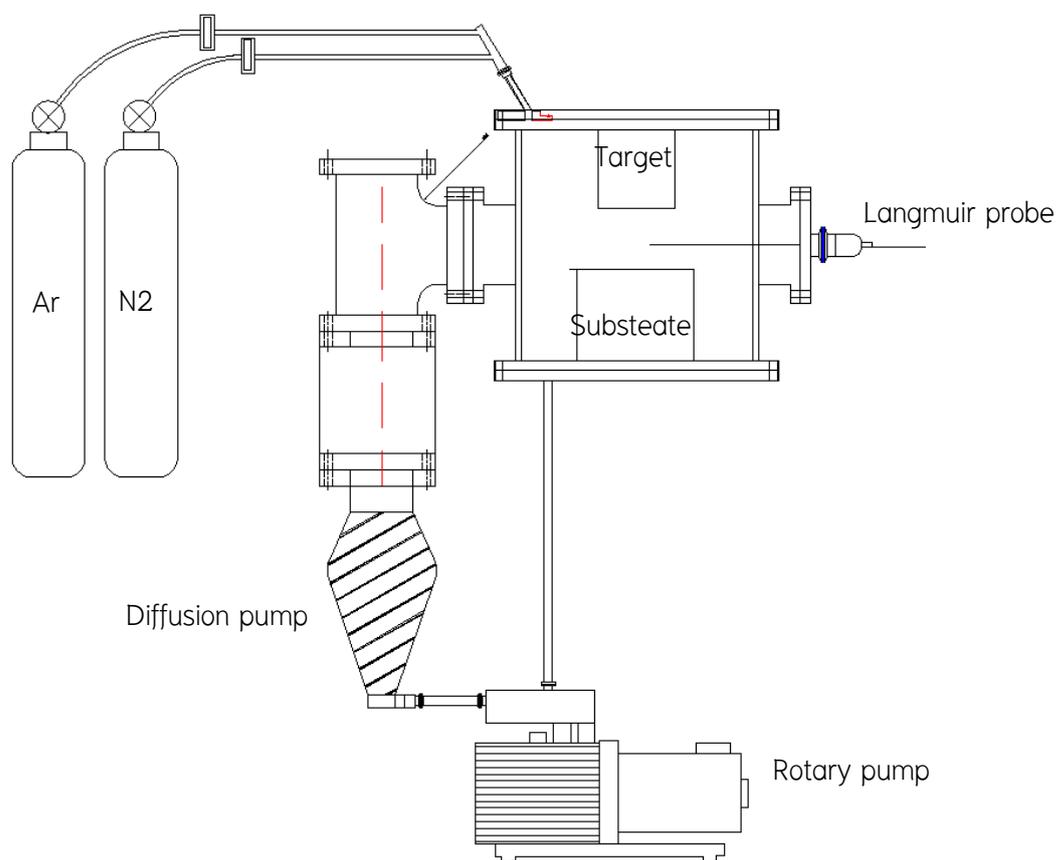


### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองกำเนิดพลาสมาด้วยระบบกำเนิดพลาสมาแบบดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัดทางไฟฟ้าที่สร้างขึ้น แล้วเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้กับหัววัดเชิงการค้าที่มีขายในท้องตลาด จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 เครื่อง ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง



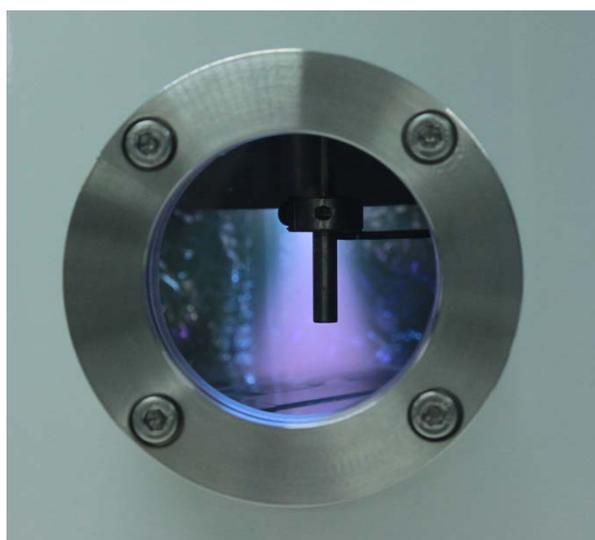
รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่อง ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 3.2 เครื่อง ดีซี แมกนีตรอนสปัตเทอริง ติดตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการสุญญากาศและวัสดุศาสตร์



รูปที่ 3.3 แกรไฟต์ความบริสุทธิ์ 99.999% ซึ่งใช้เป็นต้นกำเนิดสารในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.4 แสดงการโก๊สวัดสซาร์จของหัวแมกนิตรอน

## 3.2 ขั้นตอนการกำเนิดพลาสมา

ในทุกครั้งที่ทำการสเปกโตริงจะดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 3.2.1 ขั้นตอนก่อนการสเปกโตริง

ทำความสะอาดเป่าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด ทำความสะอาดหัวแมกนิตรอน เพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนิตรอนและกราวซีลด์ และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์ค ขึ้นได้ ติดตั้งเป่าที่หัวแมกนิตรอนและนำหัวแมกนิตรอนไปติดตั้งที่ด้านบนของภาชนะสุญญากาศ ปรับ แทนวางแผ่นรองรับให้ห่างจากเป่าตามระยะห่างที่ต้องการ และตรวจสอบทุกระบบที่ใช้ในการ สเปกโตริง

เตรียมแผ่นรองรับ โดยแผ่นรองรับที่ใช้ในการสเปกโตริง คือ แผ่นกระจกสไลด์ โดย นำไปตัดให้มีขนาดตามต้องการ และนำไปทำความสะอาดด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
- ทำความสะอาดด้วยน้ำปอลดประจุ ในเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 30 นาที
- ทำความสะอาดด้วยเอทานอล ในเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 30 นาที
- ทำความสะอาดด้วยไดเมทิลโอฟีนในเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 30 นาที
- เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
- ชั่งมวลของแผ่นรองรับ แล้วนำไปใส่ไว้บนแท่นวางแผ่นรองรับ

### 3.2.2 ขั้นตอนการสเปกโตริง

- เปิดปั๊มกลโรตารี และเปิดวาล์วหยาบสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ  $7.0 \times 10^{-3}$  ทอร์
- เปิดน้ำระบายความร้อนให้กับปั๊มไอฟุ้งกระจาย จ่ายไฟให้กับขดลวดทำความร้อน ของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อทำการต้มน้ำมัน
- ปิดวาล์วหยาบ เปิดวาล์วหลังเพื่อสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศผ่านทางปั๊ม ไอฟุ้งกระจาย
- เปิดวาล์วหลักเพื่อสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศด้วยการทำงานร่วมกันของปั๊มไอฟุ้งกระจายและปั๊มกลโรตารี
- เมื่อความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ  $6.5 \times 10^{-6}$  ทอร์ ป้อนแก๊ส อาร์กอนผ่านทางเครื่องควบคุมการไหลของแก๊สโดยมวล โดยควบคุมให้อัตราการไหลของแก๊สคงที่ อย่างต่อเนื่องในปริมาณที่ต้องการ และเปิดวาล์วเพื่อปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ ควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าอยู่ในช่วง  $1 \times 10^{-3} - 1.3 \times 10^{-3}$  ทอร์

- เปิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปรับกำลังที่จ่ายให้กับระบบโดยมีค่าระหว่าง 25-150 วัตต์ และสังเกตการโกล์วดิสชาร์จที่เกิดขึ้น
- เมื่อเกิดการโกล์วดิสชาร์จขึ้น ปรับวาล์วหลังให้อัตราการป้อนสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊ส เพื่อให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะป้อนแก๊สอาร์กอนมีค่าคงที่
- เมื่อควบคุมเงื่อนไขได้ตามต้องการแล้วทำการสับตัดเทอร์ริงเป็นเวลาตามต้องการ
- เมื่อทำการสับตัดเทอร์ริงครบตามเวลาที่ต้องการ ปิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปิดระบบการป้อนแก๊ส หยุดการจ่ายไฟให้กับชุดหลอดความร้อนที่ป้อนไอฟุ้งกระจาย ปิดปลั๊กวาล์ว ปล่อยให้อากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ นำที่วางแผ่นรองรับพร้อมแผ่นรองรับออกจากภาชนะสุญญากาศผ่านทางช่องทางใส่แผ่นรองรับ ชั่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ และปิดปั๊มกลโรตารีหลังจากชุดหลอดความร้อนเย็นลง

### 3.2.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการกำเนิดพลาสมา

ในเงื่อนไขของการกำเนิดพลาสมาเป่าแก๊สไฟต์ถูกนำมาใช้ในการสับตัดเทอร์ริง ที่ระยะห่างระหว่างเป่าถึงแผ่นรองรับ 7 เซนติเมตร นอกจากนี้จากการทดลองการสับตัดเทอร์ริง พบว่าความดันของแก๊สอาร์กอนที่สามารถทำให้การสับตัดเทอร์ริงยังรักษาสภาพอยู่ได้อย่างต่อเนื่องมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ  $1 \times 10^{-3}$  ทอร์ ดังนั้นจึงทำการสับตัดเทอร์ริงในความดันของแก๊สอาร์กอนที่ประมาณ  $1 - 3 \times 10^{-3}$  ทอร์ โดยการสับตัดเทอร์ริงได้ใช้ตามเงื่อนไขในตารางการทดลองที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการสับตัดเทอร์ริง

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง
เป่าที่ใช้	แก๊สไฟต์
แผ่นรองรับ	แผ่นสไลด์
ระยะห่างระหว่างเป่าถึงแผ่นรองรับ	7 เซนติเมตร
ความดันพื้นฐาน	$4.5 - 6 \times 10^{-6}$ ทอร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ความดันขณะทำการสับตัดเทอร์ริง	$1.0 - 1.3 \times 10^{-3}$ ทอร์
เวลาที่ใช้ในการเคลือบ	60-180 วินาที
ปรับค่าพลังงานของการดิสชาร์จ	25 - 150 วัตต์

### 3.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา

#### 3.3.1 การสร้างหัววัดทางไฟฟ้า

หลักการของหัววัดทางไฟฟ้าคือ การใช้โลหะตัวนำใส่เข้าไปสัมผัสกับบริเวณที่ต้องการวัด แต่เนื่องจากคุณสมบัติของพลาสมามีค่าสูง ดังนั้นการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำหัววัดจึงต้องพิจารณาถึงสมบัติด้านการทนความร้อนของวัสดุด้วย ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ในการทดลองนี้เลือกใช้ขดลวดความร้อน (นิกเกิล-โครเมียม) ซึ่งหาได้ง่ายและมีราคาไม่สูง แม้ว่าสมบัติบางอย่างจะด้อยกว่าโมลิบดีนัม แต่ด้วยสมบัติที่ขดลวดชนิดนี้สามารถทนความร้อนและทนต่อการสึกหรอสูง จึงสามารถนำมาทำเป็นหัววัดพลาสมาได้

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างสมบัติของธาตุต่างๆ [10]

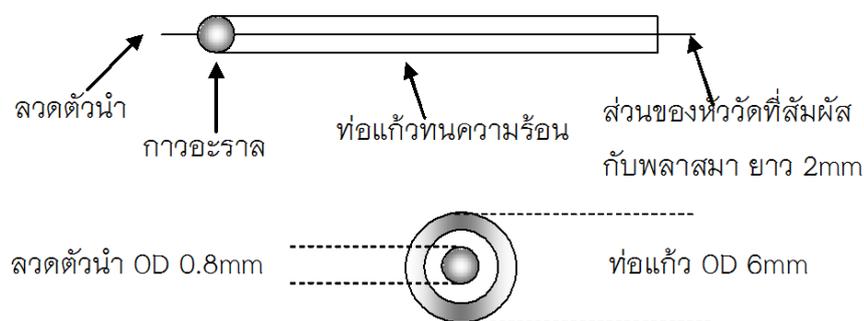
Material	Atomic weight (g)	Work function (V)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Melting point (°C)	Sputtering rate (g/cm <sup>3</sup> h)
Al	27	4.20	2.699	660.1	1.07
Fe	55.9	4.63	7.87	1535	2.31
Ni	58.7	4.91	8.9	1453	2.4
Mo	96.0	4.24	10.21	2610	3.9
Ta	181.0	4.13	16.6	2996	7.4
W	183.9	4.53	19.4	3395	7.7
Pt	195.2	5.36	21.45	1769	15.8

วัสดุที่มีความเหมาะสมมากในการทำหัววัดก็คือโมลิบดีนัม เพราะมีอัตราการสputtering (sputtering rate) ต่ำ และมีจุดหลอมเหลว (melting point) สูง จึงทนต่อการสึกหรอทั้งจากการชนของอนุภาคในพลาสมาและจากความร้อนขณะที่พลาสมาเกิดขึ้นได้ดี วัสดุถัดมาที่เป็นที่นิยมคือทังสเตน เพราะมีจุดหลอมเหลวสูงมาก

นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความไวในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุด้วย เช่น เหล็กมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง มีอัตราการอบด้วยโลหะต่ำ แต่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานผิวดกับโมลิบดีนัมและทังสเตน แต่อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งสองมีราคาสูง ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานในการทดลองครั้งนี้ เราเลือกวัสดุที่หาได้ง่าย มีต้นทุนการผลิตต่ำ และมีความทนทานดังที่กล่าวมาแล้วด้วย ในการทดลองนี้เราเลือกใช้ลวดความร้อนที่ทำจากโลหะผสมนิเกิล ซึ่งมีสมบัติในการทนต่อการสึกหรอ และมีจุดหลอมเหลวสูง คือประมาณ 1400°C แทน เพราะราคาต่ำกว่าลวดโมลิบดีนัมมาก คือมีราคาต่างกันประมาณ 100 เท่า

ในการสร้างหัววัดนั้น โดยทั่วไปจะใช้วัสดุฉนวนห่อหุ้มลวดตัวนำนั้น ๆ ไว้ โดยปล่อยให้ส่วนปลายให้อยู่นอกฉนวนนั้นไว้ประมาณ 2 ถึง 3 mm เพื่อใช้เป็นส่วนสัมผัสกับพลาสติก สำหรับการดิสชาร์จทั่วไปนั้น วัสดุที่นำมาทำฉนวนอาจจะเป็นแก้วไพเรกซ์ (pyrex) หรือควอตซ์ (quartz) แต่ถ้าเป็นการดิสชาร์จที่มีความเข้มสูงก็ต้องใช้วัสดุที่สามารถทนความร้อนได้สูงขึ้นไปด้วย เช่น อะลูมินา (alumina) สำหรับการวัดที่มีการสั่น (oscillation) หรือมีการเปลี่ยนแปลง (fluctuation) รบกวน จำเป็นที่จะต้องมีการป้องกันสัญญาณรบกวนเหล่านั้น ไม่ให้มารบกวนสัญญาณที่ต้องการวัด โดยอาจจะใช้สายโคแอกเชียล (coaxial cable) หรือทำต่อโลหะที่ต่อกราวด์ (grounding) ไว้ ห่อหุ้มภายนอกหัววัดในบริเวณที่เป็นฉนวนอีกที เรียกหัววัดเช่นนี้ว่า หัววัดที่มีการกำบัง (shielded probe) ดังเช่น หัววัดลางมาร์วี่ที่ใช้ในการวัดพลาสติกที่เกิดจากคลื่นวิทยุ ของ หมุดตอเล็บ นิสอ [16] และ Paosawatyanong [17]

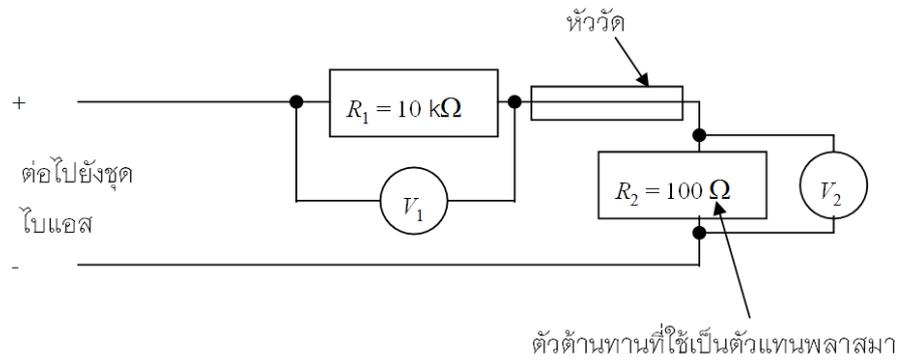
จากทฤษฎีในบทที่ 2 ทำให้เราทราบว่า หัววัดควรมีขนาดโตกว่าระยะเดอบาย โดยทั่วไปแล้วมีขนาดอยู่ในระดับของ 0.1 mm ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ พบว่าระยะเดอบายมีขนาดประมาณ 0.6 mm ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงเลือกเส้นลวดความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (outer diameter, OD) 0.8 mm การที่ไม่เลือกใช้หัววัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโตมากเกินไป เพราะต้องการวัดพลาสติกแบบเฉพาะที่ (local measurement) จากนั้นจึงเป็นการนำลวดตัวนำที่ได้มาบรรจุในฉนวนไฟฟ้าในการทดลองนี้เลือกใช้หลอดแก้วที่ทนความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm โดยใช้ท่อแก้วยาว 15 cm แล้วฉีกส่วนท้ายด้วยกาวอะราลดีท (araldite glue) เพื่อไม่ให้แก๊สภายในระบบรั่วออกมาทางหัววัด จนไม่สามารถคงความเป็นสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศตามที่ต้องการไว้ได้ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางและภาพด้านหน้าของหัววัดเดี่ยว

เมื่อในระบบวัดมีสัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนจะสามารถเข้าสู่หัววัดได้เฉพาะส่วนปลายของหัววัดที่ไม่ได้ทำฉนวนไว้เท่านั้น โดยสัญญาณรบกวนที่ส่วนอื่น ๆ จะถูกชักนำให้ลงสู่กราวด์ ผ่านโลหะทองแดงที่หุ้มอยู่ภายนอกของหัววัด

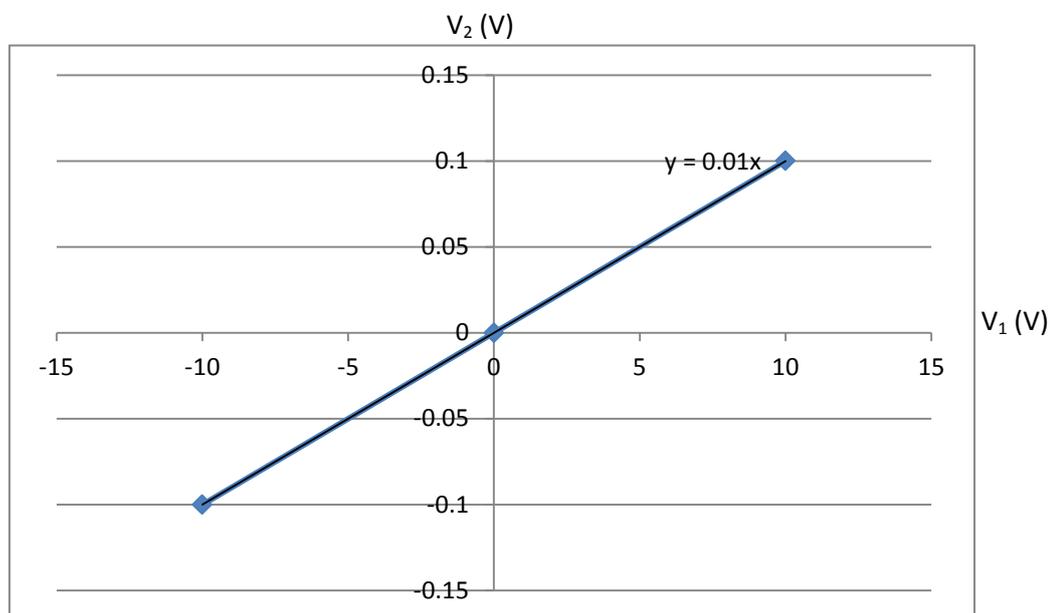
ก่อนที่จะนำหัววัดที่สร้างไปใช้งานจริงนั้น ได้มีการทดสอบการทำงานของหัววัดก่อน โดยใช้ตัวต้านทานขนาด  $100 \Omega$  แทนพลาสมา ต่อเชื่อมกับหัววัดทำให้วงจรที่ต่ออยู่กับหัววัดเกิดการครบวงจรขึ้น ดังรูปที่ 3.6 จากนั้นจึงทำการไบแอสหัววัดด้วยศักย์ค่าต่าง ๆ กัน แล้วบันทึกค่ากระแสที่ได้จากหัววัด ซึ่งสอดคล้องกับศักย์ไบแอสนั้น ๆ จากนั้นจึงนำชุดข้อมูลกระแสศักย์ เหล่านี้มาเขียนกราฟพร้อมกัน ซึ่งกราฟระหว่างกระแส-ศักย์ที่ได้นั้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แผนภาพการทดสอบหัววัดทางไฟฟ้า

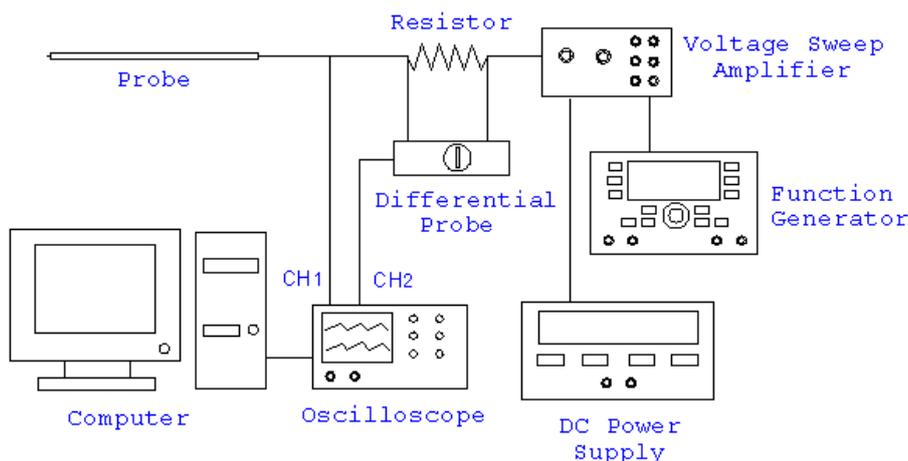
หาความสัมพันธ์ของตัวต้านทานได้ดังสมการ

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{IR_2}{IR_1} = \frac{R_2}{R_1} = 0.01$$



รูปที่ 3.7 กราฟจากวงจรทดสอบ

จากรูปที่ 3.6 พบว่าอัตราส่วนของ  $V_2/V_1$  ในกราฟ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความต้านทาน ที่ควรจะเป็นตามกฎของโอห์มพอดิ นั่นคือมีค่าเป็น  $0.01 \Omega$  ทำให้เชื่อมั่นได้ว่าระบบหัววัดแบบแสงมัลติเมื่อนำไปใช้กับระบบพลาสมาจริง จะยังให้ผลการวัดที่ถูกต้องเช่นกัน

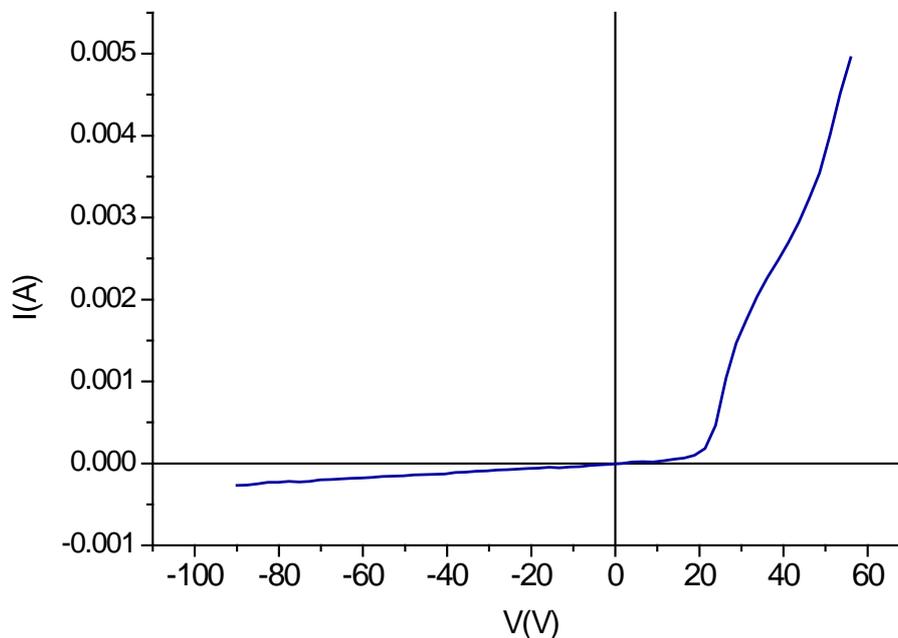


รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์หัวแปรของพลาสมาด้วย

### หัววัดทางไฟฟ้าแบบแสงมัลติ

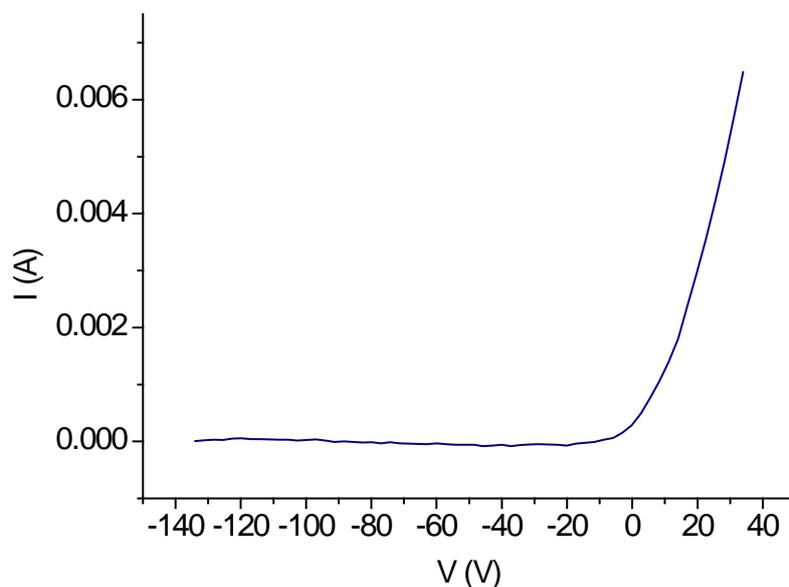
รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพรวมของระบบการวัดพลาสมาด้วยหัววัดแสงมัลติ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator) จ่ายสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ขนาด  $10 V_{pp}$  ผ่านชุดขยายสัญญาณ (Voltage sweep amplifier) สัญญาณที่ถูกขยายแล้วนี้จะถูกส่งต่อไปยังหัววัดที่สอดในพลาสมาที่ตำแหน่งเดียวกับแผ่นรองรับเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งนั้น บันทึกค่ากระแส ( $I_p$ ) ที่อ่านได้จากความต่างศักย์ที่คร่อมตัวต้านทาน  $500 \Omega$  และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่หัววัด บันทึกผ่านช่องบันทึกสัญญาณที่ 1 และ 2 บนเครื่องออสซิลอสโคป จากนั้นนำผลที่ได้ ส่งผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมผ่านทางพอร์ต RS 232 เพื่อใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel<sup>TM</sup> และ Origin<sup>TM</sup> ช่วยวิเคราะห์ผลที่ได้เป็นลำดับ

### 3.3.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา



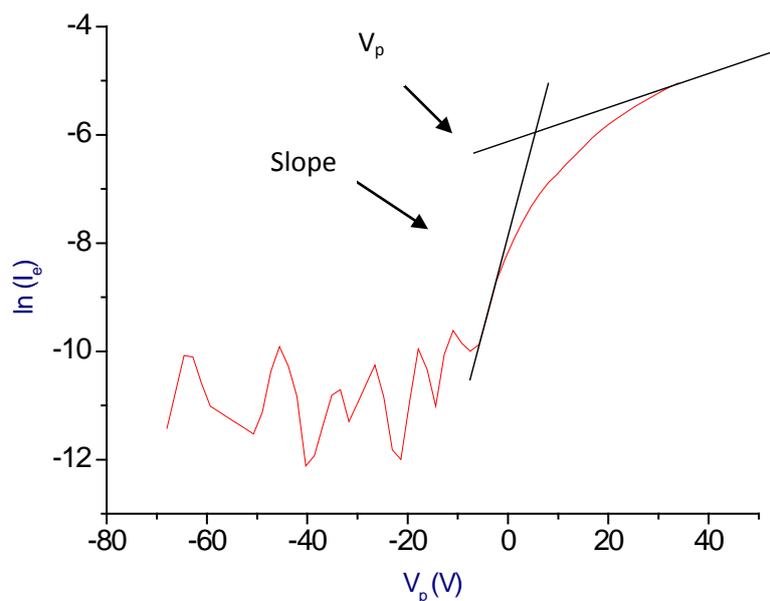
รูปที่ 3.9 กราฟส่อกระแสคัลย์ของพลาสมา

แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาจากสัญญาณที่วัดได้จากแก๊สอาร์กอนความดัน 0.001 torr กำลังไฟฟ้า 150 W ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ด้วยการไบแอสคัลย์ค่าต่างๆ กันให้แก่หัววัดนั้น พร้อมทั้งบันทึกค่าของกระแสที่ได้จากหัววัด ที่แปรตามคัลย์ที่ไบแอส นำค่าของคู่กระแส-คัลย์ต่าง ๆ มาเขียนกราฟลักษณะเฉพาะของหัววัดลงมัวร์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 กราฟลักษณะส่อกระแสอิเล็กตรอนศักย์ของพลาสมา

กราฟในรูปที่ 3.9 นี้ได้มาจากพลาสมาของแก๊สอาร์กอน ค่าของกระแสที่ได้เป็นผลรวมของกระแสไอออนและกระแสอิเล็กตรอน เมื่อหักค่ากระแสไอออนอิมิต์วออกไปจากกระแสรวมโดยการสร้างสมการเส้นตรงแทนกระแสไอออนอิมิต์ว จะได้กราฟลักษณะส่อกระแสอิเล็กตรอนศักย์ ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจากสมการที่ 2.31 อุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์กับความชันของลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนและศักย์ในช่วงการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.11 กราฟระหว่างลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนกับศักย์

รูปที่ 3.11 แสดงการกระทำลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอน เพื่อจะหาความชันในช่วงการเปลี่ยนแปลง ซึ่งความชันระหว่างลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนกับศักย์ในช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ได้ นี้เป็นค่าส่วนกลับของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.31 นั่นเอง จากกราฟตัวอย่างนี้ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่คำนวณได้คือ 2.2 eV เมื่อทราบอุณหภูมิของอิเล็กตรอนแล้วสามารถนำค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนนี้ไปคำนวณหาความหนาแน่นของพลาสมาได้อีก ตามสมการที่ 2.33