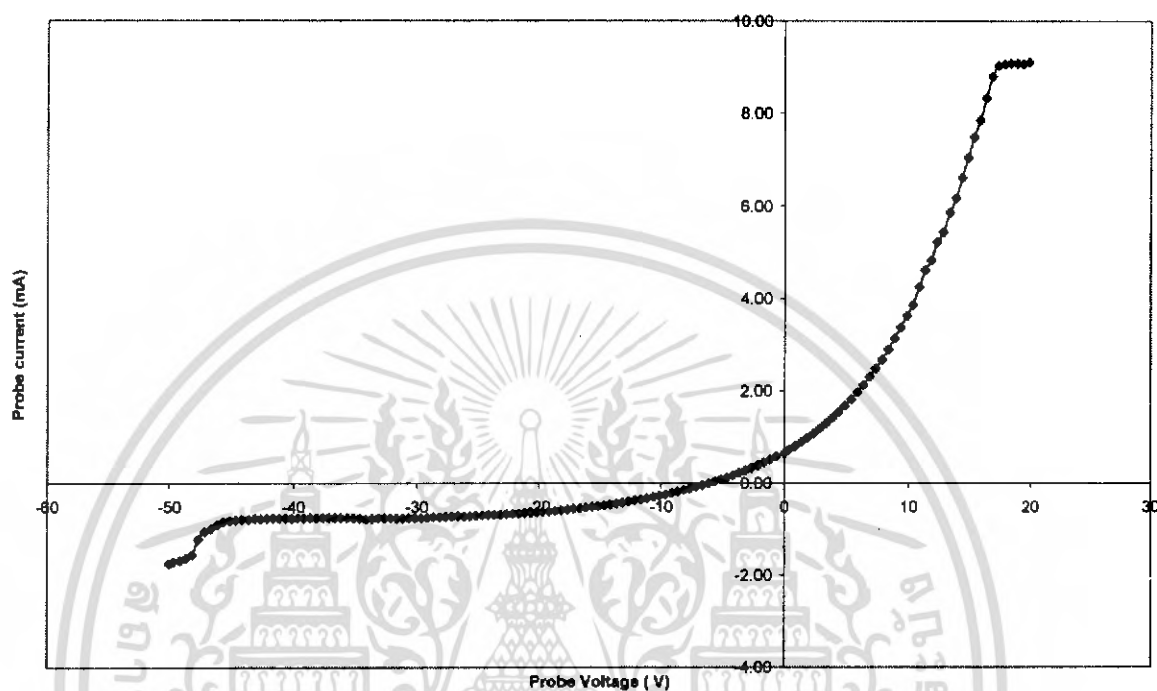
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7(ต่อ) ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	-5.52E-04	-0.55	1.834	9.86E-04	0.99
-16.667	-5.42E-04	-0.54	2.334	1.08E-03	1.08
-16.167	-5.28E-04	-0.53	2.834	1.19E-03	1.19
-15.667	-5.10E-04	-0.51	3.334	1.30E-03	1.30
-15.167	-4.95E-04	-0.49	3.834	1.42E-03	1.42
-14.667	-4.81E-04	-0.48	4.334	1.54E-03	1.54
-14.167	-4.61E-04	-0.46	4.834	1.68E-03	1.68
-13.667	-4.38E-04	-0.44	5.334	1.82E-03	1.82
-13.168	-4.19E-04	-0.42	5.834	1.97E-03	1.97
-12.667	-3.94E-04	-0.39	6.334	2.13E-03	2.13
-12.167	-3.69E-04	-0.37	6.834	2.31E-03	2.31
-11.667	-3.52E-04	-0.35	7.334	2.49E-03	2.49
-11.168	-3.27E-04	-0.33	7.834	2.68E-03	2.68
-10.668	-3.00E-04	-0.30	8.334	2.90E-03	2.90
-10.168	-2.73E-04	-0.27	8.834	3.14E-03	3.14
-9.668	-2.44E-04	-0.24	9.334	3.37E-03	3.37
-9.167	-2.13E-04	-0.21	9.834	3.63E-03	3.63
-8.667	-1.83E-04	-0.18	10.334	3.87E-03	3.87
-8.168	-1.49E-04	-0.15	10.834	4.25E-03	4.25
-7.667	-1.15E-04	-0.11	11.335	4.62E-03	4.62
-7.168	-7.88E-05	-0.08	11.834	4.83E-03	4.83
-6.667	-4.10E-05	-0.04	12.334	5.23E-03	5.23
-6.168	-1.68E-06	0.00	12.834	5.44E-03	5.44
-5.668	3.93E-05	0.04	13.334	5.87E-03	5.87
-5.167	8.21E-05	0.08	13.834	6.18E-03	6.18
-4.667	1.27E-04	0.13	14.334	6.62E-03	6.62
-4.168	1.75E-04	0.18	14.834	7.05E-03	7.05
-3.667	2.24E-04	0.22	15.334	7.50E-03	7.50
-3.167	2.75E-04	0.28	15.834	7.86E-03	7.86
-2.667	3.30E-04	0.33	16.334	8.34E-03	8.34
-2.167	3.88E-04	0.39	16.834	8.81E-03	8.81
-1.667	4.46E-04	0.45	17.334	9.05E-03	9.05
-1.167	5.12E-04	0.51	17.834	9.08E-03	9.08
-0.667	5.79E-04	0.58	18.334	9.09E-03	9.09
0	6.52E-04	0.65	18.834	9.09E-03	9.09
0.334	7.21E-04	0.72	19.334	9.08E-03	9.08
0.834	8.06E-04	0.81	19.834	9.12E-03	9.12
1.334	8.91E-04	0.89			

ก๊าซอาร์กอนที่ระยะการขจัด -2 มิลลิเมตร (ความดัน 8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma ที่ระยะขจัด -2 มิลลิเมตร (8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)



รูปที่ 4.14 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์จากกราฟ

Slope	I_{si} (mA)	V_f (V)	V_p (V)	I_{se}
0.129162	-0.45	-6.17	17.084	0.009118

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2$ Te
0.45	0.025	0.072649	4.471923077

พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

T (eV)	KTe (J)	n_e (cm^{-3})
7.742197	1.24E-18	5.33E+10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-1.17E-03	-1.17	-33.667	-8.82E-04	-0.88
-49.666	-1.04E-03	-1.04	-33.166	-8.79E-04	-0.88
-49.166	-9.53E-04	-0.95	-32.666	-8.68E-04	-0.87
-48.666	-9.78E-04	-0.98	-32.166	-8.75E-04	-0.87
-48.166	-9.69E-04	-0.97	-31.667	-8.70E-04	-0.87
-47.666	-9.69E-04	-0.97	-31.167	-8.68E-04	-0.87
-47.166	-9.58E-04	-0.96	-30.667	-8.64E-04	-0.86
-46.667	-9.53E-04	-0.95	-30.167	-8.63E-04	-0.86
-46.167	-9.45E-04	-0.94	-29.667	-8.58E-04	-0.86
-45.667	-9.40E-04	-0.94	-29.167	-8.47E-04	-0.85
-45.167	-9.42E-04	-0.94	-28.667	-8.49E-04	-0.85
-44.667	-9.36E-04	-0.94	-28.167	-8.36E-04	-0.84
-44.167	-9.35E-04	-0.93	-27.667	-8.35E-04	-0.84
-43.666	-9.17E-04	-0.92	-27.167	-8.26E-04	-0.83
-43.167	-9.27E-04	-0.93	-26.667	-8.22E-04	-0.82
-42.667	-9.28E-04	-0.93	-26.167	-8.13E-04	-0.81
-42.167	-9.21E-04	-0.92	-25.667	-8.06E-04	-0.81
-41.666	-9.20E-04	-0.92	-25.167	-7.99E-04	-0.80
-41.166	-9.16E-04	-0.92	-24.667	-7.88E-04	-0.79
-40.667	-9.14E-04	-0.91	-24.167	-7.79E-04	-0.78
-40.166	-8.99E-04	-0.90	-23.667	-7.72E-04	-0.77
-39.666	-9.03E-04	-0.90	-23.167	-7.58E-04	-0.76
-39.166	-9.08E-04	-0.91	-22.667	-7.54E-04	-0.75
-38.667	-9.07E-04	-0.91	-22.167	-7.37E-04	-0.74
-38.166	-9.03E-04	-0.90	-21.667	-7.27E-04	-0.73
-37.667	-9.02E-04	-0.90	-21.167	-7.12E-04	-0.71
-37.167	-9.04E-04	-0.90	-20.667	-6.97E-04	-0.70
-36.667	-8.94E-04	-0.89	-20.167	-6.83E-04	-0.68
-36.167	-8.91E-04	-0.89	-19.667	-6.65E-04	-0.67
-35.666	-8.85E-04	-0.88	-19.167	-6.51E-04	-0.65
-35.166	-8.86E-04	-0.89	-18.667	-6.32E-04	-0.63
-34.667	-8.86E-04	-0.89	-18.167	-6.11E-04	-0.61
-34.167	-8.85E-04	-0.89	-17.667	-5.92E-04	-0.59

ก๊าซอาร์กอนที่ระยะการขจัด -1 มิลลิเมตร (ความดัน 8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)

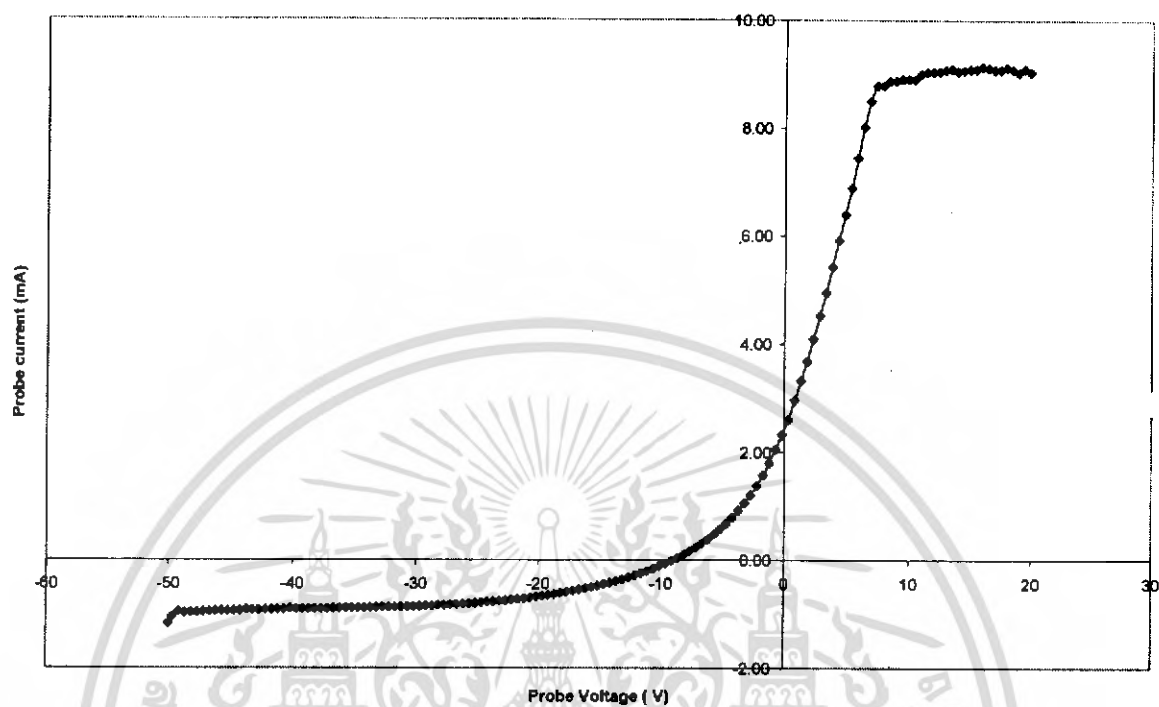
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8(ต่อ) ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	-5.69E-04	-0.57	1.833	3.68E-03	3.68
-16.667	-5.47E-04	-0.55	2.333	4.10E-03	4.10
-16.167	-5.26E-04	-0.53	2.833	4.53E-03	4.53
-15.667	-5.01E-04	-0.50	3.333	4.95E-03	4.95
-15.167	-4.76E-04	-0.48	3.833	5.43E-03	5.43
-14.667	-4.48E-04	-0.45	4.333	5.91E-03	5.91
-14.167	-4.21E-04	-0.42	4.833	6.39E-03	6.39
-13.667	-3.92E-04	-0.39	5.333	6.89E-03	6.89
-13.167	-3.59E-04	-0.36	5.833	7.44E-03	7.44
-12.667	-3.23E-04	-0.32	6.333	8.02E-03	8.02
-12.167	-2.85E-04	-0.29	6.833	8.50E-03	8.50
-11.667	-2.46E-04	-0.25	7.333	8.79E-03	8.79
-11.167	-2.04E-04	-0.20	7.833	8.79E-03	8.79
-10.667	-1.61E-04	-0.16	8.333	8.87E-03	8.87
-10.167	-1.12E-04	-0.11	8.833	8.87E-03	8.87
-9.667	-6.50E-05	-0.07	9.333	8.91E-03	8.91
-9.167	-1.60E-05	-0.02	9.833	8.91E-03	8.91
-8.667	4.07E-05	0.04	10.333	8.91E-03	8.91
-8.167	9.95E-05	0.10	10.833	9.00E-03	9.00
-7.667	1.64E-04	0.16	11.333	9.04E-03	9.04
-7.167	2.33E-04	0.23	11.833	9.05E-03	9.05
-6.667	3.10E-04	0.31	12.333	9.05E-03	9.05
-6.167	3.91E-04	0.39	12.833	9.09E-03	9.09
-5.667	4.77E-04	0.48	13.333	9.10E-03	9.10
-5.167	5.74E-04	0.57	13.833	9.06E-03	9.06
-4.667	6.75E-04	0.67	14.333	9.08E-03	9.08
-4.167	7.91E-04	0.79	14.833	9.10E-03	9.10
-3.667	9.20E-04	0.92	15.333	9.10E-03	9.10
-3.167	1.06E-03	1.06	15.833	9.14E-03	9.14
-2.667	1.21E-03	1.21	16.333	9.12E-03	9.12
-2.167	1.38E-03	1.38	16.833	9.09E-03	9.09
-1.667	1.57E-03	1.57	17.333	9.09E-03	9.09
-1.167	1.80E-03	1.80	17.833	9.13E-03	9.13
-0.667	2.06E-03	2.06	18.333	9.09E-03	9.09
-0.167	2.33E-03	2.33	18.833	9.03E-03	9.03
0.333	2.60E-03	2.60	19.333	9.11E-03	9.11
0.833	2.96E-03	2.96	19.833	9.05E-03	9.05
1.333	3.33E-03	3.33			

ก๊าซอาร์กอนที่ระยะการขจัด -1 มิลลิเมตร (ความดัน 8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma ที่ระยะขจัด -1 มิลลิเมตร (8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)



รูปที่ 4.15 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์จากกราฟ

Slope	I_s (mA)	V_f (V)	V_p (V)	I_{se}
0.174321	-0.45	-9.15	7.083	0.009084

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2 T_e$
0.45	0.025	0.072649	3.121730769

พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

T (eV)	$K T_e$ (J)	n_e (cm^{-3})
5.736548	9.18E-19	6.17E+10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-1.33E-03	-1.33	-33.666	-8.79E-04	-0.88
-49.666	-1.33E-03	-1.33	-33.166	-8.72E-04	-0.87
-49.167	-1.32E-03	-1.32	-32.666	-8.65E-04	-0.86
-48.667	-1.32E-03	-1.32	-32.166	-8.72E-04	-0.87
-48.166	-1.32E-03	-1.32	-31.667	-9.16E-04	-0.92
-47.666	-1.32E-03	-1.32	-31.167	-8.77E-04	-0.88
-47.166	-1.32E-03	-1.32	-30.666	-9.09E-04	-0.91
-46.667	-1.31E-03	-1.31	-30.166	-8.64E-04	-0.86
-46.167	-1.31E-03	-1.31	-29.667	-8.83E-04	-0.88
-45.667	-1.31E-03	-1.31	-29.167	-8.73E-04	-0.87
-45.167	-1.31E-03	-1.31	-28.667	-8.73E-04	-0.87
-44.667	-1.30E-03	-1.30	-28.167	-8.66E-04	-0.87
-44.166	-1.29E-03	-1.29	-27.667	-8.60E-04	-0.86
-43.666	-1.28E-03	-1.28	-27.167	-8.57E-04	-0.86
-43.166	-1.28E-03	-1.28	-26.667	-8.37E-04	-0.84
-42.667	-1.28E-03	-1.28	-26.167	-8.27E-04	-0.83
-42.167	-1.27E-03	-1.27	-25.667	-8.17E-04	-0.82
-41.666	-1.27E-03	-1.27	-25.167	-8.11E-04	-0.81
-41.166	-1.26E-03	-1.26	-24.667	-7.88E-04	-0.79
-40.667	-1.23E-03	-1.23	-24.167	-7.79E-04	-0.78
-40.166	-1.22E-03	-1.22	-23.667	-7.72E-04	-0.77
-39.666	-1.05E-03	-1.05	-23.167	-7.49E-04	-0.75
-39.166	-1.14E-03	-1.14	-22.667	-7.34E-04	-0.73
-38.666	-1.10E-03	-1.10	-22.167	-7.25E-04	-0.72
-38.166	-1.04E-03	-1.04	-21.667	-7.41E-04	-0.74
-37.667	-1.08E-03	-1.08	-21.167	-6.93E-04	-0.69
-37.167	-9.00E-04	-0.90	-20.667	-6.74E-04	-0.67
-36.667	-9.26E-04	-0.93	-20.167	-6.49E-04	-0.65
-36.167	-8.94E-04	-0.89	-19.667	-6.31E-04	-0.63
-35.667	-9.43E-04	-0.94	-19.167	-6.18E-04	-0.62
-35.167	-8.46E-04	-0.85	-18.667	-5.91E-04	-0.59
-34.666	-8.83E-04	-0.88	-18.167	-5.69E-04	-0.57
-34.166	-9.28E-04	-0.93	-17.667	-5.44E-04	-0.54

ก๊าซอาร์กอนที่ระยะการขจัด 0 มิลลิเมตร (ความดัน 8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

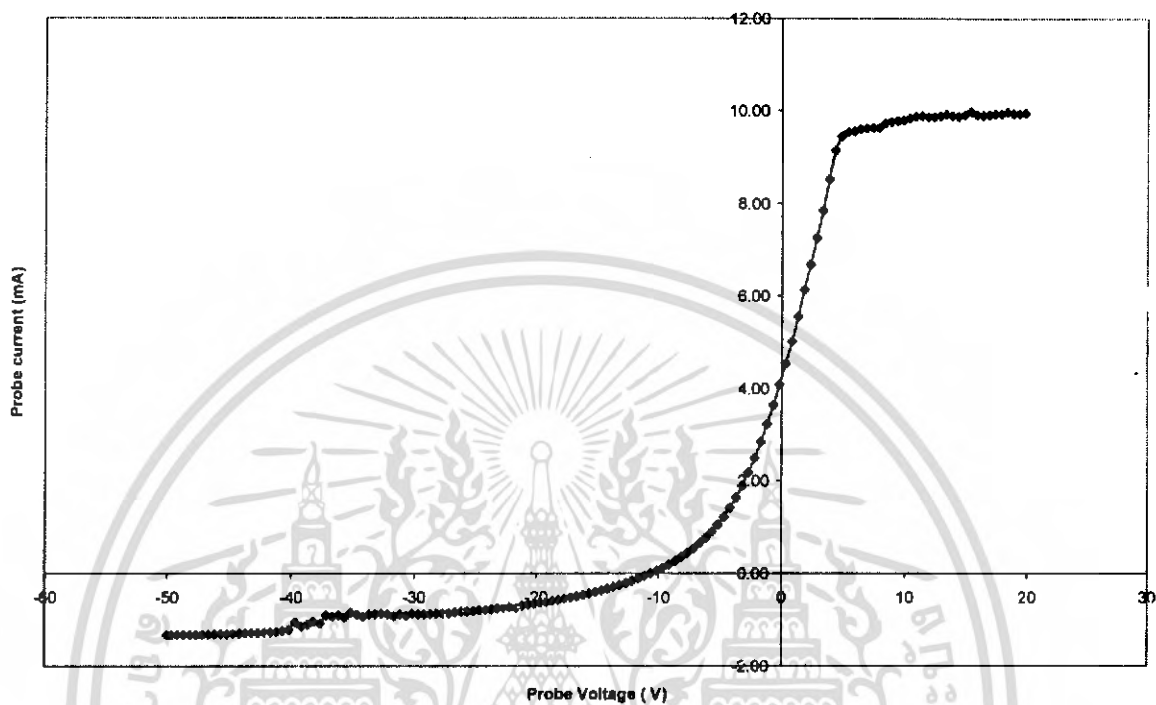
ตารางที่ 4.9(ต่อ)ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	-5.18E-04	-0.52	1.833	6.14E-03	6.14
-16.667	-4.91E-04	-0.49	2.333	6.68E-03	6.68
-16.167	-4.63E-04	-0.46	2.833	7.26E-03	7.26
-15.667	-4.32E-04	-0.43	3.333	7.84E-03	7.84
-15.167	-4.00E-04	-0.40	3.833	8.51E-03	8.51
-14.667	-3.66E-04	-0.37	4.333	9.13E-03	9.13
-14.167	-3.30E-04	-0.33	4.833	9.44E-03	9.44
-13.667	-2.92E-04	-0.29	5.333	9.53E-03	9.53
-13.167	-2.52E-04	-0.25	5.833	9.55E-03	9.55
-12.667	-2.09E-04	-0.21	6.333	9.59E-03	9.59
-12.167	-1.63E-04	-0.16	6.833	9.61E-03	9.61
-11.667	-1.13E-04	-0.11	7.333	9.63E-03	9.63
-11.167	-6.14E-05	-0.06	7.833	9.62E-03	9.62
-10.667	-6.02E-06	-0.01	8.333	9.72E-03	9.72
-10.167	5.48E-05	0.05	8.833	9.75E-03	9.75
-9.667	1.18E-04	0.12	9.333	9.77E-03	9.77
-9.167	1.90E-04	0.19	9.833	9.79E-03	9.79
-8.667	2.64E-04	0.26	10.333	9.83E-03	9.83
-8.167	3.49E-04	0.35	10.833	9.88E-03	9.88
-7.667	4.36E-04	0.44	11.333	9.88E-03	9.88
-7.167	5.36E-04	0.54	11.833	9.87E-03	9.87
-6.667	6.46E-04	0.65	12.333	9.86E-03	9.86
-6.167	7.64E-04	0.76	12.833	9.89E-03	9.89
-5.667	8.98E-04	0.90	13.333	9.92E-03	9.92
-5.167	1.05E-03	1.05	13.833	9.89E-03	9.89
-4.667	1.22E-03	1.22	14.333	9.88E-03	9.88
-4.167	1.41E-03	1.41	14.833	9.91E-03	9.91
-3.667	1.64E-03	1.64	15.333	9.98E-03	9.98
-3.167	1.89E-03	1.89	15.833	9.92E-03	9.92
-2.667	2.17E-03	2.17	16.333	9.90E-03	9.90
-2.167	2.49E-03	2.49	16.833	9.92E-03	9.92
-1.667	2.84E-03	2.84	17.333	9.93E-03	9.93
-1.167	3.23E-03	3.23	17.833	9.93E-03	9.93
-0.667	3.64E-03	3.64	18.333	9.98E-03	9.98
-0.167	4.09E-03	4.09	18.833	9.94E-03	9.94
0.333	4.54E-03	4.54	19.333	9.94E-03	9.94
0.833	5.02E-03	5.02	19.833	9.95E-03	9.95
1.333	5.56E-03	5.56			

ก๊าซอาร์กอนที่ระยะการขจัด 0 มิลลิเมตร (ความดัน $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ ที่กำลัง 60 วัตต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma ที่ระยะขจัด 0 มิลลิเมตร (8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)



รูปที่ 4.16 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์จากกราฟ

Slope	I_s (mA)	V_r (V)	V_p (V)	I_{se}
0.204179	-0.51	-10.65	4.83	0.009950

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2 T_e$
0.45	0.025	0.072649	2.976923077

พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

T (eV)	$K T_e$ (J)	n_e (cm^{-3})
4.897669	7.84E-19	7.31E+10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-1.21E-03	-1.21	-33.668	-1.09E-03	-1.09
-49.667	-1.21E-03	-1.21	-33.168	-1.09E-03	-1.09
-49.168	-1.21E-03	-1.21	-32.667	-1.08E-03	-1.08
-48.668	-1.21E-03	-1.21	-32.168	-1.07E-03	-1.07
-48.168	-1.20E-03	-1.20	-31.668	-1.07E-03	-1.07
-47.668	-1.20E-03	-1.20	-31.168	-1.06E-03	-1.06
-47.168	-1.20E-03	-1.20	-30.667	-1.05E-03	-1.05
-46.668	-1.20E-03	-1.20	-30.168	-1.04E-03	-1.04
-46.168	-1.19E-03	-1.19	-29.667	-1.04E-03	-1.04
-45.668	-1.19E-03	-1.19	-29.167	-1.03E-03	-1.03
-45.168	-1.18E-03	-1.18	-28.667	-1.02E-03	-1.02
-44.668	-1.18E-03	-1.18	-28.167	-1.01E-03	-1.01
-44.168	-1.18E-03	-1.18	-27.667	-9.97E-04	-1.00
-43.667	-1.17E-03	-1.17	-27.167	-9.87E-04	-0.99
-43.168	-1.17E-03	-1.17	-26.667	-9.73E-04	-0.97
-42.668	-1.17E-03	-1.17	-26.167	-9.59E-04	-0.96
-42.168	-1.16E-03	-1.16	-25.667	-9.46E-04	-0.95
-41.667	-1.16E-03	-1.16	-25.167	-9.29E-04	-0.93
-41.168	-1.16E-03	-1.16	-24.667	-9.15E-04	-0.92
-40.668	-1.16E-03	-1.16	-24.168	-9.01E-04	-0.90
-40.167	-1.15E-03	-1.15	-23.667	-8.81E-04	-0.88
-39.668	-1.14E-03	-1.14	-23.167	-8.67E-04	-0.87
-39.168	-1.14E-03	-1.14	-22.668	-8.47E-04	-0.85
-38.668	-1.13E-03	-1.13	-22.167	-8.29E-04	-0.83
-38.168	-1.13E-03	-1.13	-21.667	-8.11E-04	-0.81
-37.668	-1.14E-03	-1.14	-21.168	-7.85E-04	-0.78
-37.168	-1.13E-03	-1.13	-20.667	-7.62E-04	-0.76
-36.668	-1.12E-03	-1.12	-20.167	-7.42E-04	-0.74
-36.168	-1.12E-03	-1.12	-19.667	-7.19E-04	-0.72
-35.668	-1.12E-03	-1.12	-19.167	-6.95E-04	-0.69
-35.168	-1.11E-03	-1.11	-18.667	-6.70E-04	-0.67
-34.668	-1.11E-03	-1.11	-18.167	-6.41E-04	-0.64
-34.168	-1.10E-03	-1.10	-17.667	-6.11E-04	-0.61

ก๊าซอาร์กอนที่ระเหยการขจัด +1 มิลลิเมตร (ความดัน 8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)

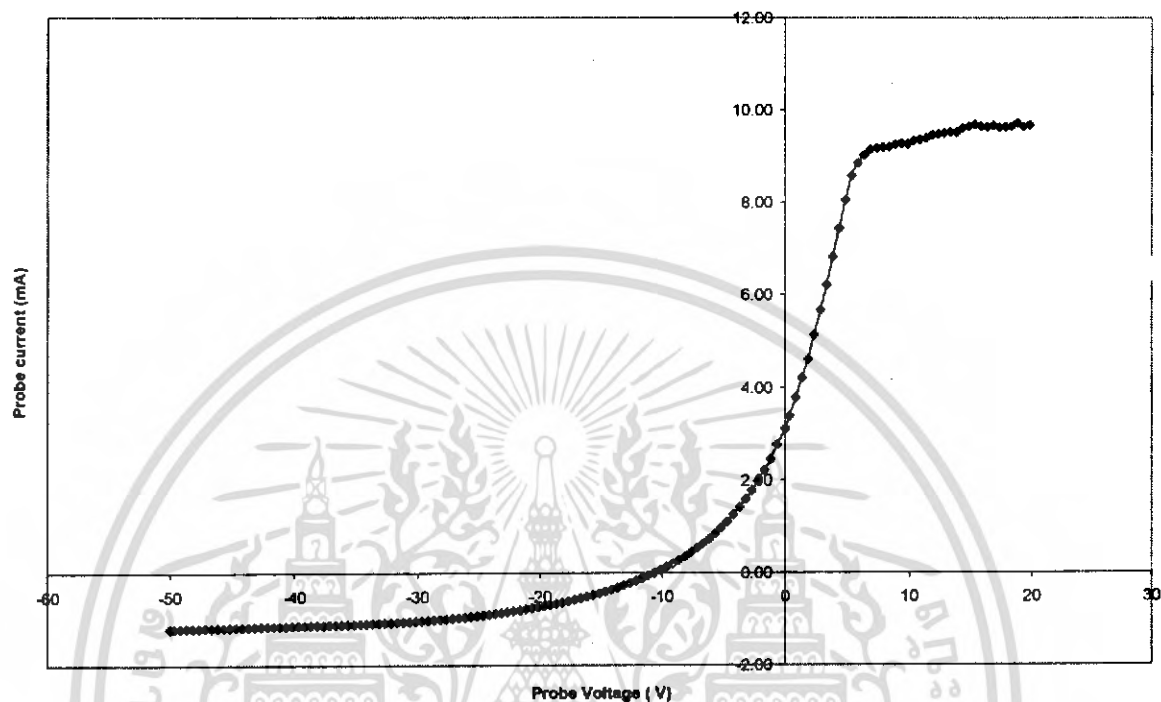
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10(ต่อ) ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	-5.80E-04	-0.58	1.834	4.62E-03	4.62
-16.667	-5.49E-04	-0.55	2.334	5.14E-03	5.14
-16.167	-5.16E-04	-0.52	2.834	5.67E-03	5.67
-15.668	-4.79E-04	-0.48	3.334	6.21E-03	6.21
-15.167	-4.45E-04	-0.45	3.834	6.82E-03	6.82
-14.667	-4.06E-04	-0.41	4.334	7.43E-03	7.43
-14.167	-3.64E-04	-0.36	4.834	8.05E-03	8.05
-13.667	-3.20E-04	-0.32	5.334	8.58E-03	8.58
-13.167	-2.74E-04	-0.27	5.834	8.85E-03	8.85
-12.668	-2.26E-04	-0.23	6.334	9.02E-03	9.02
-12.168	-1.75E-04	-0.18	6.834	9.14E-03	9.14
-11.667	-1.20E-04	-0.12	7.334	9.17E-03	9.17
-11.167	-6.14E-05	-0.06	7.834	9.19E-03	9.19
-10.667	-4.79E-06	0.00	8.334	9.20E-03	9.20
-10.168	5.84E-05	0.06	8.834	9.24E-03	9.24
-9.668	1.28E-04	0.13	9.334	9.27E-03	9.27
-9.167	1.95E-04	0.19	9.834	9.26E-03	9.26
-8.667	2.71E-04	0.27	10.334	9.33E-03	9.33
-8.167	3.48E-04	0.35	10.834	9.36E-03	9.36
-7.668	4.40E-04	0.44	11.334	9.39E-03	9.39
-7.167	5.33E-04	0.53	11.834	9.45E-03	9.45
-6.667	6.32E-04	0.63	12.334	9.48E-03	9.48
-6.168	7.34E-04	0.73	12.834	9.50E-03	9.50
-5.667	8.53E-04	0.85	13.334	9.52E-03	9.52
-5.168	9.78E-04	0.98	13.834	9.52E-03	9.52
-4.668	1.11E-03	1.11	14.334	9.61E-03	9.61
-4.168	1.26E-03	1.26	14.834	9.64E-03	9.64
-3.667	1.42E-03	1.42	15.334	9.69E-03	9.69
-3.167	1.59E-03	1.59	15.834	9.65E-03	9.65
-2.667	1.77E-03	1.77	16.334	9.64E-03	9.64
-2.168	1.99E-03	1.99	16.834	9.67E-03	9.67
-1.667	2.21E-03	2.21	17.334	9.63E-03	9.63
-1.168	2.45E-03	2.45	17.834	9.64E-03	9.64
-0.667	2.76E-03	2.76	18.334	9.65E-03	9.65
0	3.11E-03	3.11	18.834	9.73E-03	9.73
0.334	3.39E-03	3.39	19.334	9.65E-03	9.65
0.834	3.78E-03	3.78	19.834	9.68E-03	9.68
1.334	4.21E-03	4.21			

ก๊าซอาร์กอนที่ระเหยการขจัด +1 มิลลิเมตร (ความดัน 8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma ที่ระยะขจัด +1 มิลลิเมตร (8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)



รูปที่ 4.17 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟ

Slope	I_{si} (mA)	V_r (V)	V_p (V)	I_{se}
0.221355	-0.24	-10.67	4.83	0.009671

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2$ Te
0.45	0.025	0.072649	2.980769231

พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

T (eV)	KTe (J)	n_e (cm^{-3})
4.517633	7.23E-19	7.40E+10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-50.003	-1.33E-03	-1.33	-33.666	-1.00E-03	-1.00
-49.667	-1.32E-03	-1.32	-33.166	-9.81E-04	-0.98
-49.166	-1.30E-03	-1.30	-32.666	-9.65E-04	-0.96
-48.667	-1.30E-03	-1.30	-32.166	-9.50E-04	-0.95
-48.167	-1.29E-03	-1.29	-31.666	-9.32E-04	-0.93
-47.667	-1.28E-03	-1.28	-31.167	-9.13E-04	-0.91
-47.167	-1.27E-03	-1.27	-30.667	-8.94E-04	-0.89
-46.667	-1.25E-03	-1.25	-30.167	-8.70E-04	-0.87
-46.167	-1.25E-03	-1.25	-29.667	-8.54E-04	-0.85
-45.667	-1.24E-03	-1.24	-29.167	-8.27E-04	-0.83
-45.167	-1.23E-03	-1.23	-28.667	-8.08E-04	-0.81
-44.667	-1.23E-03	-1.23	-28.167	-7.79E-04	-0.78
-44.167	-1.21E-03	-1.21	-27.667	-7.51E-04	-0.75
-43.667	-1.21E-03	-1.21	-27.167	-7.24E-04	-0.72
-43.167	-1.20E-03	-1.20	-26.667	-7.00E-04	-0.70
-42.667	-1.19E-03	-1.19	-26.167	-6.68E-04	-0.67
-42.167	-1.18E-03	-1.18	-25.667	-6.39E-04	-0.64
-41.667	-1.18E-03	-1.18	-25.167	-6.04E-04	-0.60
-41.167	-1.16E-03	-1.16	-24.667	-5.71E-04	-0.57
-40.667	-1.16E-03	-1.16	-24.167	-5.41E-04	-0.54
-40.166	-1.15E-03	-1.15	-23.667	-5.03E-04	-0.50
-39.666	-1.13E-03	-1.13	-23.167	-4.63E-04	-0.46
-39.166	-1.13E-03	-1.13	-22.667	-4.27E-04	-0.43
-38.666	-1.12E-03	-1.12	-22.167	-3.87E-04	-0.39
-38.167	-1.11E-03	-1.11	-21.667	-3.43E-04	-0.34
-37.667	-1.10E-03	-1.10	-21.167	-2.97E-04	-0.30
-37.166	-1.08E-03	-1.08	-20.667	-2.46E-04	-0.25
-36.667	-1.08E-03	-1.08	-20.167	-1.99E-04	-0.20
-36.167	-1.06E-03	-1.06	-19.667	-1.47E-04	-0.15
-35.667	-1.06E-03	-1.06	-19.167	-9.08E-05	-0.09
-35.167	-1.04E-03	-1.04	-18.667	-2.73E-05	-0.03
-34.666	-1.02E-03	-1.02	-18.167	2.67E-05	0.03
-34.167	-1.01E-03	-1.01	-17.667	8.44E-05	0.08

ก๊าซอาร์กอนที่ระยะการขจัด +2 มิลลิเมตร (ความดัน $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ ที่กำลัง 60 วัตต์)

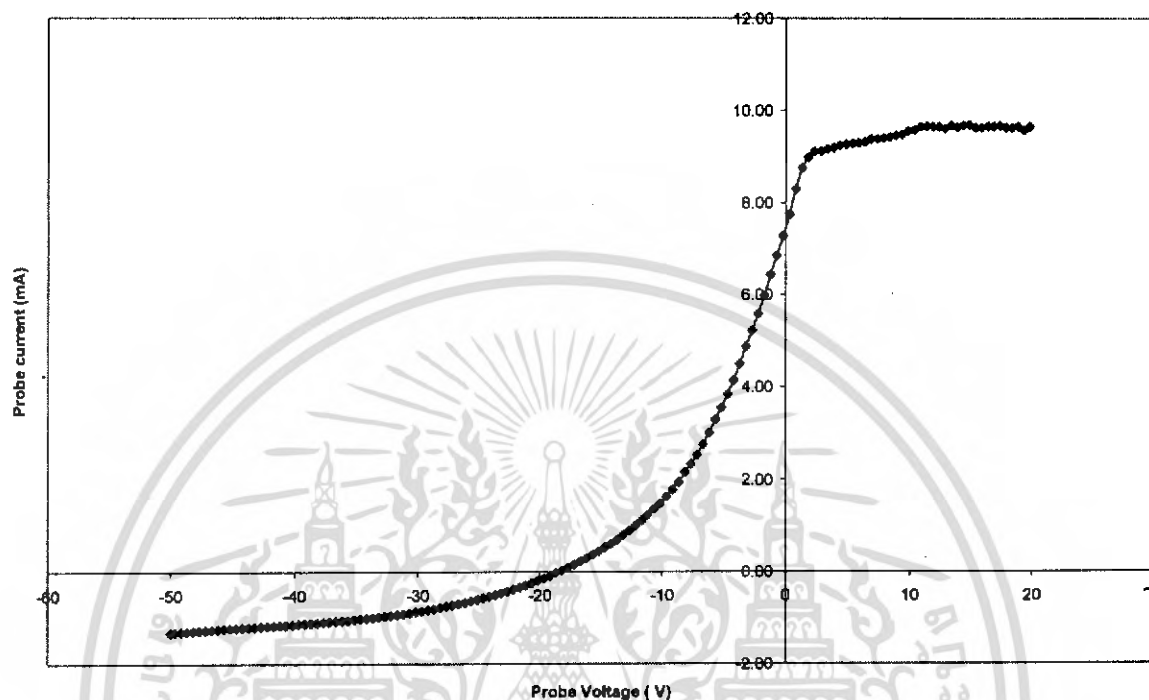
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11(ต่อ) ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตกคร่อมหัววัด

Probe bias (V)	I-V Characteristic		Probe bias (V)	I-V Characteristic	
	Probe Current (A)	Probe Current (mA)		Probe Current (A)	Probe current (mA)
-17.167	1.55E-04	0.15	1.833	8.98E-03	8.98
-16.667	2.24E-04	0.22	2.333	9.11E-03	9.11
-16.167	2.90E-04	0.29	2.833	9.11E-03	9.11
-15.667	3.66E-04	0.37	3.333	9.16E-03	9.16
-15.167	4.41E-04	0.44	3.833	9.19E-03	9.19
-14.667	5.25E-04	0.52	4.333	9.24E-03	9.24
-14.167	6.01E-04	0.60	4.833	9.26E-03	9.26
-13.667	6.88E-04	0.69	5.333	9.28E-03	9.28
-13.167	7.97E-04	0.80	5.833	9.29E-03	9.29
-12.667	8.93E-04	0.89	6.333	9.31E-03	9.31
-12.167	1.00E-03	1.00	6.833	9.37E-03	9.37
-11.667	1.11E-03	1.11	7.333	9.38E-03	9.38
-11.167	1.23E-03	1.23	7.833	9.40E-03	9.40
-10.667	1.35E-03	1.35	8.333	9.42E-03	9.42
-10.167	1.47E-03	1.47	8.833	9.46E-03	9.46
-9.667	1.62E-03	1.62	9.333	9.48E-03	9.48
-9.167	1.77E-03	1.77	9.833	9.55E-03	9.55
-8.667	1.93E-03	1.93	10.333	9.58E-03	9.58
-8.167	2.15E-03	2.15	10.833	9.65E-03	9.65
-7.667	2.33E-03	2.33	11.333	9.66E-03	9.66
-7.167	2.53E-03	2.53	11.833	9.66E-03	9.66
-6.667	2.75E-03	2.75	12.333	9.65E-03	9.65
-5.667	3.00E-03	3.00	12.833	9.62E-03	9.62
-5.167	3.29E-03	3.29	13.333	9.68E-03	9.68
-4.667	3.55E-03	3.55	13.833	9.64E-03	9.64
-4.167	3.83E-03	3.83	14.333	9.68E-03	9.68
-3.667	4.13E-03	4.13	14.833	9.69E-03	9.69
-3.167	4.49E-03	4.49	15.333	9.63E-03	9.63
-2.667	4.87E-03	4.87	15.833	9.63E-03	9.63
-2.167	5.21E-03	5.21	16.333	9.66E-03	9.66
-1.667	5.58E-03	5.58	16.833	9.66E-03	9.66
-1.167	5.99E-03	5.99	17.333	9.68E-03	9.68
-0.667	6.44E-03	6.44	17.833	9.64E-03	9.64
-0.167	6.85E-03	6.85	18.333	9.64E-03	9.64
0.333	7.28E-03	7.28	18.833	9.66E-03	9.66
0.833	7.75E-03	7.75	19.333	9.58E-03	9.58
1.333	8.30E-03	8.30	19.833	9.66E-03	9.66
	8.75E-03	8.75			

ก๊าซอาร์กอนที่ระยะการขจัด +2 มิลลิเมตร (ความดัน 8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar Plasma ที่ระยะขจัด +2 มิลลิเมตร (8×10^{-4} mbar ที่กำลัง 60 วัตต์)



รูปที่ 4.18 กราฟ I-V Characteristic ของพลาสมาอาร์กอน โดยหัววัดแสงมัวร์

ผลการทดลองที่สามารถวิเคราะห์จากกราฟ

Slope	I_{s1} (mA)	V_f (V)	V_p (V)	I_{s0}
0.238015	-0.27	-18.18	1.33	0.009659

ค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง

L (probe) cm	R (probe) cm	Probe Area	$V_p - V_f = 5.2 T_e$
0.45	0.025	0.072649	3.751923077

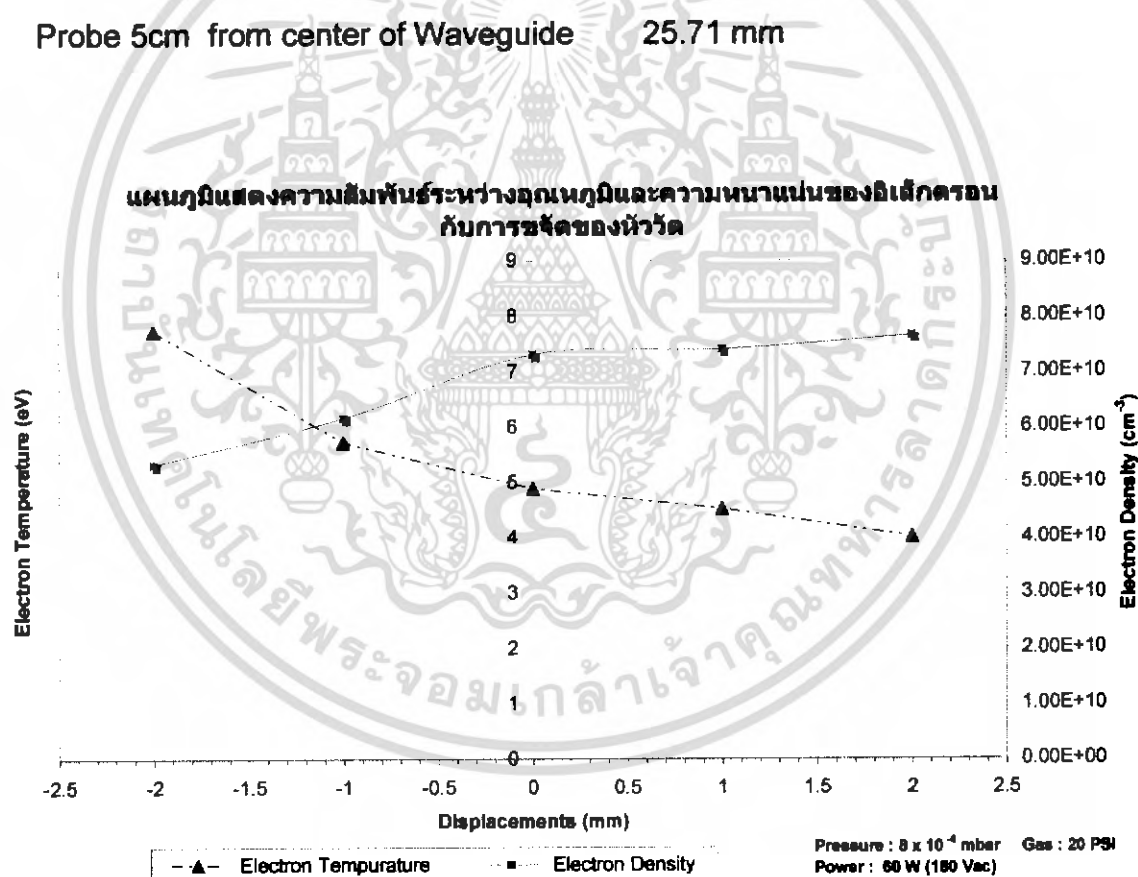
พารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง

T (eV)	KTe (J)	n_e (cm^{-3})
4.201417	6.72E-19	7.66E+10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับการจัดของหัววัด

Displacement (mm)	T_{ev} (eV)	n_e (cm^{-3})	V_f (V)	V_p (V)	$V_p - V_f = 5.4 T_e$
-2	7.74	$5.33\text{E}+10$	-6.17	17.08	4.31
-1	5.73	$6.17\text{E}+10$	-9.15	7.08	3.01
0	4.89	$7.31\text{E}+10$	-10.65	4.83	2.87
1	4.52	$7.40\text{E}+10$	-10.67	4.83	2.87
2	4.02	$7.65\text{E}+10$	-18.18	1.33	3.61



รูปที่ 4.19 รูปแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับการจัดของหัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะสรุปผลการทดลองการหาค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาโดยใช้หัววัดแสงมัวร์ ซึ่งทำการวิเคราะห์จากกราฟคุณสมบัติ (I-V Characteristic) ในกรณีที่เปลี่ยนแปลงค่ากำลังจ่ายไฟแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ และการเปลี่ยนตำแหน่งของหัววัดในแนวการเคลื่อนที่ ตลอดจนปัญหาต่างๆที่พบ และข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาอาร์กอนด้วยหัววัดแสงมัวร์ ซึ่งส่วนปลายของหัววัดที่สัมผัสพลาสมาผลิตจากเส้นลวดทังสเตน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ยาว 4.5 มิลลิเมตร และป้องกันสายนำสัญญาณด้วยฉนวนเซรามิก การทำงานของหัววัดโดยอาศัยการวัดกระแสของไอออนในพลาสมาที่เกิดขึ้นบริเวณหลอดแก้วควอทซ์ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าคกร้อมหัววัดตั้งแต่ -50 โวลต์ ถึง 20 โวลต์ และ นำค่าของกระแสที่ไหลผ่านหัววัด กับ แรงดันคกร้อมหัววัด ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์เพื่อหาพารามิเตอร์ต่างๆ

ควบคุมการวัดพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม Langmuir Probe Controller Ver. 1.02 ซึ่งควบคุมแหล่งจ่ายไฟลดจนการวัดค่ากระแสทางดิจิทัลมัลติมิเตอร์ผ่านทางพอร์ต GPIB และควบคุมอุปกรณ์สลับขั้วแหล่งจ่ายไฟอัตโนมัติ (Langmuir Probe Power Supply Controller) ผ่านพอร์ตขนาน

1. จากการวัดค่าพารามิเตอร์ของพลาสมา โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังจ่ายไฟให้กับแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ความดันคงที่ และ ตำแหน่งของหัววัดคงที่ เมื่อทำการเพิ่มกำลังทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) มีค่าสูงขึ้นแสดงว่ามีการแตกตัวของพลาสมามากขึ้น โดยที่พลังงานของอิเล็กตรอนที่เหลืออยู่ในระบบ หรือ อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) มีค่าน้อยลงเป็นเพราะว่ามีอิเล็กตรอนในระบบมากขึ้นจนเกิดการชนกันมากขึ้นและเหลือพลังงานจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลดน้อยลง

ค่า ศักย์ลอย (V_p) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มกำลังแสดงว่ามีการแตกตัวของไอออนบวกมากขึ้นเช่นกัน และค่า ศักย์พลาสมา (V_p) มีค่าลดลงเช่นกัน

2. จากการวัดค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาเมื่อความดันและกำลังไมโครเวฟคงที่ โดยเปลี่ยนระยะการขจัดของหัววัดในแนวการเคลื่อนที่ พบว่าเมื่อเลื่อนหัววัดเข้าไปในหลอดแก้วมากขึ้นเป็นผลให้วัดค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากขึ้นเป็นผลให้วัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้น้อยลง และจะสังเกตเห็นกัฏกร้อนมากขึ้นด้วย ส่วนค่าของศักย์ลอยและ ศักย์พลาสมามีค่าลดลงอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

What are Plasmas , address: <http://www.plasmas.org/rot-plasmas.html>

P. Chaivan, N. Pasaja, D. Boonyawan, P. Suanpoot, T. Vilaithong . 2005. Low-temperature plasma treatment for hydrophobicity improvement of silk. **Surface & Coatings Technology** : 193 (2005) 356–360

นิรุฒ มุสดี , 2545. การวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมา ของพลาสมาอาร์กอนที่ได้จากการดิสชาร์จด้วยคลื่นวิทยุใน 챔เบอร์พลาสมาแบบกลีบมะเฟือง วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Nasser E. **Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics**. The United of America : John Wiley & Sons , Inc . 1971

บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. 2539. **วิศวกรรมไมโครเวฟ**. ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : กรุงเทพมหานคร.

ศ. ทิพวรรณ กล้ายบุญมี , 2544. การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดฮอโลแคโทดแมกนีตรอน วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Alfred Grill. **Cold Plasma in Materials Fabrication**. New York: IEEE Press. 1994

Francis F. Chen. 2003. **Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics**. Los Angeles: Electrical Engineering Department. University of California (Mini-course on Plasma Diagnostics, IEEE-ICOPS meeting , Jeju , Korea)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ULN2001A-ULN2002A ULN2003A-ULN2004A

SEVEN DARLINGTON ARRAYS

- SEVEN DARLINGTONS PER PACKAGE
- OUTPUT CURRENT 500mA PER DRIVER (600mA PEAK)
- OUTPUT VOLTAGE 50V
- INTEGRATED SUPPRESSION DIODES FOR INDUCTIVE LOADS
- OUTPUTS CAN BE PARALLELED FOR HIGHER CURRENT
- TTL/CMOS/PMOS/DTL COMPATIBLE INPUTS
- INPUTS PINNED OPPOSITE OUTPUTS TO SIMPLIFY LAYOUT

DESCRIPTION

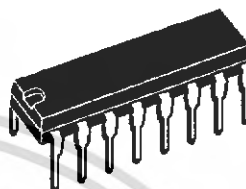
The ULN2001A, ULN2002A, ULN2003 and ULN2004A are high voltage, high current darlington arrays each containing seven open collector darlington pairs with common emitters. Each channel rated at 500mA and can withstand peak currents of 600mA. Suppression diodes are included for inductive load driving and the inputs are pinned opposite the outputs to simplify board layout.

The four versions interface to all common logic families:

ULN2001A	General Purpose, DTL, TTL, PMOS, CMOS
ULN2002A	14-25V PMOS
ULN2003A	5V TTL, CMOS
ULN2004A	6-15V CMOS, PMOS

These versatile devices are useful for driving a wide range of loads including solenoids, relays DC motors, LED displays filament lamps, thermal print-heads and high power buffers.

The ULN2001A/2002A/2003A and 2004A are supplied in 16 pin plastic DIP packages with a copper leadframe to reduce thermal resistance. They are available also in small outline package (SO-16) as ULN2001D/2002D/2003D/2004D.



DIP16

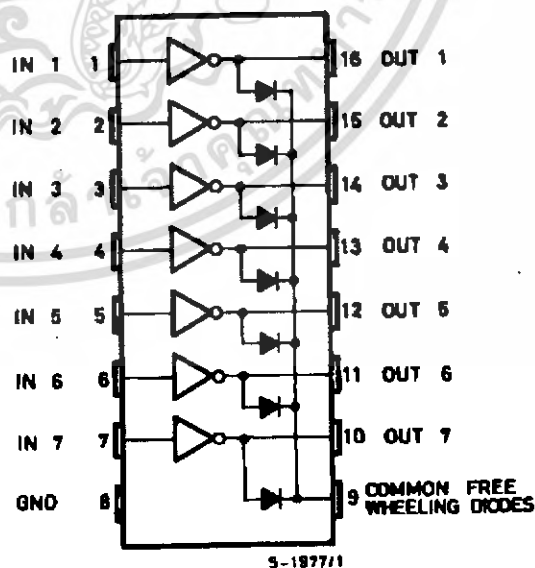
ORDERING NUMBERS: ULN2001A/2A/3A/4A



SO16

ORDERING NUMBERS: ULN2001D/2D/3D/4D

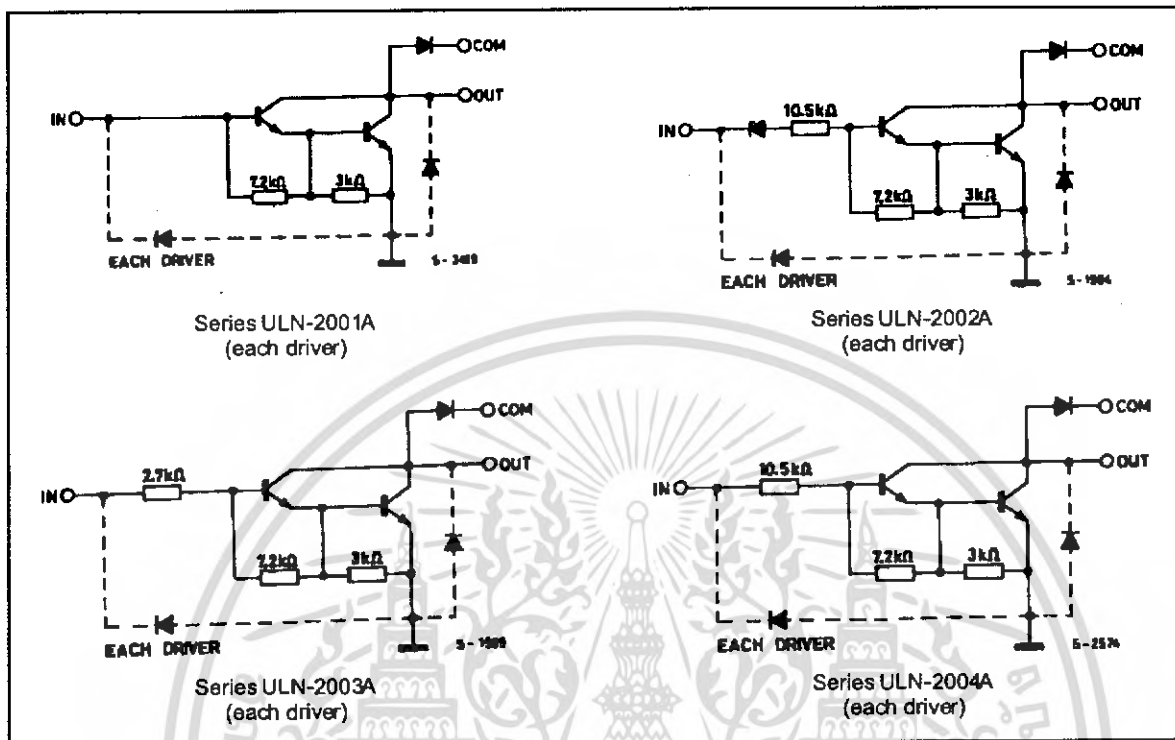
PIN CONNECTION



S-1977/1

ULN2001A - ULN2002A - ULN2003A - ULN2004A

SCHEMATIC DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_o	Output Voltage	50	V
V_{in}	Input Voltage (for ULN2002A/D - 2003A/D - 2004A/D)	30	V
I_c	Continuous Collector Current	500	mA
I_b	Continuous Base Current	25	mA
T_{amb}	Operating Ambient Temperature Range	- 20 to 85	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range	- 55 to 150	°C
T_j	Junction Temperature	150	°C

THERMAL DATA

Symbol	Parameter	DIP16	SO16	Unit
$R_{th j-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max. 70	100	°C/W

Option Explicit

'EXCEL

```
Private xlApp As Object      'excel.Application
Private xlBook As Object    'excel.workbooks
Private xlSheet As Object   'excel.WorkSheet
```

```
Private psm6003_id As Integer
Private agilent34401a_id As Integer
```

```
Private volt_start As Single
Private volt_stop As Single
Private volt_step As Single
Private step_duration As Long
Private point_avergae As Integer
Private point_duration As Long
Private scan_steps As Long
```

```
Private voltage() As Double
Private current() As Double
```

```
Private FlagRun As Boolean
Private FlagPause As Boolean
```

```
Private curve_IV As Curve
Private VoltageSigned As Integer
```

```
Private Sub cmdCancel_Click()
    If MsgBox("Exit Scan?", vbCritical + vbOKCancel, "Plasma Density") = vbOK Then
        FlagRun = False
    End If
End Sub
```

```
Private Sub cmdExit_Click()
    If MsgBox("Exit Program?", vbExclamation + vbOKCancel, "Plasma Density") = vbOK Then
        Unload Me
    End If
End Sub
```

```
Private Sub init_graph()
    plot_IV.DataCurves.RemoveAll
    plot_IV.Axes.XAxis.From = volt_start
    plot_IV.Axes.XAxis.To = volt_start + 1
    plot_IV.Axes.YAxis.From = 0
    plot_IV.Axes.YAxis.To = 1
    plot_IV.Cursors.Enable.state = False

    Set curve_IV = plot_IV.DataCurves.add("iV-Curve", voltage, current, 1, False).Curve
End Sub
```

```
Private Sub cmdPause_Click()
    If cmdPause.Caption = "PAUSE" Then
        FlagPause = True
        cmdPause.Caption = "CONTINUE"
    Else
        FlagPause = False
        cmdPause.Caption = "PAUSE"
    End If
End Sub
```

End Sub

```
Private Sub cmdStart_Click()
    FlagRun = True
    FlagPause = False
    cmdStart.Enabled = False
    cmdCancel.Enabled = True
    cmdPause.Enabled = True
    cmdExcel.Enabled = False
    cmdExit.Enabled = False
    volt_start = CSng(txt_StartVolt.Text)
    volt_stop = CSng(txt_StopVolt.Text)
    volt_step = CSng(txt_StepVolt.Text)
    step_duration = CLng(txt_StepTime)
    point_avergae = CInt(txtAvg)
    point_duration = CLng(txtAvgDly)
```

```
scan_steps = (volt_stop - volt_start) / volt_step
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Erase voltage()
Erase current()
ReDim voltage(0 To scan_steps) As Double
ReDim current(0 To scan_steps) As Double

Call init_instrument
Call init_display(lst_data)
Call init_graph
Call scan(lst_data)

Call finalized_instrument
cmdStart.Enabled = True
cmdCancel.Enabled = False
cmdPause.Enabled = False
cmdExcel.Enabled = True
cmdExit.Enabled = True
FlagRun = False
MsgBox "Mission Complete!", vbInformation, "Plasma Density"
End Sub
Private Sub scan(data_source As ListView)
    Dim i As Long
    Dim j As Integer
    Dim VouT As String

    On Error Resume Next

    For i = 0 To scan_steps
        VoltageSigned = Abs(((volt_step * i) + volt_start)) / ((volt_step * i) + volt_start)
        Call CheckRelay
        VouT = Format(((volt_step * i) + volt_start) * VoltageSigned, "#0.000")
        Call hpib_write(psm6003_id, ":VOLT " & VouT)
        Call Sleep(step_duration)

        voltage(i) = 0
        current(i) = 0
        For j = 0 To point_avergae - 1
            Call Sleep(point_duration)

            Call hpib_write(psm6003_id, "MEAS:VOLT?")
            voltage(i) = voltage(i) + CDBl(hpib_read(psm6003_id))

            Call hpib_write(agilent34401a_id, "READ?")
            current(i) = current(i) + CDBl(hpib_read(agilent34401a_id))
        Next j

        voltage(i) = voltage(i) * VoltageSigned / point_avergae
        current(i) = current(i) / point_avergae

        data_source.ListItems.add i + 1, , i
        data_source.ListItems(i + 1).SubItems(1) = Format(voltage(i), "#0.000")
        data_source.ListItems(i + 1).SubItems(2) = Format(current(i), "0.000000E-")
        data_source.Refresh

        txtV.Text = Format(voltage(i), "#0.000")
        txtI.Text = Format(current(i), "0.000000E-")

        curve_IV.UpdateData voltage, current, i + 1

        'plot_IV.Axes.XAxis.To = voltage(i)
        'plot_IV.Axes.YAxis.Autoscale
        plot_IV.Axes.Autoscale
        Do
            DoEvents
        Loop While FlagPause

        If Not FlagRun Then Exit For

    Next i
    plot_IV.Axes.SetOriginalScale
End Sub
Private Sub init_instrument()
    Dim VouT As String

    'open dmm meter address 26
    agilent34401a_id = hpib_open(26, 1000)
    'clear device

```

```

Call hpib_write(agilent34401a_id, "*CLS")
'config current measurement
Call hpib_write(agilent34401a_id, "*RCL 4")
'Call hpib_write(agilent34401a_id, "CONF:VOLT DEF,DEF")
'Call hpib_write(agilent34401a_id, "CONF:CURRE 0.5,0.00001")
Call hpib_write(agilent34401a_id, "CONF:CURRE def,def")
'open power supply address 12

psm6003_id = hpib_open(12, 1000)
'clear device
Call hpib_write(psm6003_id, "*CLS")
'power supply output on 0 V
Call hpib_write(psm6003_id, "VOLT:RANG HIGH")
Call hpib_write(psm6003_id, "CURRE:PROT:STAT OFF")
Call hpib_write(psm6003_id, "OUTP:STAT OFF")

'-----
VoltageSigned = Abs(volt_start) / volt_start
Call CheckRelay
Vout = Format(volt_start * VoltageSigned, "#0.000")
Call hpib_write(psm6003_id, ":VOLT " & Vout)
'Call hpib_write(psm6003_id, ":VOLT 0.000")
Call hpib_write(psm6003_id, "OUTP:STAT ON")
Call Sleep(500)

End Sub
Private Sub finalized_instrument()
Call hpib_write(psm6003_id, "OUTP:STAT OFF")
hpib_close (psm6003_id)
hpib_close (agilent34401a_id)
hpib_CleanUp
End Sub

Private Sub Command1_Click()
psm6003_id = hpib_open(12, 1000)
Debug.Print "id1 = " & psm6003_id
'clear device
Call hpib_write(psm6003_id, "*CLS")

agilent34401a_id = hpib_open(26, 1000)
Debug.Print "id2 = " & agilent34401a_id
'clear device
Call hpib_write(agilent34401a_id, "*CLS")

'config current
Call hpib_write(agilent34401a_id, "CONF:CURRE DEF,DEF")

'*****
Call hpib_write(agilent34401a_id, "READ?")
Debug.Print hpib_read(agilent34401a_id)
'*****
'output on
Call hpib_write(psm6003_id, "OUTP:STAT ON")

'output voltage
Call hpib_write(psm6003_id, ":VOLT 25.452")

Call hpib_write(psm6003_id, "MEAS:VOLT?")
Debug.Print hpib_read(psm6003_id)

'*****
hpib_close (psm6003_id)
hpib_close (agilent34401a_id)

hpib_CleanUp
End Sub

Private Sub Export_Excel(data_source As ListView)
Dim data_cnt As Integer
Dim column_cnt As Integer
Dim i As Long
Dim j As Long
Dim Static Sheet As Integer

```



```

If chk_xls.value = vbChecked Then Sheet = 0

data_cnt = data_source.ListItems.count
column_cnt = data_source.ColumnHeaders.count

If (data_cnt <= 0) Then
    'Exit Sub
End If

'On Error GoTo errtrap

If Sheet = 0 Then
    Set xlApp = CreateObject("Excel.Application")
    Set xlBook = xlApp.workbooks.add
End If

xlApp.Visible = False

Sheet = Sheet + 1

If Sheet < 4 Then
    Set xlSheet = xlBook.worksheets(Sheet)
Else
    Set xlSheet = xlBook.worksheets.add
End If

xlSheet.Select
'xlSheet.Name = fme_bckgnd(expt_mode).Tag & " " & Str$(Sheet)

For i = 1 To column_cnt
    xlSheet.Cells(1, i).value = data_source.ColumnHeaders(i)
Next i

'data_cnt = data_source.ListItems.Count - 1
For j = 1 To data_cnt

    xlSheet.Cells(j + 1, 1).value = data_source.ListItems(j)

    For i = 1 To column_cnt - 1
        xlSheet.Cells(j + 1, i + 1).value = data_source.ListItems(j).SubItems(i)
    Next i

Next j

xlSheet.Columns("A:" & Chr$(65 + column_cnt)).EntireColumn.AutoFit
xlApp.Visible = True

Exit Sub

errtrap:
If Err.Number = -2147417848 Then
    Set xlApp = CreateObject("Excel.Application")
    Set xlBook = xlApp.workbooks.add
    xlApp.Visible = True
    Sheet = 1
    'If Sheet < 4 Then
    Set xlSheet = xlBook.worksheets(Sheet)

'Else
    Resume Next
ElseIf Err.Number <> 0 Then
    MsgBox Err.Number & " " & Err.Description & " " & Err.data_source
End If

End Sub

Private Sub init_display(data_source As ListView)
    Dim i As Integer

    data_source.ColumnHeaders.Clear
    data_source.ListItems.Clear
    data_source.View = lvwReport
    data_source.GridLines = True

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

data_source.ColumnHeaders.add , , "No.", TextWidth("No.") + 200
data_source.ColumnHeaders.add , , "Voltage,V", TextWidth("Voltage,V") + 200
data_source.ColumnHeaders.add , , "Current,A", TextWidth("Current,A") + 1000

txtV.Text = ""
txtI.Text = ""
End Sub

Private Sub cmdExcel_Click()
    'Call init_display(1st_data)
    cmdStart.Enabled = False
    cmdExit.Enabled = False
    cmdExcel.Enabled = False
    Call Export_Excel(1st_data)
    cmdStart.Enabled = True
    cmdExit.Enabled = True
    cmdExcel.Enabled = True
    'MsgBox "Export Data to MS-Excel Complete!", vbInformation, "Plasma Density"
End Sub

Private Sub Form_Load()
    Me.Move (Screen.Width - Me.Width) / 2, (Screen.Height - Me.Height) / 2 - 200
End Sub

Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    Close
End Sub

Private Sub CheckRelay()
    If VoltageSigned = 1 Then
        Call ClrPortBit(&H378, 0)
    Else
        Call SetPortBit(&H378, 0)
    End If
End Sub

Private Sub txt_StartVolt_LostFocus()
    txt_StartVolt.Text = Format$(txt_StartVolt.Text, "#0.000")
End Sub

Private Sub txt_StepVolt_LostFocus()
    txt_StepVolt.Text = Format$(txt_StepVolt.Text, "#0.000")
End Sub

Private Sub txt_StopVolt_LostFocus()
    txt_StopVolt.Text = Format$(txt_StopVolt.Text, "#0.000")
End Sub

```

VERSION 5.00

Object = "{831FDD16-0C5C-11D2-A9FC-0000F8754DA1}#2.0#0"; "MSCOMCTL.OCX"

Object = "{103AAFF1-B371-11D5-91E1-4854E82A1F69}#1.0#0"; "DynaPlot3.ocx"

Begin VB.Form Form1

```

Caption      = "LANGMUIR PROBE CONTROLLER    Ver 1.02"
ClientHeight = 8070
ClientLeft   = 660
ClientTop    = 1635
ClientWidth  = 11625
Icon         = (Icon)
LinkTopic    = "Form1"
ScaleHeight  = 8070
ScaleWidth   = 11625

```

Begin VB.Frame Frame2

```

Caption      = "REALTIME MONITOR"
Height       = 1695
Left         = 8880
TabIndex     = 27
Top          = 120
Width        = 2655

```

Begin VB.TextBox txtI

```

Alignment    = 1 'Right Justify
BackColor    = &H00C0FFFF
Enabled      = 0 'False
Height       = 285
Left         = 1080
TabIndex     = 29
TabStop      = 0 'False
Top          = 1080
Width        = 1095

```

End

Begin VB.TextBox txtV

```

Alignment    = 1 'Right Justify
BackColor    = &H00C0C0FF
Enabled      = 0 'False
Height       = 285
Left         = 1080
TabIndex     = 28
TabStop      = 0 'False
Top          = 500
Width        = 1095

```

End

Begin VB.Label Label5

```

Caption      = "CURRENT"
Height       = 255
Left         = 120
TabIndex     = 33
Top          = 1080
Width        = 855

```

End

Begin VB.Label Label4

```

Caption      = "A"
Height       = 255
Left         = 2280
TabIndex     = 32
Top          = 1080
Width        = 135

```

End

Begin VB.Label Label3

```

Caption      = "VOLTAGE"
Height       = 255
Left         = 120
TabIndex     = 31
Top          = 500
Width        = 855

```

End

Begin VB.Label Label2

```

Caption      = "V"
Height       = 255
Left         = 2280
TabIndex     = 30
Top          = 500
Width        = 255

```

End

Begin VB.Frame Frame4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Height      = 975
Left        = 120
TabIndex    = 3
Top         = 6960
Width       = 8655
Begin VB.CheckBox chk_xls
    Caption   = "New WorkBook"
    Height    = 255
    Left      = 5160
    TabIndex  = 34
    Top       = 480
    Value     = 1 'Checked
    Width     = 1755
End
Begin VB.CommandButton cmdExit
    Caption   = "EXIT"
    Height    = 495
    Left      = 7080
    TabIndex  = 9
    ToolTipText = "Exit Program"
    Top       = 360
    Width     = 1095
End
Begin VB.CommandButton Command1
    Caption   = "Command1"
    Height    = 495
    Left      = 7200
    TabIndex  = 8
    Top       = 360
    Visible   = 0 'False
    Width     = 1575
End
Begin VB.CommandButton cmdExcel
    Caption   = "EXCEL"
    Height    = 495
    Left      = 3840
    TabIndex  = 7
    ToolTipText = "Export Data to Excel"
    Top       = 360
    Width     = 1095
End
Begin VB.CommandButton cmdStart
    Caption   = "START"
    Height    = 495
    Left      = 120
    TabIndex  = 6
    ToolTipText = "Start Scan"
    Top       = 360
    Width     = 1095
End
Begin VB.CommandButton cmdCancel
    Caption   = "STOP"
    Enabled   = 0 'False
    Height    = 495
    Left      = 2520
    TabIndex  = 5
    ToolTipText = "Stop Scan"
    Top       = 360
    Width     = 1095
End
Begin VB.CommandButton cmdPause
    Caption   = "PAUSE"
    Enabled   = 0 'False
    Height    = 495
    Left      = 1320
    TabIndex  = 4
    ToolTipText = "Pause Scan"
    Top       = 360
    Width     = 975
End
Begin DYNAPLOT3Lib.DynaPlot plot_IV
    Height    = 4785
    Left      = 120
    TabIndex  = 2
    Top       = 2040

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Width = 8655
_Version = 65536
ExtentX = 15266
ExtentY = 8440
StockProps = 64
FileVersion = 1
TD.Title.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.Title.Text = "Plasma I-V Characteristic Curve"
TD.Title.MaxFontSize= 30
TD.Title.MinFontSize= 10
TD.Title.SizingFactor= 55
TD.Title.TextColor= 0
TD.Title.BackgndColor= 0
TD.Title.BackgndTransparent= -1 'True
TD.Title.Visible= -1 'True
TD.Title.FontWeight= 700
TD.Title.Orientation= 0
TD.X.Fontname = "MS Sans Serif"
TD.X.Text = "Voltage"
TD.X.MaxFontSize= 25
TD.X.MinFontSize= 10
TD.X.SizingFactor= 40
TD.X.TextColor = 0
TD.X.BackgndColor= 0
TD.X.BackgndTransparent= -1 'True
TD.X.Visible = -1 'True
TD.X.FontWeight = 700
TD.X.Orientation= 0
TD.Y.Fontname = "Lucida Console"
TD.Y.Text = "Current"
TD.Y.MaxFontSize= 25
TD.Y.MinFontSize= 10
TD.Y.SizingFactor= 40
TD.Y.TextColor = 0
TD.Y.BackgndColor= 0
TD.Y.BackgndTransparent= -1 'True
TD.Y.Visible = -1 'True
TD.Y.FontWeight = 1000
TD.Y.Orientation= 90
TD.Y1.Fontname = "Lucida Console"
TD.Y1.Text = "Y1-Axis"
TD.Y1.MaxFontSize= 25
TD.Y1.MinFontSize= 10
TD.Y1.SizingFactor= 70
TD.Y1.TextColor = 0
TD.Y1.BackgndColor= 0
TD.Y1.BackgndTransparent= -1 'True
TD.Y1.Visible = -1 'True
TD.Y1.FontWeight= 1000
TD.Y1.Orientation= 90
TD.XNum.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.XNum.Text = ""
TD.XNum.MaxFontSize= 20
TD.XNum.MinFontSize= 10
TD.XNum.SizingFactor= 40
TD.XNum.TextColor= 0
TD.XNum.BackgndColor= 0
TD.XNum.BackgndTransparent= -1 'True
TD.XNum.Visible = -1 'True
TD.XNum.FontWeight= 700
TD.XNum.Orientation= 0
TD.YNum.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.YNum.Text = ""
TD.YNum.MaxFontSize= 20
TD.YNum.MinFontSize= 10
TD.YNum.SizingFactor= 40
TD.YNum.TextColor= 0
TD.YNum.BackgndColor= 0
TD.YNum.BackgndTransparent= -1 'True
TD.YNum.Visible = -1 'True
TD.YNum.FontWeight= 700
TD.YNum.Orientation= 0
TD.Y1Num.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.Y1Num.Text = ""
TD.Y1Num.MaxFontSize= 20
TD.Y1Num.MinFontSize= 10

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ พงษ์สิทธิ์กัญจน์ หัตถ์แปงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TD.Y1Num.SizingFactor= 40
TD.Y1Num.TextColor= 0
TD.Y1Num.BackgndColor= 0
TD.Y1Num.BackgndTransparent= -1 'True
TD.Y1Num.Visible= -1 'True
TD.Y1Num.FontWeight= 700
TD.Y1Num.Orientation= 0
TD.XUnit.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.XUnit.Text = "Volt"
TD.XUnit.MaxFontSize= 20
TD.XUnit.MinFontSize= 10
TD.XUnit.SizingFactor= 40
TD.XUnit.TextColor= 0
TD.XUnit.BackgndColor= 0
TD.XUnit.BackgndTransparent= -1 'True
TD.XUnit.Visible= -1 'True
TD.XUnit.FontWeight= 700
TD.XUnit.Orientation= 0
TD.YUnit.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.YUnit.Text = "A"
TD.YUnit.MaxFontSize= 20
TD.YUnit.MinFontSize= 10
TD.YUnit.SizingFactor= 40
TD.YUnit.TextColor= 0
TD.YUnit.BackgndColor= 0
TD.YUnit.BackgndTransparent= -1 'True
TD.YUnit.Visible= -1 'True
TD.YUnit.FontWeight= 700
TD.YUnit.Orientation= 0
TD.Y1Unit.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.Y1Unit.Text = "Y1Unit"
TD.Y1Unit.MaxFontSize= 20
TD.Y1Unit.MinFontSize= 10
TD.Y1Unit.SizingFactor= 40
TD.Y1Unit.TextColor= 0
TD.Y1Unit.BackgndColor= 0
TD.Y1Unit.BackgndTransparent= -1 'True
TD.Y1Unit.Visible= -1 'True
TD.Y1Unit.FontWeight= 700
TD.Y1Unit.Orientation= 0
TD.Cursor.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.Cursor.Text = ""
TD.Cursor.MaxFontSize= 20
TD.Cursor.MinFontSize= 10
TD.Cursor.SizingFactor= 40
TD.Cursor.TextColor= 16777215
TD.Cursor.BackgndColor= 0
TD.Cursor.BackgndTransparent= 0 'False
TD.Cursor.Visible= -1 'True
TD.Cursor.FontWeight= 400
TD.Cursor.Orientation= 0
TD.Legend.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.Legend.Text = ""
TD.Legend.MaxFontSize= 20
TD.Legend.MinFontSize= 10
TD.Legend.SizingFactor= 33
TD.Legend.TextColor= 0
TD.Legend.BackgndColor= 0
TD.Legend.BackgndTransparent= -1 'True
TD.Legend.Visible= -1 'True
TD.Legend.FontWeight= 700
TD.Legend.Orientation= 0
TD.Marker.Fontname= "MS Sans Serif"
TD.Marker.Text = ""
TD.Marker.MaxFontSize= 40
TD.Marker.MinFontSize= 10
TD.Marker.SizingFactor= 40
TD.Marker.TextColor= 0
TD.Marker.BackgndColor= 0
TD.Marker.BackgndTransparent= -1 'True
TD.Marker.Visible= -1 'True
TD.Marker.FontWeight= 400
TD.Marker.Orientation= 0
Plot.Border.MaxWidth= 4
Plot.Border.SizingFactor= 4
Plot.Border.Type= 7

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Plot.Border.Color= 0
Plot.Border.ColorHighlight= 13160660
Plot.Border.TypeHighlight= 0
Plot.Background.Color= 13099774
Plot.Background.Bitmap= ""
Plot.Background.StretchBitmap= 0 'False
Plot.Background.Transparent= -1 'True
Chart.Border.MaxWidth= 4
Chart.Border.SizingFactor= 1
Chart.Border.Type= 3
Chart.Border.Color= 0
Chart.Border.ColorHighlight= 6956042
Chart.Border.TypeHighlight= 0
Chart.Background.Color= 13160660
Chart.Background.Bitmap= ""
Chart.Background.StretchBitmap= 0 'False
Chart.Background.Transparent= 0 'False
Cursors.Border.MaxWidth= 1
Cursors.Border.SizingFactor= 20
Cursors.Border.Type= 0
Cursors.Border.Color= 16777215
Cursors.Border.ColorHighlight= 13160660
Cursors.Border.TypeHighlight= 0
Cursors.Background.Color= 13160660
Cursors.Background.Bitmap= ""
Cursors.Background.StretchBitmap= 0 'False
Cursors.Background.Transparent= -1 'True
Pens.XMajor.Color= 12632256
Pens.XMajor.Style= 0
Pens.XMajor.Width= 1
Pens.XMajor.WidthSizingFactor= 10
Pens.XMinor.Color= 12632256
Pens.XMinor.Style= 2
Pens.XMinor.Width= 1
Pens.XMinor.WidthSizingFactor= 10
Pens.YMajor.Color= 12632256
Pens.YMajor.Style= 0
Pens.YMajor.Width= 1
Pens.YMajor.WidthSizingFactor= 10
Pens.YMinor.Color= 12632256
Pens.YMinor.Style= 2
Pens.YMinor.Width= 1
Pens.YMinor.WidthSizingFactor= 10
Pens.YlMajor.Color= 12582912
Pens.YlMajor.Style= 0
Pens.YlMajor.Width= 1
Pens.YlMajor.WidthSizingFactor= 10
Pens.YlMinor.Color= 12582912
Pens.YlMinor.Style= 2
Pens.YlMinor.Width= 1
Pens.YlMinor.WidthSizingFactor= 10
Pens.ActiveCursor.Color= 255
Pens.ActiveCursor.Style= 0
Pens.ActiveCursor.Width= 1
Pens.ActiveCursor.WidthSizingFactor= 10
Pens.InactiveCursor.Color= 16777215
Pens.InactiveCursor.Style= 2
Pens.InactiveCursor.Width= 1
Pens.InactiveCursor.WidthSizingFactor= 10
XAxis.ScaleType = 1
XAxis.GridType = 1
XAxis.TicMarks = -1 'True
XAxis.Visible = -1 'True
XAxis.From = .19
XAxis.To = 21
XAxis.TimeFormat= "%x\n%X"
XAxis.LabelsCenterAligned= -1 'True
YAxis.ScaleType = 1
YAxis.CustomAnnotation= 4
YAxis.GridType = 1
YAxis.TicMarks = -1 'True
YAxis.Visible = -1 'True
YAxis.From = -100
YAxis.To = 100
YAxis.TimeFormat= "%x\n%X"
YAxis.LabelsCenterAligned= -1 'True

```

```

Y1Axis.ScaleType= 1
Y1Axis.GridType = 1
Y1Axis.TicMarks = -1 'True
Y1Axis.Visible = 0 'False
Y1Axis.From = -10
Y1Axis.To = 10
Y1Axis.TimeFormat= "%x\n%X"
Y1Axis.LabelsCenterAligned= -1 'True
Axes.BitmapMode.State= 0 'False
Logo = ""
DC.Pens.Count = 8
DC.Pens(0).Color= 16711680
DC.Pens(0).Style= 0
DC.Pens(0).Width= 1
DC.Pens(0).WidthSizingFactor= 10
DC.Pens(1).Color= 65535
DC.Pens(1).Style= 0
DC.Pens(1).Width= 1
DC.Pens(1).WidthSizingFactor= 10
DC.Pens(2).Color= 16776960
DC.Pens(2).Style= 0
DC.Pens(2).Width= 1
DC.Pens(2).WidthSizingFactor= 10
DC.Pens(3).Color= 32896
DC.Pens(3).Style= 0
DC.Pens(3).Width= 1
DC.Pens(3).WidthSizingFactor= 10
DC.Pens(4).Color= 16711935
DC.Pens(4).Style= 0
DC.Pens(4).Width= 1
DC.Pens(4).WidthSizingFactor= 10
DC.Pens(5).Color= 49152
DC.Pens(5).Style= 0
DC.Pens(5).Width= 1
DC.Pens(5).WidthSizingFactor= 10
DC.Pens(6).Color= 8388608
DC.Pens(6).Style= 0
DC.Pens(6).Width= 1
DC.Pens(6).WidthSizingFactor= 10
DC.Pens(7).Color= 8388736
DC.Pens(7).Style= 0
DC.Pens(7).Width= 1
DC.Pens(7).WidthSizingFactor= 10
DC.Count = 0
TC.Pens.Count = 1
TC.Pens(0).Color= 65535
TC.Pens(0).Style= 0
TC.Pens(0).Width= 1
TC.Pens(0).WidthSizingFactor= 10
TC.Count = 0
DataBitmaps.Count= 0
XLabels.Count = 0
YLabels.Count = 0
Y1Labels.Count = 0

```

End

Begin VB.Frame Frame1

```

Caption = "SCAN OPTION"
Height = 1695
Left = 120
TabIndex = 1
Top = 120
Width = 8655

```

Begin VB.TextBox txt_StepTime

```

Alignment = 1 'Right Justify
BackColor = &H00FFFFC0&
Height = 285
Left = 4560
TabIndex = 18
Text = "0"
Top = 1080
Width = 615

```

End

Begin VB.TextBox txt_StepVolt

```

Alignment = 1 'Right Justify
BackColor = &H00FFFFC0&
Height = 285

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ใช้สำหรับการปฏิบัติงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

Left = 1680
TabIndex = 17
Text = "0.5"
Top = 1080
Width = 615
End
Begin VB.TextBox txt_StopVolt
Alignment = 1 'Right Justify
BackColor = &H00FFFFC0&
Height = 285
Left = 4560
TabIndex = 16
Text = "20.000"
Top = 480
Width = 615
End
Begin VB.TextBox txt_StartVolt
Alignment = 1 'Right Justify
BackColor = &H00FFFFC0&
Height = 285
Left = 1680
TabIndex = 15
Text = "-50.000"
Top = 480
Width = 615
End
Begin VB.TextBox txtAvgDly
Alignment = 1 'Right Justify
BackColor = &H00C0FFC0&
Height = 285
Left = 7560
TabIndex = 11
Text = "0"
Top = 1080
Width = 615
End
Begin VB.TextBox txtAvg
Alignment = 1 'Right Justify
BackColor = &H00C0FFC0&
Height = 285
Left = 7560
TabIndex = 10
Text = "3"
Top = 480
Width = 615
End
Begin VB.Label Label12
Caption = "STEP DURATION"
Height = 255
Left = 3000
TabIndex = 26
Top = 1080
Width = 1575
End
Begin VB.Label Label13
Caption = "VOLTAGE STEP"
Height = 255
Left = 120
TabIndex = 25
Top = 1080
Width = 1335
End
Begin VB.Label Label14
Caption = "v"
Height = 255
Left = 2400
TabIndex = 24
Top = 1080
Width = 255
End
Begin VB.Label Label15
Caption = "VOLTAGE STOP "
Height = 255
Left = 3000
TabIndex = 23
Top = 480

```

```

Width          = 1335
End
Begin VB.Label Label16
Caption        = "v"
Height        = 255
Left          = 5280
TabIndex      = 22
Top           = 480
Width         = 255
End
Begin VB.Label Label17
Caption        = "VOLTAGE START "
Height        = 255
Left          = 120
TabIndex      = 21
Top           = 480
Width         = 1455
End
Begin VB.Label Label18
Caption        = "v"
Height        = 255
Left          = 2400
TabIndex      = 20
Top           = 480
Width         = 255
End
Begin VB.Label Label1
Caption        = "ms"
Height        = 255
Left          = 5280
TabIndex      = 19
Top           = 1080
Width         = 255
End
Begin VB.Label Label11
Caption        = "ms"
Height        = 255
Left          = 8280
TabIndex      = 14
Top           = 1080
Width         = 255
End
Begin VB.Label Label10
AutoSize      = -1 'True
Caption       = "AV.POINT DURATION"
Height       = 195
Left         = 5800
TabIndex     = 13
Top          = 1080
Width        = 1680
End
Begin VB.Label Label9
Caption       = "AVERAGE POINTS"
Height       = 255
Left         = 5800
TabIndex     = 12
Top          = 480
Width        = 1455
End
End
Begin MSComctlLib.ListView lst_data
Height       = 5895
Left         = 8880
TabIndex     = 0
Top          = 2040
Width        = 2655
ExtentX      = 4683
ExtentY      = 10398
LabelWrap    = -1 'True
HideSelection = -1 'True
Version      = 393217
ForeColor    = -2147483640
BackColor    = 12640511
BorderStyle = 1
Appearance   = 1
NumItems     = 0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากท่านมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Form1 - 9

End
End



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้