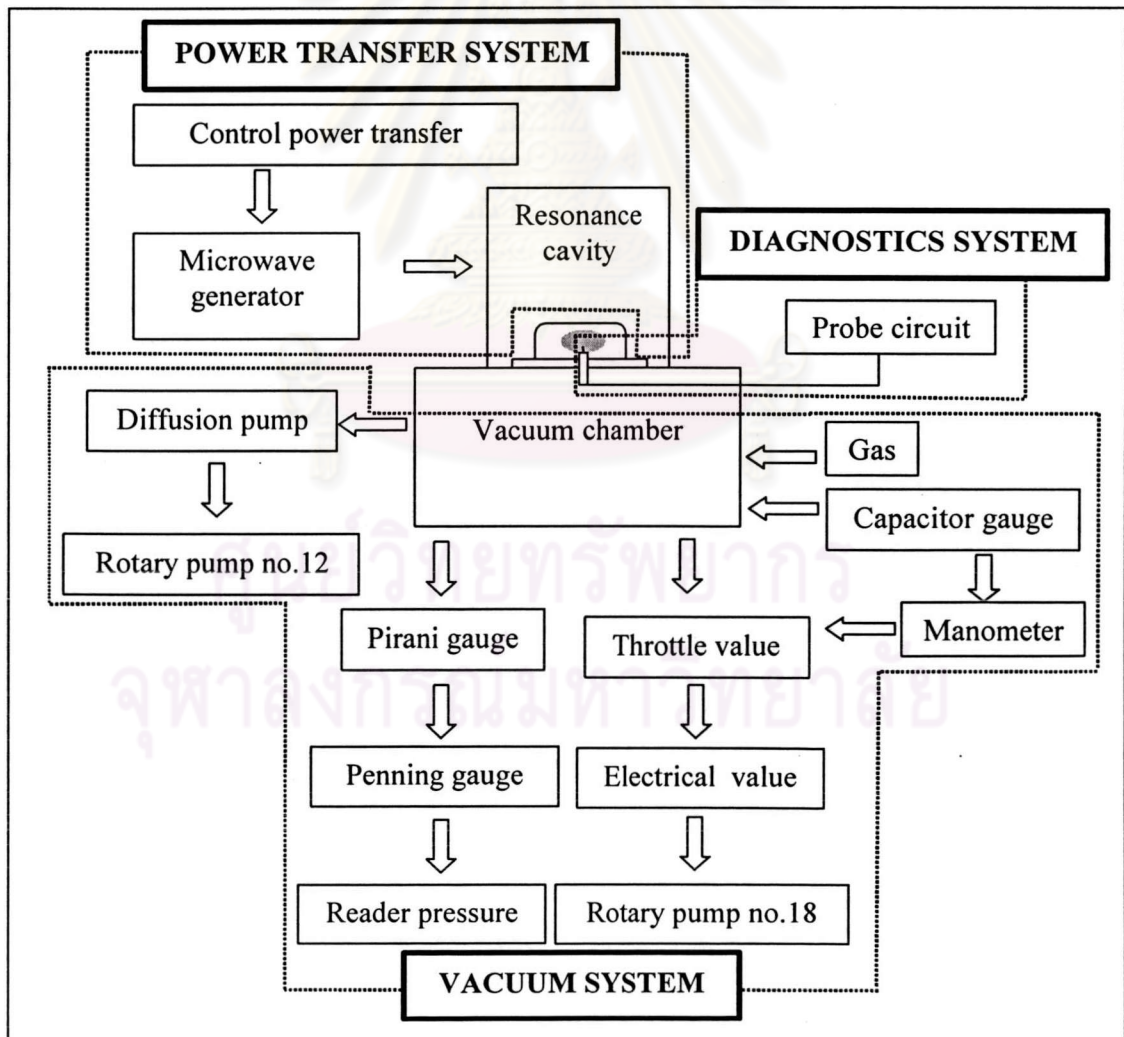


บทที่ 3

การออกแบบและสร้างระบบไมโครเวฟพลาสมา

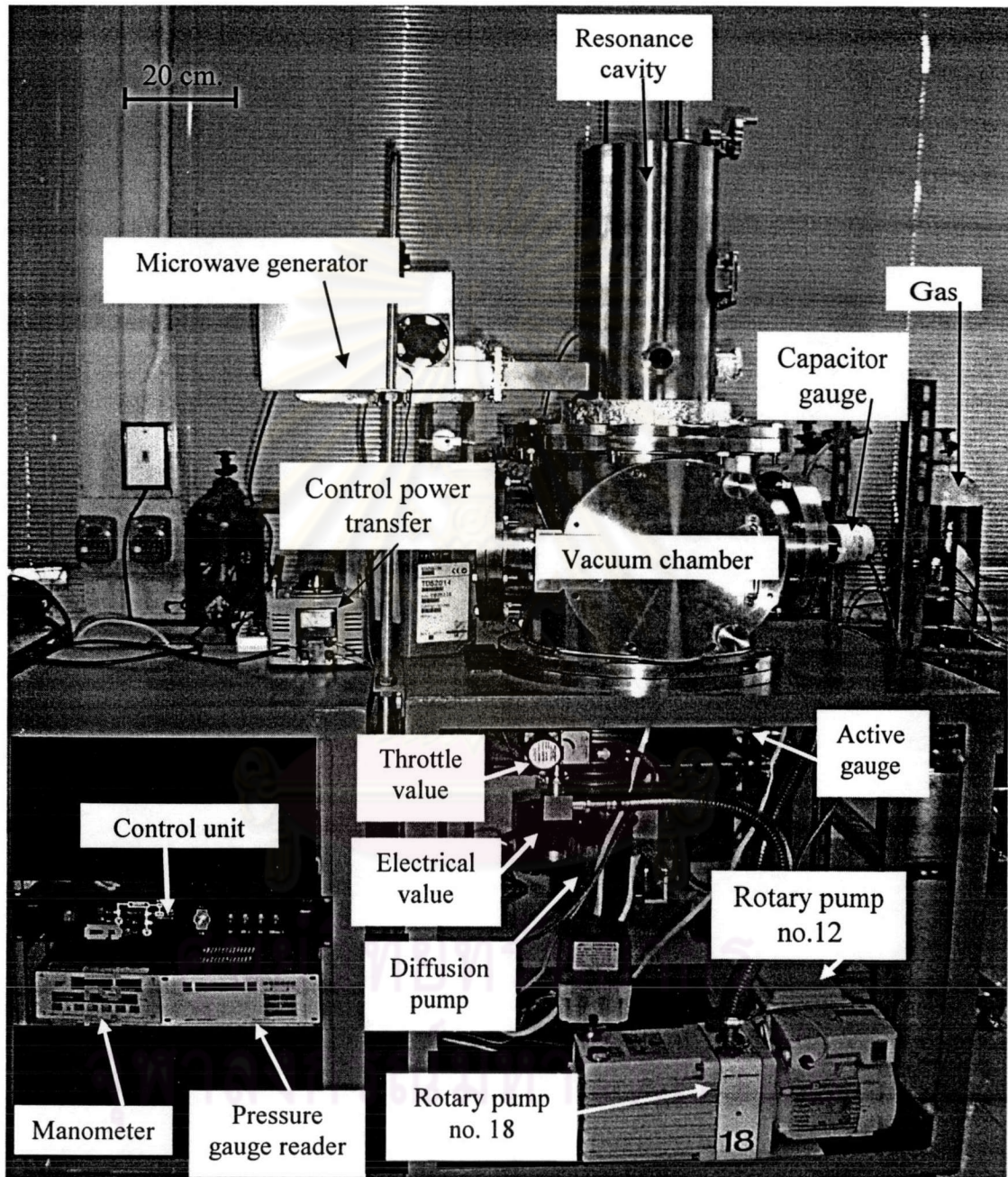
ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบไมโครเวฟพลาสมา ส่วนประกอบต่างๆ และการทำงานของส่วนต่างๆ ของระบบ โดยระบบไมโครเวฟที่สร้างขึ้นในการวิจัยออกแบบให้มีส่วนประกอบต่างๆ ที่ทำงานร่วมกัน ดังต่อไปนี้

1. ระบบสุญญากาศ (vacuum system)
2. ระบบการถ่ายโอนกำลังคลื่นไมโครเวฟ (microwave power transfer system)
3. ระบบวัดสมบัติของไมโครเวฟพลาสมา (diagnostic system)



รูปที่ 3.1 แผนผังเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดโพรงเรโซแนนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

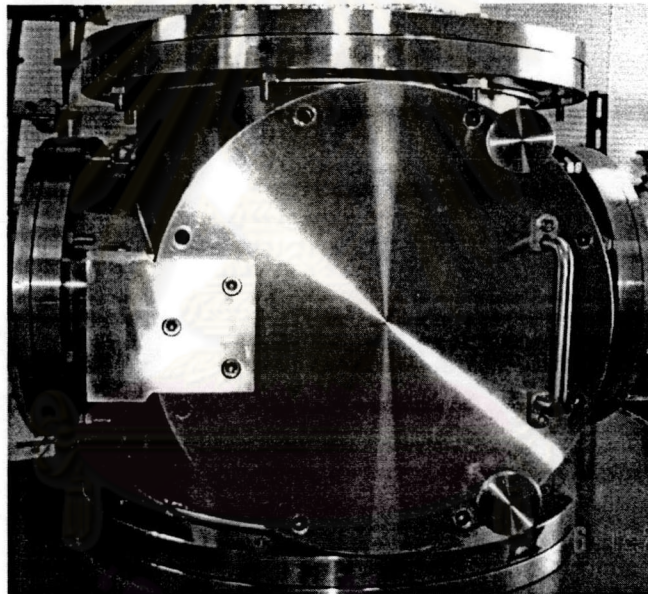
แผนผังเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดโพรงเรโซแนนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และภาพถ่ายของเครื่องจะแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดโพรงเรโซแนนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

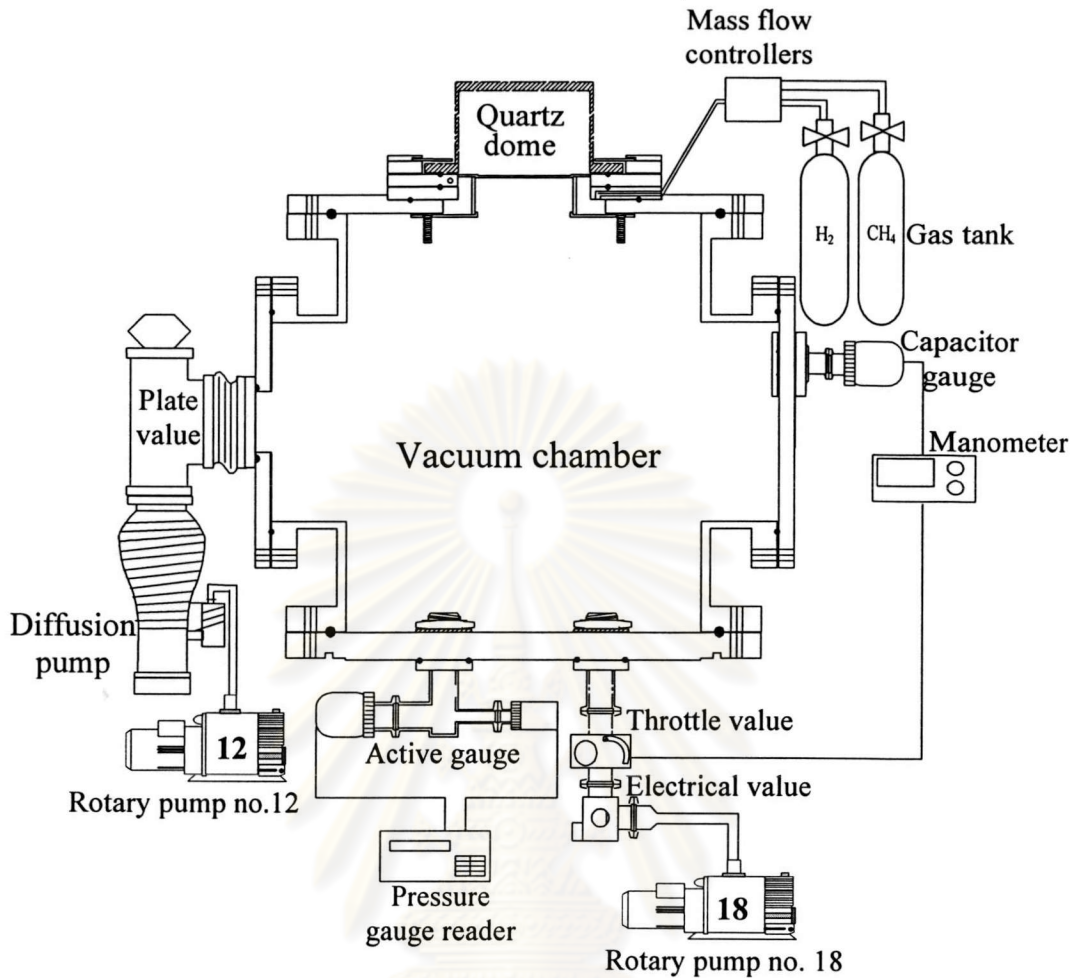
3.1 ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)

การกำเนิดพลาสมาจำเป็นต้องมีระบบสุญญากาศ เพราะในการทดลองต้องการควบคุมปริมาณการไหลของก๊าซ และต้องการความบริสุทธิ์ของก๊าซ ดังนั้นการสร้างสภาวะสุญญากาศที่เหมาะสมจึงเป็นส่วนสำคัญในการทำให้เกิดพลาสมาตามต้องการ ในงานวิจัยนี้ระบบสุญญากาศจะประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) ดังรูปที่ 3.3 เครื่องสูบล้อตารี (rotary pump) เครื่องสูบบางแพร่ไอ (diffusion pump) ท่อสามทาง (three way tube) ควอตซ์โดม (quartz dome) คาปาซิเตอร์เกจ (capacitor gauge) พิรานีเกจ (pirani gauge) เฟินนิงเกจ (penning gauge) แมนอมิเตอร์ (manometer) วาล์วปีกผีเสื้อ (throttle valve) และวาล์วไฟฟ้า (electrical valve) ซึ่งจะมีแผนผังระบบสุญญากาศ แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายภาชนะสุญญากาศ

ภาชนะสุญญากาศเป็นภาชนะบรรจุก๊าซที่ต้องการให้เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ภาชนะสุญญากาศที่ทำจากสแตนเลส เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง แข็งแรงทนทานต่อการกัดกร่อน เชื้อต่อปฏิกิริยาเคมี และไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศทำให้ไม่เกิดสนิม เพราะถ้ามีสนิมจะทำให้ระบบสกปรกได้

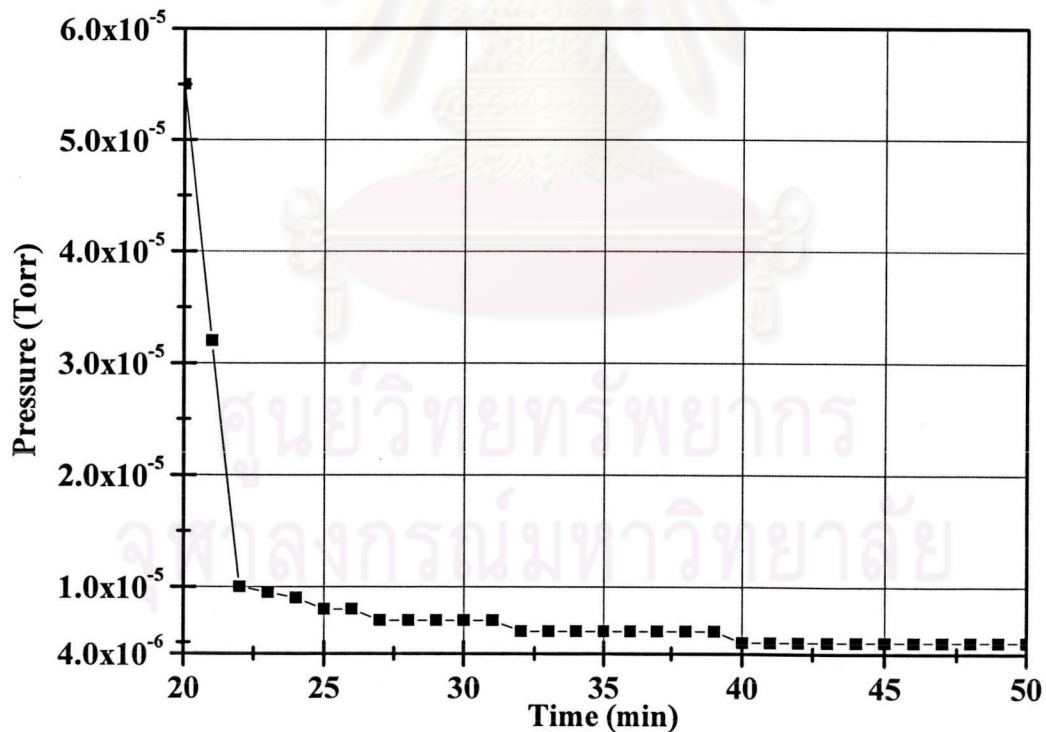


รูปที่ 3.4 ระบบสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบภาชนะสุญญากาศมีรูปทรงเป็นทรงกระบอก (cylinder shape) โดยมีด้านหน้าออกแบบเป็นประตูสำหรับนำชิ้นงานเข้าและออก ส่วนด้านหลังต่อกับท่อสามทางที่เป็นระบบนิวมาติก (pneumatic) ซึ่งต่อกับเครื่องสูบบแบบเพอร์ไอและเครื่องสูบโรตารี Edwards เบอร์ 12 ส่วนนี้จะใช้สำหรับสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศให้มีความดันต่ำระดับ 10^{-6} Torr เพื่อให้ก่อนทำการทดลองเหลือก๊าซในภาชนะน้อยที่สุด ทำให้ระบบไมโครเวฟพลาสมาสะอาดขึ้น ด้านข้างของภาชนะออกแบบเป็น 4 ช่องสำหรับต่ออุปกรณ์อื่นๆ โดย 1 ช่องต่อกับคาปาซิเตอร์เกจ ซึ่งเป็นตัวอ่านความดันแล้วส่งผลไปยังแมนอมิเตอร์ ให้ไปควบคุมการทำงานของวาล์วปีกผีเสื้อที่อยู่ด้านล่างของภาชนะ ซึ่งติดอยู่กับวาล์วไฟฟ้า และเครื่องสูบโรตารี Edwards เบอร์ 18 ส่วนนี้ไว้สำหรับใช้ในงานที่มีความดันสูง และด้านล่างของภาชนะอีกช่องต่อกับข้อต่อ 3 ทางไว้ติดตั้งแอ็กทิฟเกจ (active gauge) ได้แก่ พีรานีเกจ และเพ็นนิงเกจ เพื่อให้สามารถวัดค่าความดันตั้งแต่ค่าความดันบรรยากาศ ถึง 10^{-3} Torr และ 10^{-3} ถึง 10^{-6} Torr ตามลำดับ สำหรับส่วนบนของภาชนะสุญญากาศ

ได้ออกแบบมาเป็นแผ่นสแตนเลสซึ่งมีช่องสำหรับใส่ก๊าซที่ต้องการใช้งาน และมีช่องรองรับควอตซ์ โคม ควอตซ์โคมมีลักษณะเป็น โคมใสคล้ายแก้ว มีสมบัติพิเศษ คือ ยอมให้สนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็กผ่านเข้าออกได้ จึงเลือกใช้ควอตซ์โคมเป็นตัวกั้นระหว่างระบบสุญญากาศกับระบบ ถ่ายโอนกำลังคลื่น เพราะระบบถ่ายโอนกำลังคลื่นยังคงสามารถถ่ายโอนกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ให้แก่ก๊าซที่อยู่ภายในภาชนะสุญญากาศได้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ควอตซ์โคมที่มีขนาดรัศมี 9.75 cm. กั้นระหว่างภาชนะสุญญากาศกับ โพรเกร โซแนนซ์ ในระบบสุญญากาศนี้ทุกหน้าแปลนของภาชนะ สุญญากาศจะป้องกันการรั่วซึมโดยใส่ยาง โอริง (O-ring)

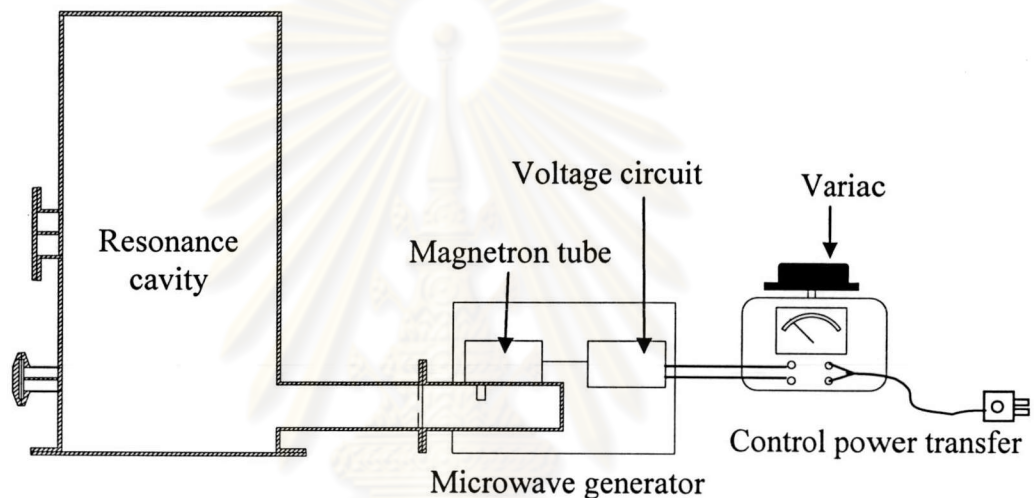
ระบบสุญญากาศที่ทำการสร้างขึ้น ได้นำมาทดสอบหาค่าความดันสุดท้ายของระบบ โดย วิธีการวัดความดันสุดท้ายของระบบจะวัดค่าความดันที่ต่ำที่สุดที่ระบบสามารถทำได้ จากการสูบ อากาศออกจากภาชนะสุญญากาศด้วยเครื่องสูบ โรตารี Edwards เบอร์ 12 และเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ ซึ่งผลจะได้ค่าความดันสุดท้ายของระบบจากการทดลองเท่ากับ 5.50×10^{-6} Torr ดังแสดงในรูปที่ 3.5 กราฟความดันสุดท้ายของระบบ



รูปที่ 3.5 กราฟความดันสุดท้ายของระบบ

3.2 ระบบการถ่ายโอนกำลังคลื่นไมโครเวฟ (microwave power transfer system)

ระบบการถ่ายโอนกำลังคลื่นไมโครเวฟเป็นส่วนสำคัญในการจ่ายพลังงานเพื่อให้กำเนิดพลาสมาที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการพลาสมาที่มีขนาดความหนาแน่นของพลาสมาและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างระบบการถ่ายโอนกำลังคลื่นไมโครเวฟซึ่งประกอบด้วย ส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (microwave generator) ส่วนควบคุมการถ่ายโอนกำลังคลื่น (control power transfer) และส่วนโพรงเรโซแนนซ์ (resonance cavity) แสดงดังรูปที่ 3.6



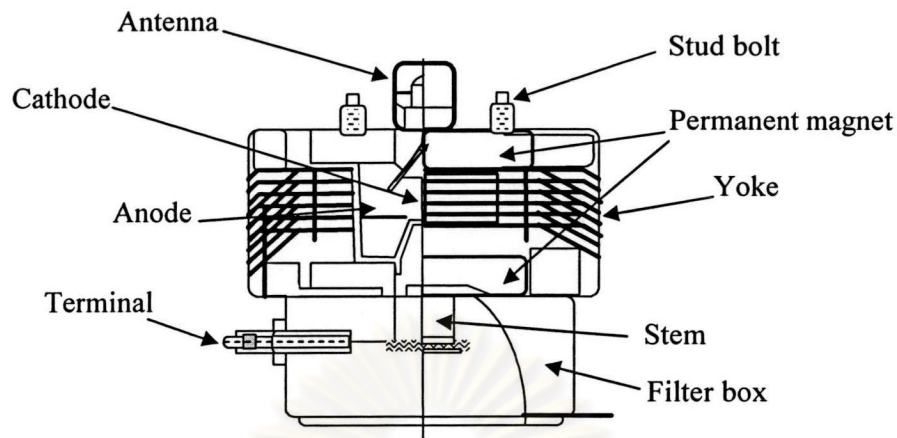
รูปที่ 3.6 ระบบการถ่ายโอนกำลังคลื่นไมโครเวฟ

3.2.1 ส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

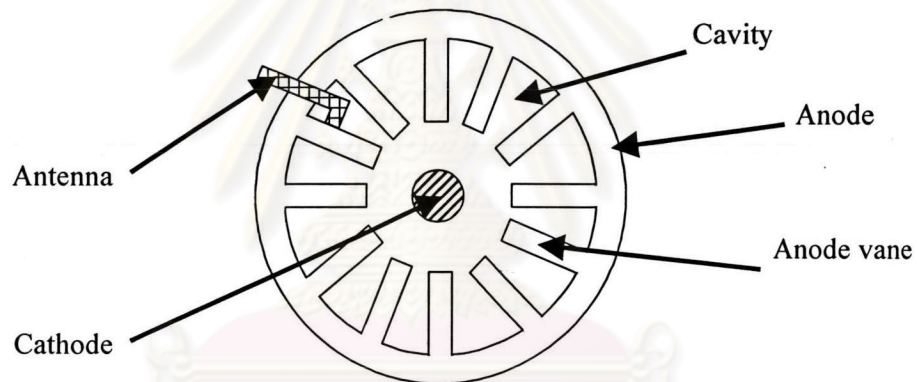
ส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเป็นส่วนจ่ายพลังงานเพื่อให้กำเนิดพลาสมาประกอบด้วย หลอดแม็กนีตรอน (magnetron tube) และวงจรจ่ายแรงดันไฟ (voltage circuit) [30]

3.2.1.1 หลอดแม็กนีตรอน

หลอดแม็กนีตรอนมีลักษณะโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 3.7 และ โครงสร้างภายในของ หลอดแม็กนีตรอนแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ลักษณะทั่วไปของหลอดแม็กนีตรอน [30]

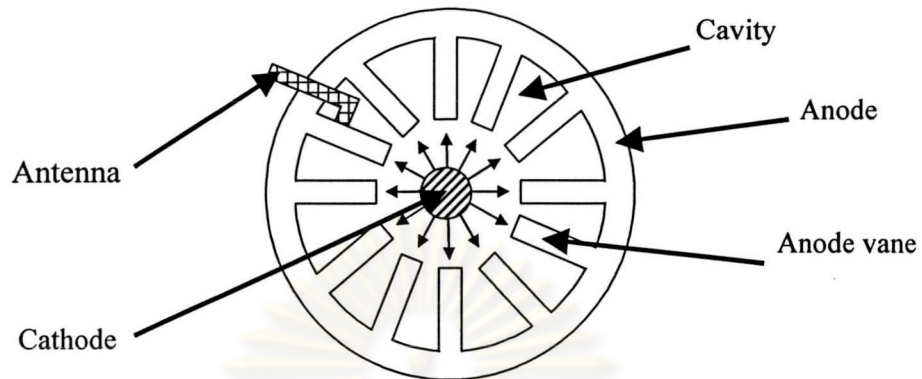


รูปที่ 3.8 โครงสร้างภายในของหลอดแม็กนีตรอน [30]

จากรูปที่ 3.8 ภายในหลอดแม็กนีตรอนประกอบด้วยขั้วแอโนด (anode) มีลักษณะเป็นวงแหวนและมีแผ่นโลหะที่เรียกว่า แอโนดเวน (anode vane) ติดอยู่และแกนของแอโนดเวนมีทิศพุ่งเข้าหาขั้วแคโทด (cathode) ซึ่งเป็นไส้หลอด (filament or heater) ที่อยู่ตรงกลางของหลอดแม็กนีตรอน ช่องว่างที่อยู่ระหว่างแอโนดเวนนี้เรียกว่า โพรง (cavity) ภายในของหลอดแม็กนีตรอนนี้จะเป็นสุญญากาศและจะมีสายอากาศ (antenna) ต่อจากแอโนดเวนออกสู่ภายนอก ซึ่งทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นออกสู่ภายนอก

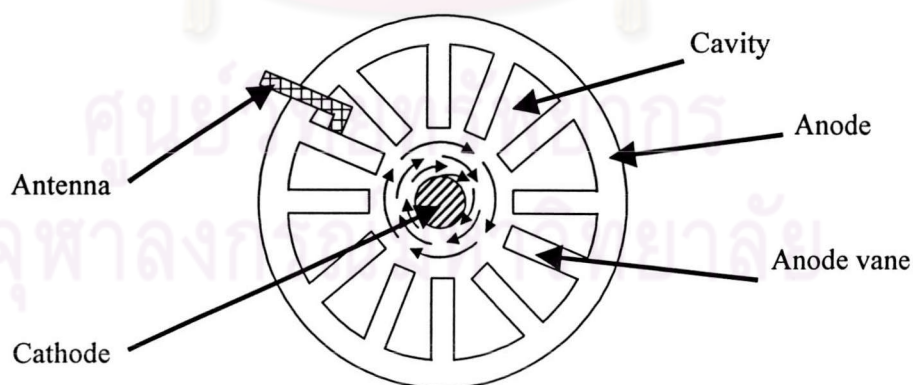
หลักการทำงานของแม็กนีตรอน เริ่มจากเมื่อไส้หลอดได้รับไฟกระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3 โวลต์ ถึง 4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ ไส้หลอดหรือขั้วแคโทดร้อนขึ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วแคโทด และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ขั้วแคโทดหรือไส้หลอดของหลอด

แม่กนีตรอน อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกจากขั้วแคโทด และถูกดูดเข้ามายังขั้วแอโนด ตามแนวรัศมี (ทิศตามลูกศร) ดังรูปที่ 3.9



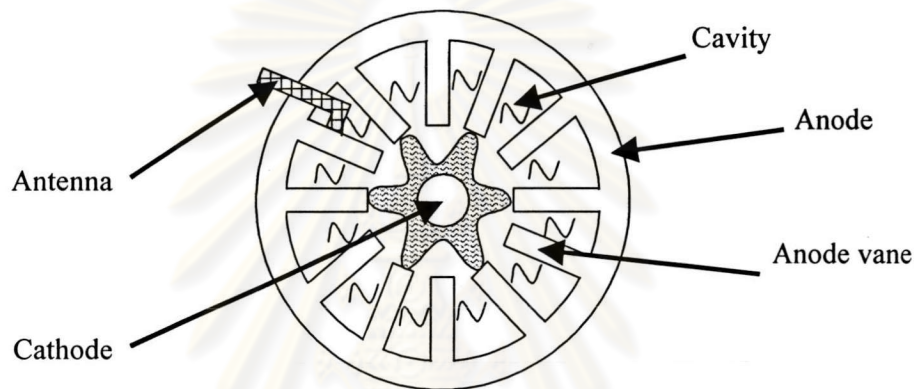
รูปที่ 3.9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในหลอดแม่กนีตรอนเมื่อจ่ายไฟแรงดันสูง [30]

จากรูปที่ 3.7 หลอดแม่กนีตรอนจะมีแท่งแม่เหล็กขั้วตรงข้ามกัน 2 อัน เป็นรูปกลมแบน วางที่ด้านบนและด้านล่างร่วมแกนกับ โครงสร้างภายในของหลอดแม่กนีตรอน ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไฟแก่ขั้วแคโทด ทำให้อิเล็กตรอนซึ่งปกติวิ่งเป็นเส้นตรงจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด เกิดการวิ่งเบี่ยงเบนไปในทิศทางขวา ตามกฎของลอเรนซ์ (Lorentz) $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ และในที่สุดอิเล็กตรอนก็จะวิ่งไปถึงแอโนด การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในหลอดแม่กนีตรอน เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในหลอดแม่กนีตรอน เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร [30]

การหมุนของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวรจะทำให้เกิดกระแสสลับขึ้นภายในโพรง (cavity) เนื่องจากอิเล็กตรอนจะเหินยวนำประจุบวกจากแอโนดเวทที่มันวิ่งผ่าน และประจุบวกบนแอโนดเวทจะลดลงเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านไปยังแอโนดเวทถัดไป ในขณะที่เดียวกันแอโนดเวทถัดไปนี้จะถูกเหินยวนำให้มีประจุบวกเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดกระแสสลับขึ้นภายในหลอดแม็กนีตรอนตามรูปที่ 3.11 ปกติในการทำงานของหลอดแม็กนีตรอนจะมีอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมากมายเกิดเป็นกลุ่มอิเล็กตรอน (electron crowd) ซึ่งส่งผลให้เกิดการกำเนิดคลื่นไมโครเวฟออกมา



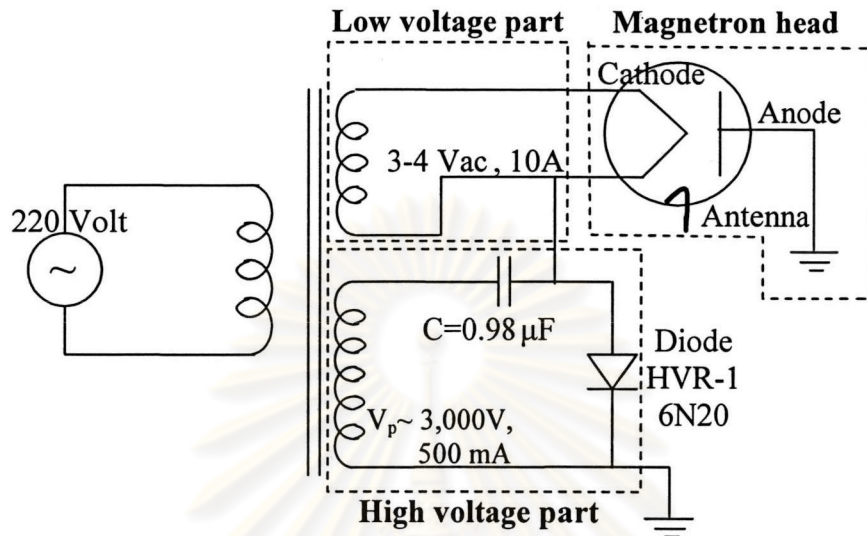
รูปที่ 3.11 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เหินยวนำให้เกิดกระแสสลับภายในหลอดแม็กนีตรอน [30]

3.2.1.2 วงจรจ่ายแรงดันไฟ

วงจรจ่ายแรงดันไฟ ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟให้หลอดแม็กนีตรอน ประกอบด้วยส่วนจ่ายไฟแรงดันต่ำ และส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ดังรูปที่ 3.12 ส่วนจ่ายไฟแรงดันต่ำจะทำหน้าที่จ่ายไฟแรงดันต่ำประมาณ 3 โวลต์ ถึง 4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ ให้กับขั้วแคโทดหรือไส้หลอดในหลอดแม็กนีตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วแคโทด และส่วนจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจะทำหน้าที่จ่ายไฟแรงดันสูงให้กับหลอดแม็กนีตรอน ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วแคโทดถูกเร่งให้วิ่งไปยังแอโนด ซึ่งหากส่วนจ่ายไฟแรงสูงจ่ายไฟแรงสูงที่มีค่ามากพอก็จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟออกมาได้

วงจรจ่ายแรงดันไฟแรงสูง ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟแรงดันสูงขาขึ้น (high voltage step up transformer) ไดโอดไฟแรงสูง (high voltage diode) และตัวเก็บประจุไฟแรงสูง (high voltage condenser) ซึ่งต่อกันในลักษณะวงจรทวีแรงดันแบบครึ่งคลื่น (half cycle doubler

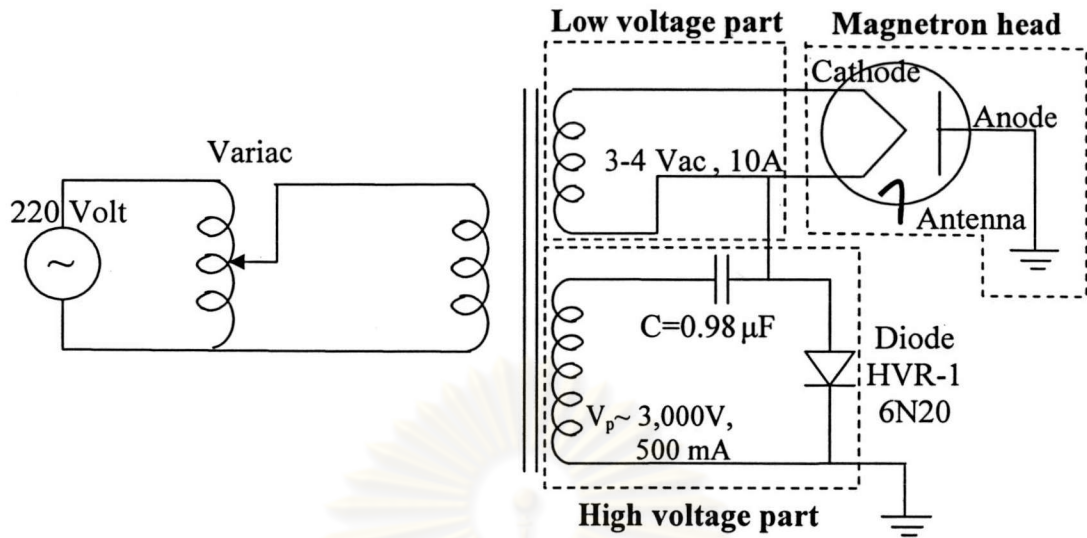
circuit) โดยแรงดันด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ และมีแรงดันด้านทุติยภูมิ (V_{peak}) ประมาณ 3,000 โวลต์



รูปที่ 3.12 วงจรทีวีแรงดันแบบครึ่งคลื่น

3.2.2 ส่วนควบคุมการถ่ายโอนกำลังคลื่น

ส่วนควบคุมกำลังคลื่นมีหน้าที่ควบคุมขนาดของกำลังคลื่นให้ตรงกับความต้องการใช้งาน เนื่องจากกำลังคลื่นขนาดต่างกันจะทำให้เกิดพลาสมาที่มีขนาดความหนาแน่นของพลาสมาและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน การควบคุมกำลังคลื่นจะทำโดยควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอน เพราะแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนจะมีผลทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกเร่งได้รับพลังงานในการที่จะกำเนิดคลื่นไมโครเวฟกำลังแตกต่างกัน การควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอน จะทำโดยการควบคุมแรงดันในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูงให้สามารถปรับค่าได้ การที่จะทำให้อุปกรณ์จ่ายไฟแรงดันสูงมีค่าปรับได้นั้น จะทำได้โดยใช้ตัวปรับแรงดัน (variac) ควบคุมแรงดันของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ ดังนั้นการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนจะทำโดยควบคุมแรงดันของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิด้วยตัวปรับแรงดัน (variac) วงจรจ่ายแรงดันไฟที่ควบคุมแรงดันด้านปฐมภูมิจะแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรควบคุมการถ่ายโอนกำลังคลื่นไมโครเวฟ

3.2.3 ส่วนโพรงเรโซแนนซ์

โพรงเรโซแนนซ์เป็นส่วนสำคัญเพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานได้สูงสุด การออกแบบโพรงเรโซแนนซ์จะพิจารณาจากสมการการเกิดเรโซแนนซ์ในโพรงเรโซแนนซ์ทรงกระบอก ตามสมการที่ 2.25 จะเห็นว่า การออกแบบโพรงเรโซแนนซ์ควรเริ่มจากการเลือกโหมดที่ใช้งานว่ามีโหมดใดบ้าง และทำการกำหนดครีสมิของโพรงเรโซแนนซ์ที่เหมาะสม ก็จะทำให้สามารถปรับเปลี่ยนความยาวของโพรงเรโซแนนซ์ให้สอดคล้องกับโหมดต่างๆ ของการเกิดเรโซแนนซ์ภายในโพรงเรโซแนนซ์ได้

ในการออกแบบโพรงเรโซแนนซ์ต้องพิจารณาโหมดที่ต้องการนำไปใช้งานว่ามีโหมดใดบ้าง เพราะแต่ละโหมดในการส่งผ่านพลังงาน จะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโพรงแตกต่างกัน และมีผลต่อกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมีแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างให้มีการส่งผ่านพลังงานในโหมด (mode) TM ของคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz เข้าสู่โพรงเรโซแนนซ์ ที่ทำจากสแตนเลสทรงกระบอก โพรงมีขนาดครีสมิ 10.5 cm. ความยาวของโพรงจะออกแบบมาให้รองรับการปรับความยาวถึง 45 cm. สาเหตุที่สร้างโพรงเรโซแนนซ์เป็นทรงกระบอก เนื่องจากสามารถทำการปรับค่าความยาวเพื่อเปลี่ยนค่าความถี่เรโซแนนซ์ได้ง่ายกว่ารูปทรงอื่น การปรับขนาดความยาวของโพรงเรโซแนนซ์จะออกแบบให้มีแผ่นโลหะที่สามารถปรับขึ้น-ลงตามความยาวของโพรงเรโซแนนซ์ โดยแผ่นโลหะนี้จะควบคุมด้วยระบบเฟืองที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายโพรงเรโซแนนซ์ด้านบน

จากการคำนวณความยาวโพรงเรโซแนนซ์ ที่เกิดการเรโซแนนซ์ในโหมด TM ต่างๆ ของคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz เมื่อโพรงเรโซแนนซ์มีรัศมี 10.5 cm. ตามสมการที่ 2.25 จะเห็นว่าโพรงเรโซแนนซ์ที่ออกแบบจะสามารถปรับความยาวโพรงให้ตรงกับโหมด TM ต่างๆ ที่ความยาวโพรงดังตารางที่ 3.1

โหมด	TM ₀₁₂	TM ₀₁₃	TM ₀₁₄	TM ₁₁₂	TM ₁₁₃
ความยาวโพรง (cm.)	13.68	20.53	27.36	17.41	26.12

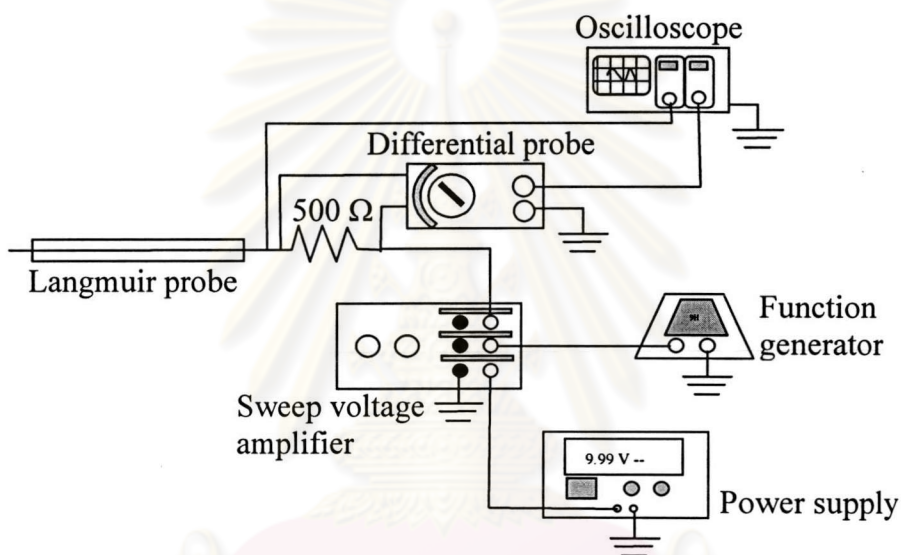
ตารางที่ 3.1 ความยาวโพรงที่เกิดการเรโซแนนซ์ในโหมด TM ต่างๆ ของคลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 GHz เมื่อโพรงเรโซแนนซ์มีรัศมี 10.5 cm.

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างโพรงเรโซแนนซ์ให้มีการส่งผ่านพลังงานให้เกิดการเรโซแนนซ์ของคลื่นไมโครเวฟในโหมด TM เพราะโหมดที่ต้องการใช้งานเป็นโหมด TM₀₁₃ โดยโหมดดังกล่าวเป็นโหมดที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตำแหน่งที่ต้องการใช้งานอยู่สูงและเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการปลูกฟิล์มบาง

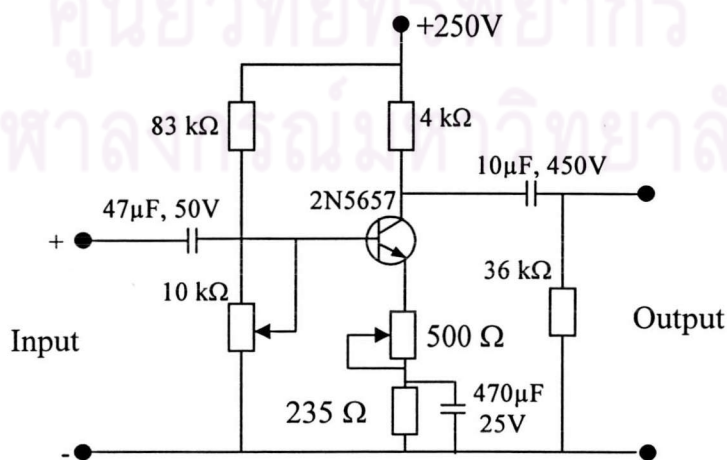
การติดตั้งหลอดแมกนีตรอนให้มีการส่งผ่านพลังงานในโหมด TM จะทำโดยติดตั้งหลอดแมกนีตรอนเข้ากับโพรงเรโซแนนซ์ โดยให้สายอากาศ (antenna) ของหลอดแมกนีตรอนที่ใส่เข้าไปในโพรงเรโซแนนซ์วางตัวอยู่ในตำแหน่งที่มีการแผ่สนามแม่เหล็กในแนวแกน Z เท่ากับศูนย์ ซึ่งการติดตั้งสายอากาศแบบนี้จะไม่สามารถทำให้เกิดโหมด TE ได้ เพราะไม่สามารถทำให้สนามไฟฟ้าในแนวแกน Z เท่ากับศูนย์ได้ ยกเว้นแต่ทำการติดตั้งวางสายอากาศใหม่ และให้สายอากาศแผ่สนามไฟฟ้าในแนวแกน Z เท่ากับศูนย์เท่านั้น นอกจากนี้การติดตั้งดังกล่าวก็ไม่สามารถทำให้เกิดการส่งผ่านในโหมด TEM ได้เช่นกัน เพราะการเกิดโหมด TEM จะเกิดได้แต่ในสายคู่ขนานหรือสายโคแอกเซียล (coaxial) เท่านั้น

3.3 ระบบการวัดสมบัติของไมโครเวฟพลาสมา (diagnostic system)

การให้กำเนิดพลาสมา สมบัติของพลาสมาที่ต้องพิจารณาคือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของพลาสมา ซึ่งในการที่จะทราบสมบัติของพลาสมาจะต้องใช้เครื่องมือในการวัด ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หัววัดลงมัวร์มาวิเคราะห์หาค่าสมบัติของพลาสมา ระบบหัววัดลงมัวร์จะประกอบด้วยหัววัด และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำหรับหัววัด ซึ่งจะทำงานร่วมกัน โดยมีแผงผังของระบบหัววัดลงมัวร์ [29] แสดงในรูปที่ 3.14 โดยวงจร Sweep voltage amplifier ของรูปที่ 3.14 จะแสดงในรูปที่ 3.15 และรายละเอียดในแต่ละส่วนจะมีดังนี้



รูปที่ 3.14 ระบบหัววัดลงมัวร์



รูปที่ 3.15 วงจร Sweep voltage amplifier

3.3.1 หัววัดลางมัวร์ (Langmuir probe)

หัววัดลางมัวร์เป็นลวดโลหะที่สอดเข้าไปในพลาสมา เวลาใช้งานจะนำจนวนมาห่อหุ้มหัววัด เพื่อป้องกันการสัมผัสกันระหว่างหัววัดกับภาชนะสุญญากาศที่เป็นสายดิน วัสดุที่ใช้นำมาเป็นจนวนได้แก่ แก้วไพเรกซ์ (pyrex) หรือควอตซ์ เป็นต้น เวลาใช้งานถ้าการวัดมีการกระเพื่อม (fluctuation) และมีการสั่น (oscillation) ของสัญญาณรบกวนอยู่สูง จำเป็นต้องมีการกำบังสัญญาณรบกวนโดยใช้ท่อโลหะที่ต่อสายดินห่อหุ้มหัววัดไว้อีกชั้น เมื่อมีสัญญาณรบกวนขึ้น สัญญาณรบกวนจะถูกชักนำให้ลงสู่สายดินผ่านท่อโลหะที่ห่อหุ้มภายนอกหัววัด ซึ่งการนำท่อโลหะที่ต่อสายดินมาห่อหุ้มหัววัดนี้ เรียกว่า การกำบังหัววัด (probe shielding) [26]

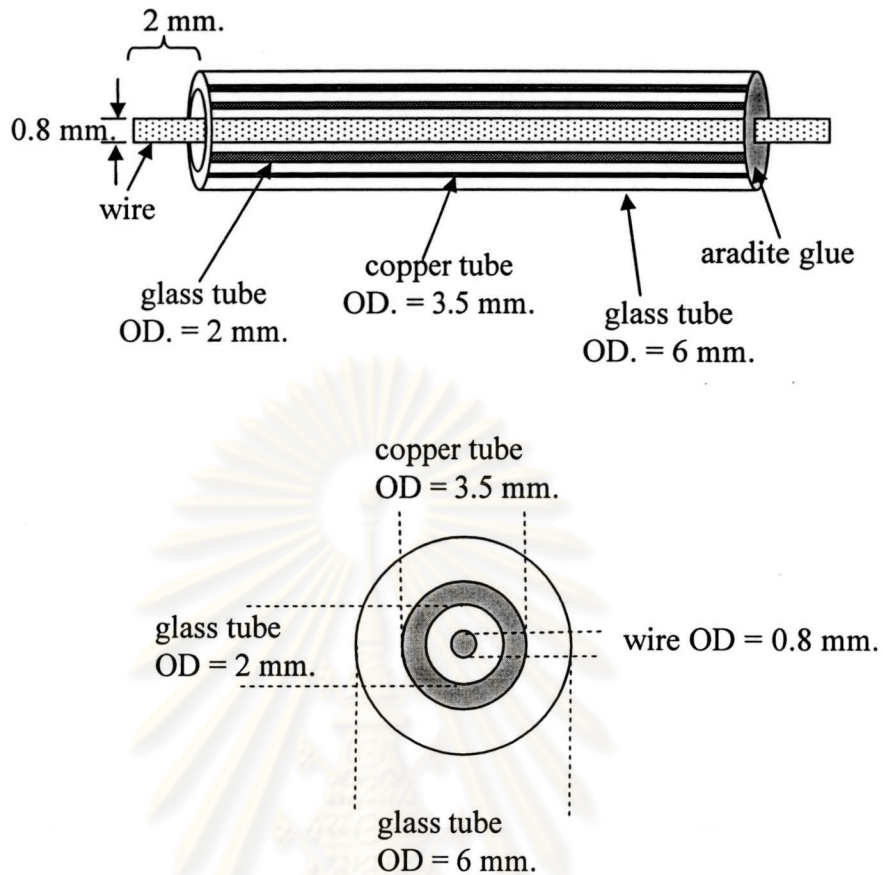
การเลือกขนาดหัววัดลางมัวร์ จากในหัวข้อ 2.3 จะเห็นว่าการใช้หัววัดที่มีขนาดรัศมีมากกว่าระยะเดอบายของพลาสมา จะลดการรบกวนที่จะเกิดขึ้นในพลาสมา และจะทำให้ขนาดของซีทที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของหัววัด ดังนั้นจึงประมาณว่าพื้นผิวที่สัมผัสพลาสมาเป็นพื้นผิวของหัววัดได้ ดังนั้นระยะเดอบาย ในสมการที่ 2.3 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\lambda_D = 69 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (3.1)$$

เมื่อ T_e เป็นอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา ในหน่วยเคลวิน (K)

n_e เป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ในหน่วยต่อลูกบาศก์เมตร (m^{-3})

สำหรับพลาสมาไมโครเวฟเช่น ในเอกสารงานวิจัยของ Rousseau [10] ได้วัดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ 2×10^{16} ถึง $6 \times 10^{17} m^{-3}$ และอุณหภูมิลูกบาศก์เมตรมีค่าประมาณ 2 ถึง 7 eV ทำให้ระยะเดอบายจะมีค่าประมาณ 0.01 ถึง 0.13 mm. ดังนั้นหัววัดควรมีขนาดมากกว่า 0.13 mm. ในงานวิจัยได้ใช้หัววัดลางมัวร์เป็นลวดโลหะทำจากโลหะผสมนิกเกิลมีขนาดรัศมีหัววัดลางมัวร์ 0.8 mm. และได้นำมาห่อหุ้มด้วยจนวนเป็นท่อแก้วทนความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm. โดยให้หัววัดลางมัวร์ที่อยู่จนวนประมาณ 2 mm. เพื่อให้เป็นส่วนสัมผัสพลาสมา ซึ่งจะมีขนาดพื้นที่สัมผัสพลาสมาเท่ากับ $5.53 mm^2$ และมีการกำบังสัญญาณรบกวนโดยนำท่อทองแดงกลวงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 mm. ที่ต่อสายดินห่อหุ้มหัววัดลางมัวร์ และมีแก้วทนความร้อนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm. ห่อหุ้มท่อทองแดงอยู่อีกชั้น และมีการติดกาวอะราลด์ (araldite glue) เพื่อไม่ให้อากาศภายในภาชนะสุญญากาศเกิดการรั่วออกเมื่อใช้งาน ซึ่งลักษณะของหัววัดลางมัวร์แสดงดังรูปที่ 3.16



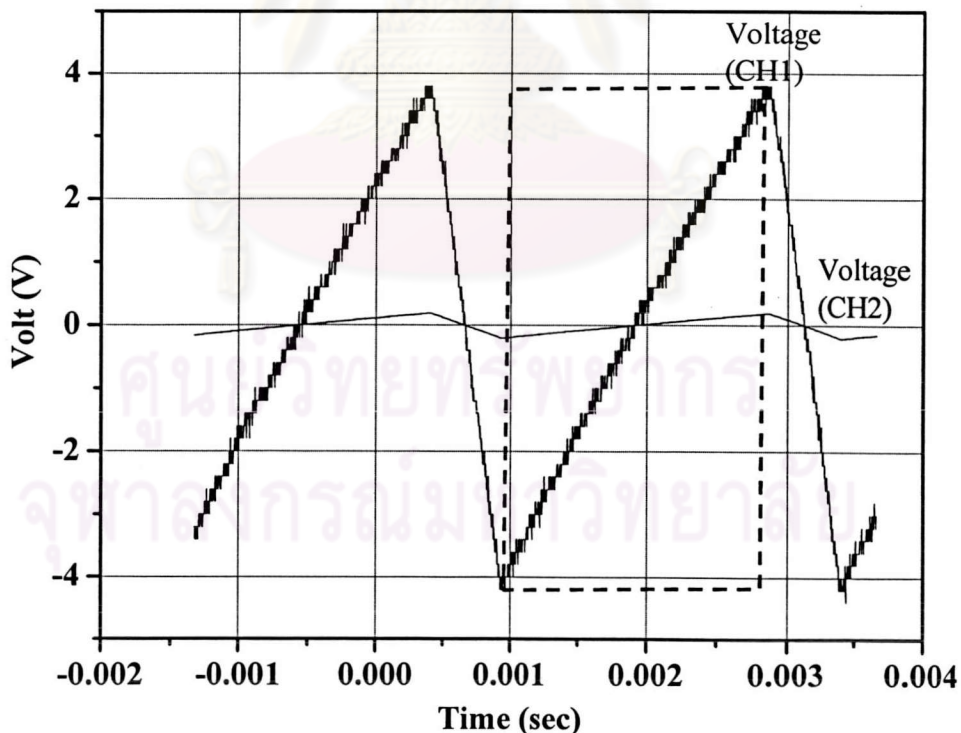
รูปที่ 3.16 ภาพตัดขวางและภาพด้านหน้าของหัววัด

3.3.2 แหล่งกำเนิดไฟสำหรับหัววัด

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำหรับหัววัดจะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) จะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเข้าไปยังชุดขยายสัญญาณ (sweep voltage amplifier) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.15 และชุดขยายสัญญาณจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณแล้วจ่ายสัญญาณที่ได้ให้แก่หัววัดที่วางอยู่ในระบบที่มีพลาสมา โดยสัญญาณที่จ่ายแก่หัววัดนี้ จะมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (triangle) สาเหตุที่เลือกการจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม เนื่องจากการจ่ายศักย์ให้แก่หัววัดทีละค่า จะสามารถวัดกระแสได้ที่ค่าเท่านั้น ทำให้เสียเวลาในการเก็บข้อมูล ดังนั้นจึงเลือกการจ่ายสัญญาณให้เป็นแบบสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นการจ่ายศักย์ที่เปลี่ยนแปลงแก่หัววัด ทำให้เกิดกระแสที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามการจ่ายศักย์ที่เปลี่ยนแปลง และสามารถเก็บข้อมูลกระแสและความต่างศักย์ได้หลายค่า ทำให้สะดวก และรวดเร็วกว่าการจ่ายศักย์ให้แก่หัววัดทีละค่า อีกทั้งการเก็บผลด้วยคอมพิวเตอร์จะทำให้สามารถนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมประยุกต์ได้

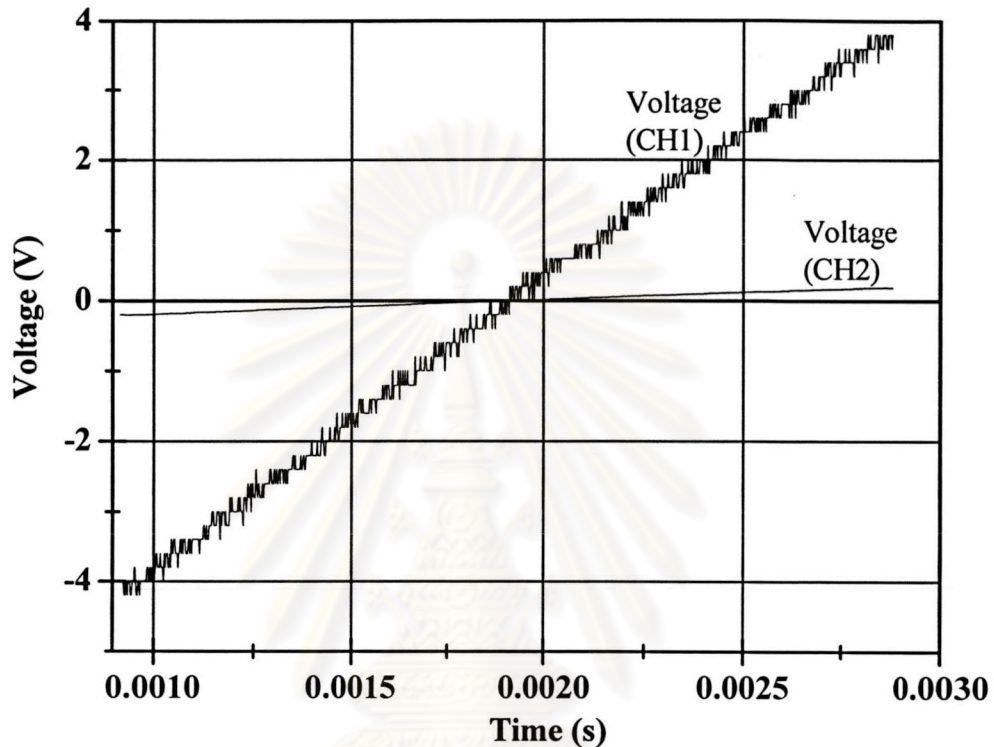
เมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายศักย์ผ่านตัวขยายสัญญาณให้แก่หัววัดที่วางอยู่ในพลาสมา จะทำการเก็บสัญญาณเข้าเครื่องออสซิลอโคป โดยช่องบันทึกผลที่ 1 (CH1) จะบันทึกค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมหัววัด และช่องบันทึกผลที่ 2 (CH2) จะบันทึกค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานขนาด 500 Ω (การใช้ความต้านทาน 500 Ω เนื่องจากในการวัดต้องการที่จะได้สัญญาณของความต่างศักย์ในช่องสัญญาณที่ 2 ให้มีค่าสูงแต่ต้องไม่ทำให้กระแสของระบบลดลงน้อย) ในการวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานนี้จะทำการวัดผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า หัววัดเปรียบเทียบ (differential probe) ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานนี้จะใช้กฎของโอห์มคำนวณกลับให้เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านพลาสมาเข้าสู่หัววัดได้ต่อไป สัญญาณที่เก็บได้จากเครื่องออสซิลอโคปจะส่งผ่านไปที่คอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Wavestar ผ่านพอร์ต RS-232 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Excel และ Origin วิเคราะห์ผลที่ได้ต่อไป

การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัด จะเริ่มจากจ่ายศักย์ที่มีแก่หัววัด ในขณะที่ไม่มีพลาสมา จะได้ผลจากสัญญาณออสซิลอโคปดังแสดงในรูปที่ 3.17



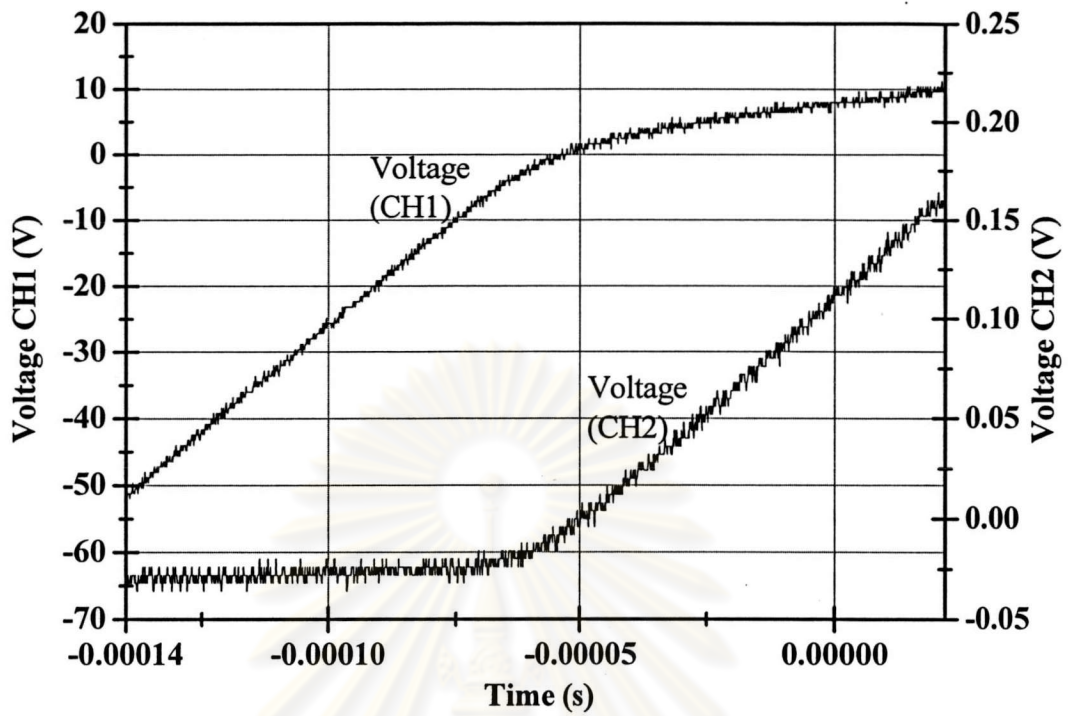
รูปที่ 3.17 สัญญาณความต่างศักย์และกระแสที่เข้าหัววัด เมื่อไม่มีพลาสมาในระบบ

ก่อนที่จะทำการทดลองจะทำการปรับขนาดของสัญญาณบนหน้าจอของเครื่องออสซิลอสโคป ให้เห็นสัญญาณบนออสซิลอสโคปเป็นสัญญาณความต่างศักย์ ช่วงการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของครึ่งคลื่น (ในกรอบสี่เหลี่ยมของรูปที่ 3.17) เพื่อที่จะสังเกตสัญญาณขาขึ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 3.18

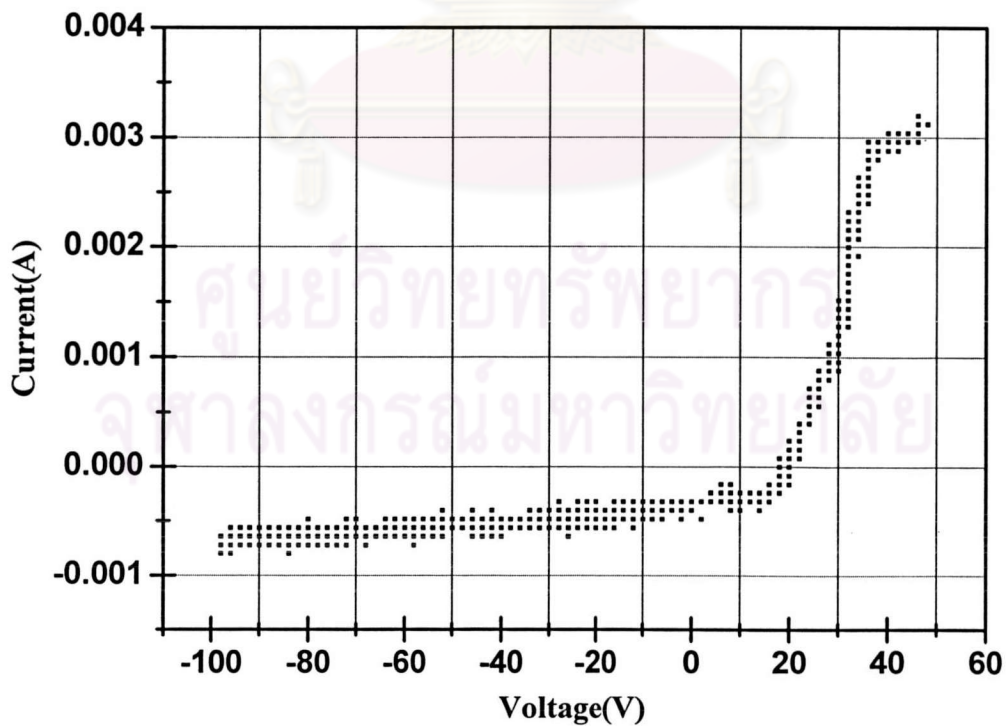


รูปที่ 3.18 สัญญาณขาขึ้นของความต่างศักย์และกระแสที่เข้าหัววัด เมื่อไม่มีพลาสมาในระบบ

เมื่อจ่ายพลังงานคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดพลาสมาแล้ว จะมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณของความต่างศักย์ (Voltage CH1) และกระแสที่หัววัด (Voltage CH2) ซึ่งสังเกตได้จากสัญญาณของกระแสและศักย์ที่เปลี่ยนแปลงได้บนหน้าจอออสซิลอสโคป โดยสัญญาณจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.19 และจากสัญญาณที่ได้นำมาคำนวณหาค่าความต่างศักย์จากสัญญาณช่องที่ 1 โดยนำมาคูณกับ 10 (เนื่องจากหัววัดความต่างศักย์ลดสัญญาณลง 10 เท่า) และคำนวณค่าของกระแสจากความต่างศักย์ช่องสัญญาณที่ 2 ที่ตกร้อมความต้านทาน 500Ω จากสมการ $I = \frac{V}{R}$ โดย V คือความต่างศักย์ที่ตกร้อมความต้านทาน และ R คือค่าความต้านทาน จากนั้นนำผลการคำนวณที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์กับกระแส โดยให้แกนตั้งเป็นค่ากระแส และแกนนอนเป็นค่าความต่างศักย์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.20

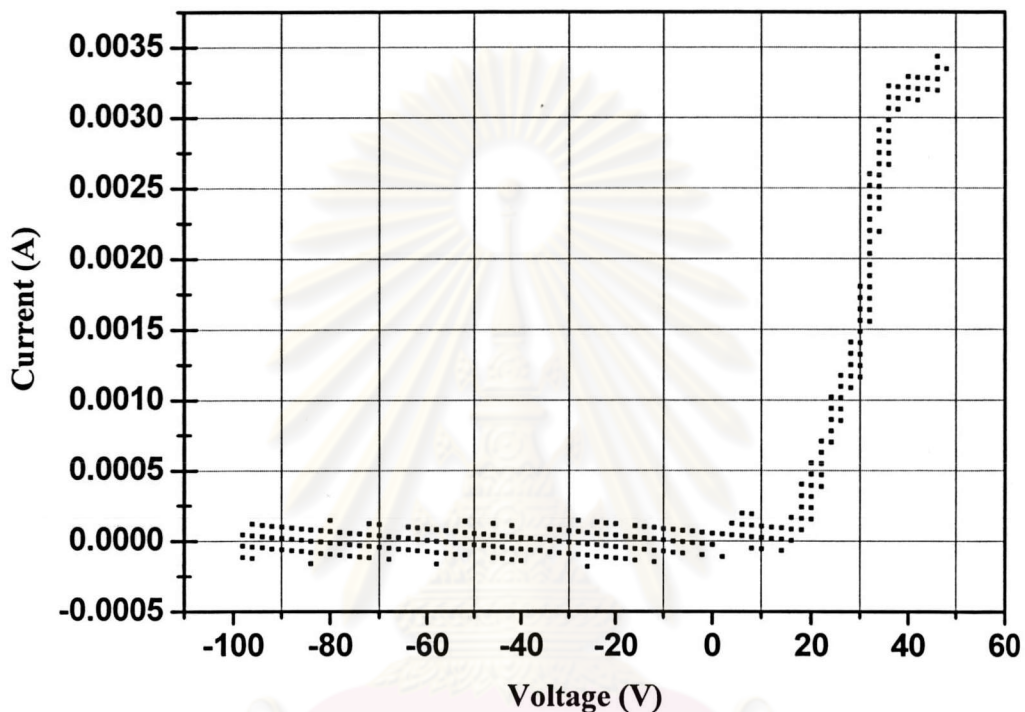


รูปที่ 3.19 สัญญาณของความต่างศักย์ และกระแสกับเวลาจากหัววัดลงมัวร์



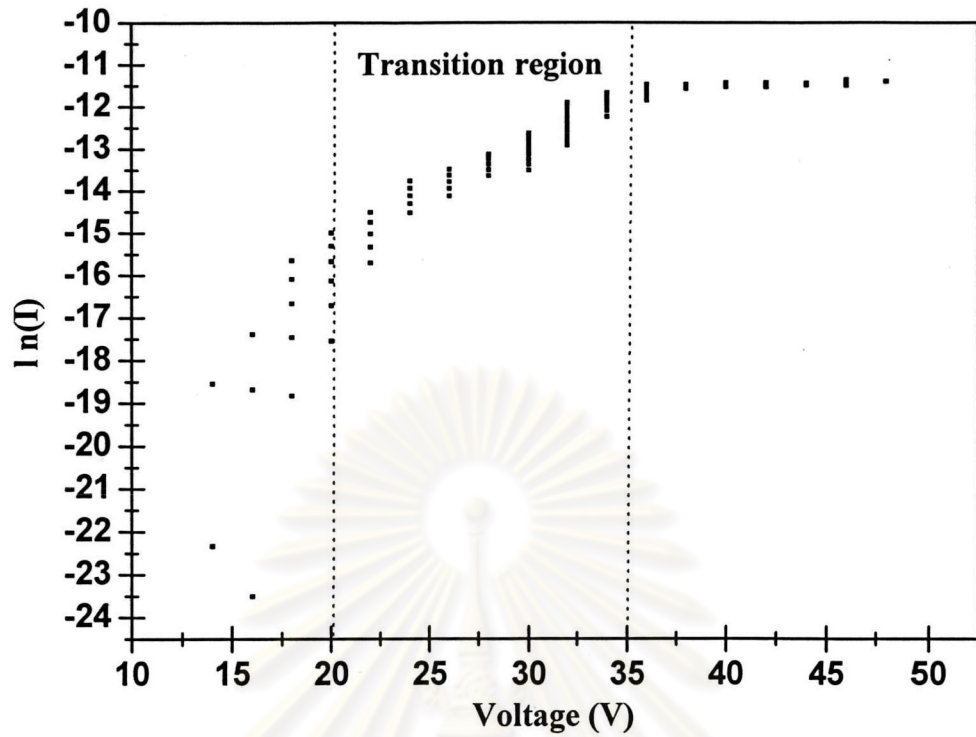
รูปที่ 3.20 สัญญาณความต่างศักย์กับกระแสที่ได้จากหัววัดลงมัวร์

จากหัวข้อ 2.3.2 ในรูปที่ 2.4 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.20 พบว่าในช่วง 20 ถึง -100 โวลต์ เป็นช่วงไอออนบวกอิมิตัว ซึ่งในการหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจะต้องทำการหาค่ากระแสช่วงไอออนบวกอิมิตัวออกไปก่อน โดยคาดว่ากระแสช่วงไอออนบวกอิมิตัวนี้จะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ จึงหาสมการของการแปรผันตรงในช่วงไอออนบวกอิมิตัวแล้วนำไปลบกับข้อมูลเดิมที่มีอยู่ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.21

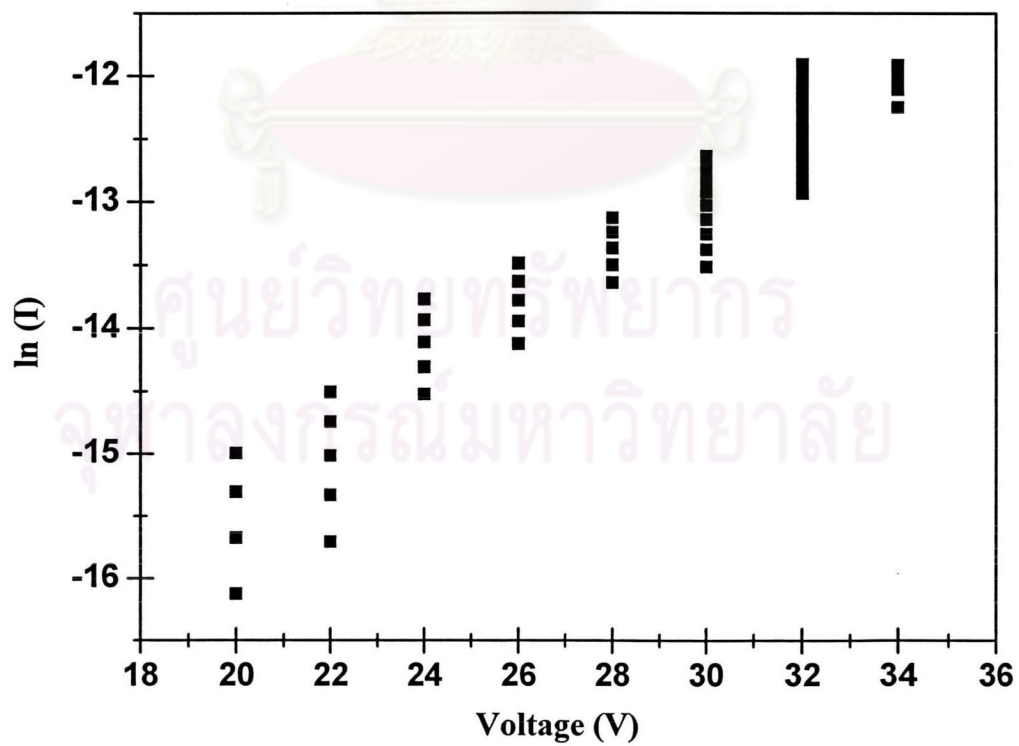


รูปที่ 3.21 สัญญาณความต่างศักย์และกระแส เมื่อหักค่ากระแสไอออนบวกออก

จากรูป 3.21 เมื่อนำเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.4 ในช่วงความต่างศักย์ 20 ถึง 35 โวลต์ เป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงของกระแส (transition region) และจากสมการ 2.27 เมื่อนำค่ากระแสที่ได้หาค่า $\ln(I)$ ทำการเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์ และฟังก์ชันลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนได้กราฟดังรูปที่ 3.22 พิจารณาเฉพาะช่วงการเปลี่ยนแปลงในความต่างศักย์ในช่วง 20 ถึง 35 โวลต์ จะได้กราฟดังรูปที่ 3.23

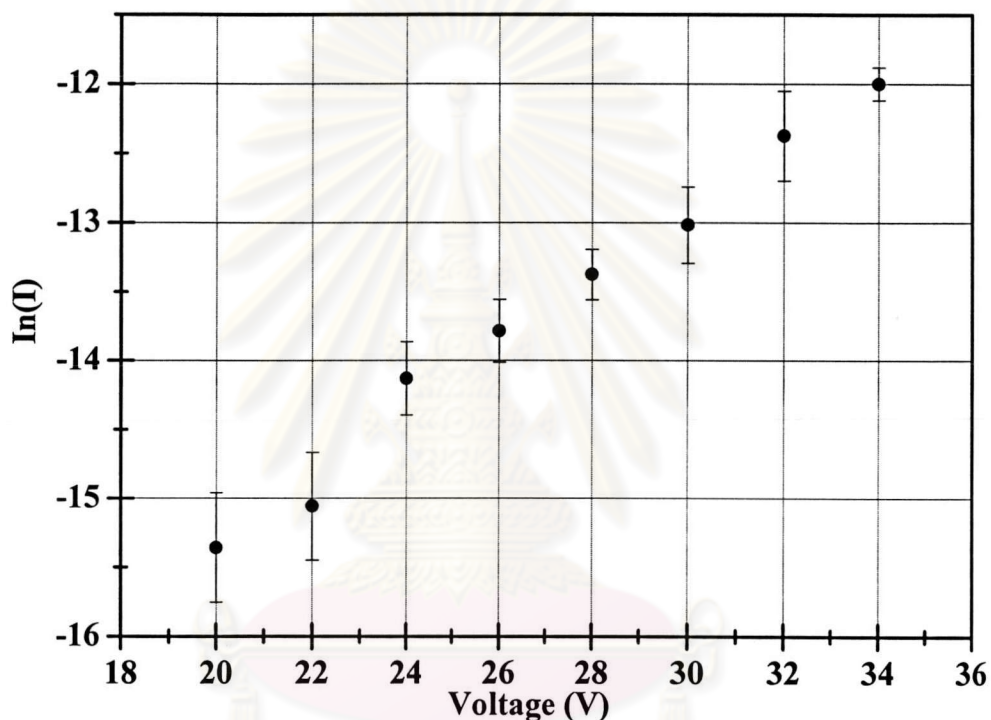


รูปที่ 3.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับค่าความต่างศักย์



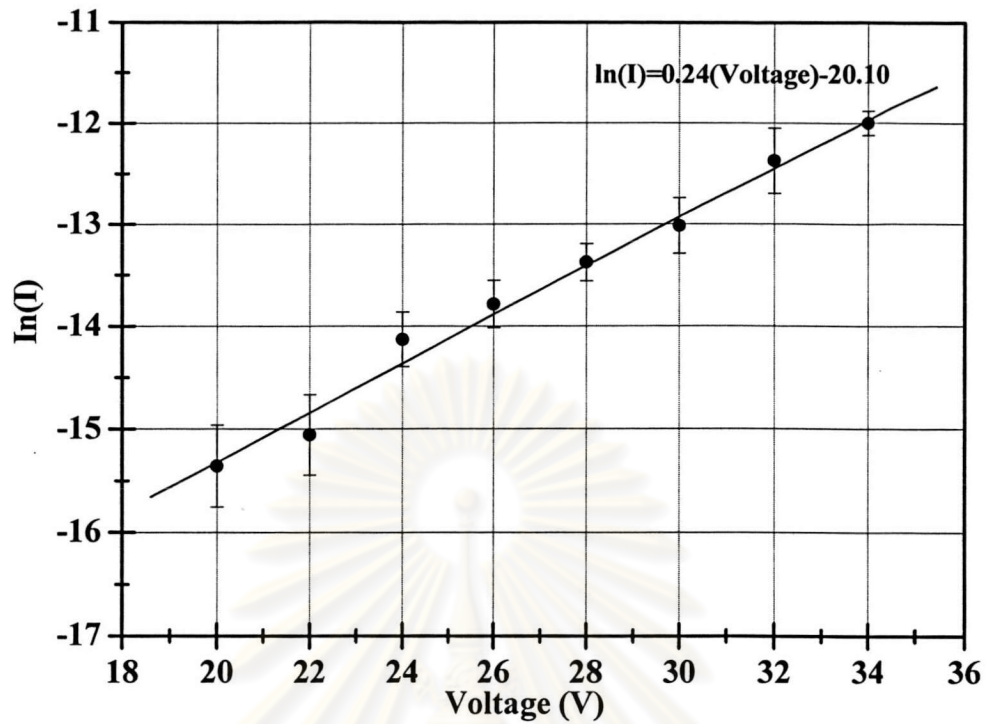
รูปที่ 3.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับค่าความต่างศักย์ในช่วงการเปลี่ยนแปลง

จากวิธีการข้างต้นพบว่า ณ ความต่างศักย์ค่าหนึ่งๆ จะมี $\ln(I)$ เปลี่ยนแปลงอยู่หลายค่า ที่เกิดขึ้นในการวัด และในการทดลองจริงที่เงื่อนไขเดียวกันนี้ได้ทำการทดลอง 10 ครั้ง จึงได้นำค่า $\ln(I)$ ที่ความต่างศักย์เดียวกัน และในเงื่อนไขเดียวกัน มาหาค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนร่วมกัน (โดยหาจากการวัดการกระจายข้อมูล) ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 3.24 และเมื่อทำการวาดกราฟเส้นตรงของข้อมูลที่ได้ จะได้กราฟดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนของ $\ln(I)$ ที่ความต่างศักย์ต่างๆ ในช่วงการเปลี่ยนแปลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนของ $\ln(I)$ ที่ความต่างศักย์ต่างๆ ในช่วงการเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการวาดกราฟเส้นตรง

จากการกระจายข้อมูลที่ได้นี้สามารถหาค่าความชันของกราฟได้เท่ากับ 0.24 eV^{-1} ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้เท่ากับ $1/0.24 \text{ eV}$ และมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.01 ดังนั้นค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนคือ $4.17 \pm 0.01 \text{ eV}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย