บทที่ 4

การทดลอง ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดโพรงเรโซแนนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ต้องมีการทดลองวัดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องที่สร้างขึ้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าเครื่องที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ และทำให้ทราบข้อมูลในการใช้เครื่องดังกล่าว นอกจากนี้การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของพลาสมาจากเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดโพรงเรโซแนนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นสิ่งจำเป็น เพราะค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของพลาสมาจะเป็นตัวแปรในการควบคุมกลไกของการปลูกฟิล์มบางเมื่อนำเครื่องไปใช้งาน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง การทดลองวัดการทำงานของเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดโพรงเรโซแนนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สร้างขึ้น และการวัดหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของพลาสมาไมโครเวฟ พร้อมทั้งเสนอผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง โดยจะเสนอการทดลองตามลำดับของการศึกษางานวิจัย ซึ่งจะมีการทดลองทั้งหมด 5 การทดลอง ดังนี้

- การวัดการทำงานส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ
- การวัดการทำงานส่วนควบคุมการส่งกำลังคลื่นไมโครเวฟ
- การวัดกำลังคลื่นไมโครเวฟของระบบ
- การวัดประสิทธิภาพการเรโซแนนซ์ของโพรงเรโซแนนซ์
- การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของพลาสมา

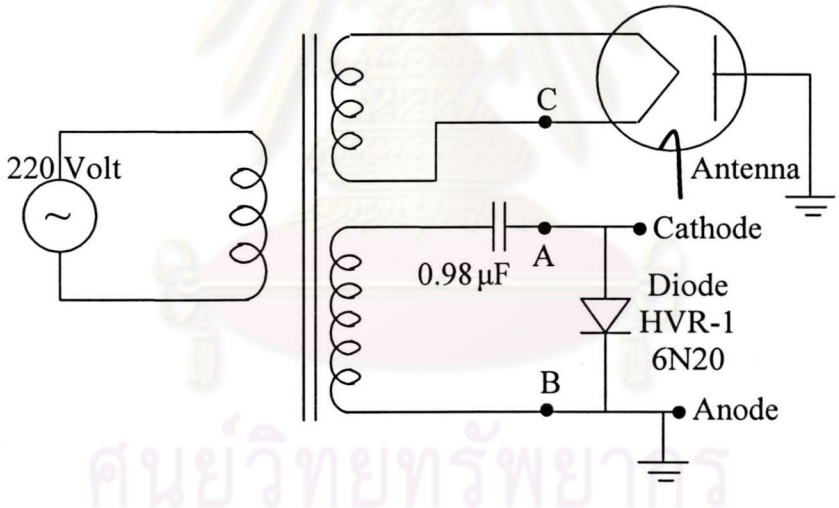
4.1 การวัดการทำงานส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

จากหัวข้อที่ 3.2 ในส่วนกำเนิดคลื่น จะเห็นว่าในวงจรจ่ายแรงดัน ส่วนจ่ายแรงดันไฟต่ำจะเป็นส่วนที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วแคโทด และส่วนจ่ายไฟแรงดันสูงจะเป็นส่วนที่ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกถูกเร่ง ให้เคลื่อนจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด แต่การที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกจะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดได้ อิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานมากพอ จึงจะสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้ ซึ่งพลังงานมากพอที่จะกำเนิดคลื่นไมโครเวฟนี้ จะขึ้นกับค่าแรงดันที่จ่ายให้กับหลอดแม็กนีตรอนในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ดังนั้นเพื่อวัดค่าแรงดันที่สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมีพลังงานสูงพอที่จะกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้ เริ่มแรกจึงจัดการทดลองวัดการทำงานของส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ โดยเริ่มต้นจะวัดสัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูงในขณะที่ต่อกับหลอดแม็กนีตรอน และในขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอน เพื่อทำให้ทราบว่า เมื่อส่วนจ่ายไฟแรงดันสูงต่อเข้ากับหลอดแม็กนีตรอนแล้ว

แรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด จะแตกต่างกับขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอนหรือไม่ ซึ่งได้แบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

4.1.1 การวัดสัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอน

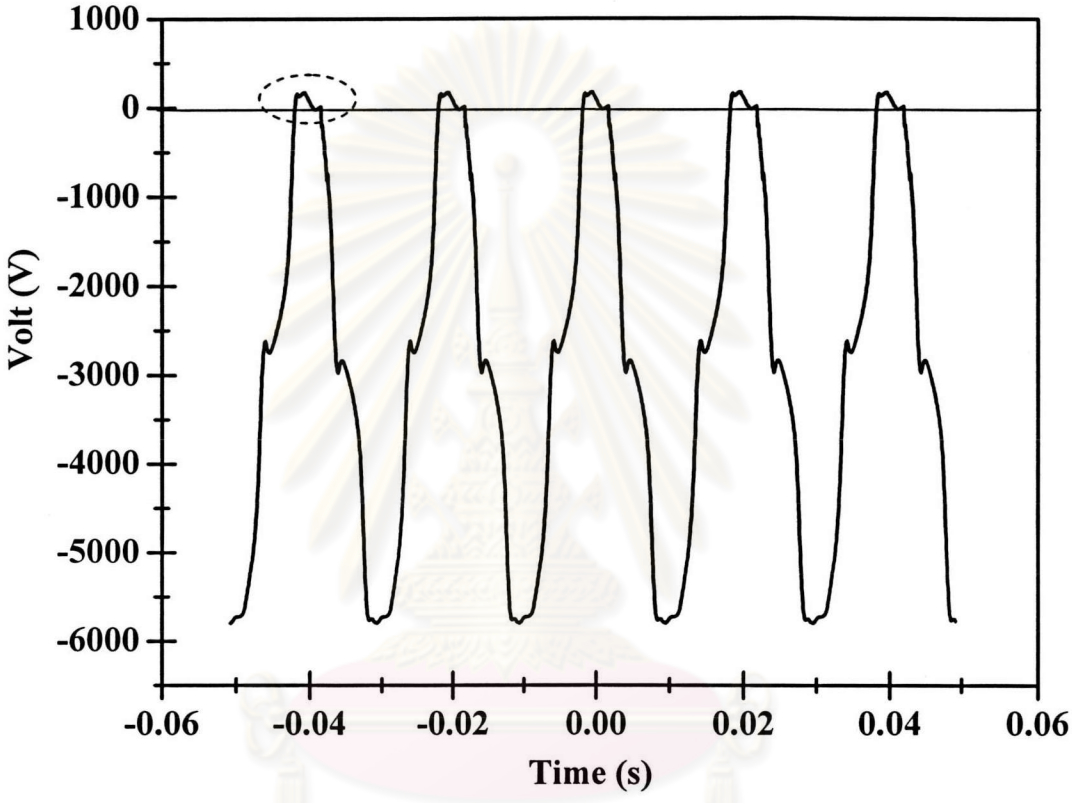
ขั้นตอนในการวัดแรงดันตกคร่อมขั้วแคโทดกับแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอน เริ่มจากต่อวงจรทวีแรงดันลบแบบครึ่งคลื่น ตามรูปที่ 4.1 จ่ายไฟกระแสสลับให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ และวัดสัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด (วัดคร่อมจุด A กับจุด B) ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ด้วยหัววัดความต่างศักย์สูง โดยแสดงผลการวัดผ่านหน้าจอออสซิโลสโคป เก็บข้อมูลผลการทดลองเข้าคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Wavestar ผ่านพอร์ต RS-232 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Excel หรือ Origin วิเคราะห์ผลที่ได้



รูปที่ 4.1 การจัดการทดลองวัดสัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ขณะที่ไม่ต่อกับหลอดแม็กนีตรอน

จากการจัดทดลองตามรูปที่ 4.1 เมื่อจ่ายไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ แก่หม้อแปลงด้านปฐมภูมิ และต่อหม้อแปลงด้านทุติยภูมิเข้ากับตัวเก็บประจุไฟแรงสูง ผ่านไดโอดไฟแรงสูง และลงสายดิน (ยังไม่ต่อขั้วแคโทดของส่วนจ่ายไฟแรงสูงเข้ากับหลอดแม็กนีตรอน) สัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด (วัดคร่อมจุด A กับจุด B) ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 4.2

ผลการทดลองพบว่า เมื่อจ่ายแรงดันไฟด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ สัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด (วัดคร่อมจุด A กับจุด B) ขณะที่ไม่ต่อกับหลอดแม็กนีตรอน จะมีลักษณะคล้ายสัญญาณทวีแรงดันลบแบบครึ่งคลื่นของสัญญาณรูปซายน์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการจัดการทดลองที่เป็นวงจรทวีแรงดันลบแบบครึ่งคลื่น โดยมีแรงดันขาเข้าเป็นแรงดันไฟบ้าน ซึ่งเป็นสัญญาณรูปซายน์ และมีความถี่ 50 เฮิรตซ์



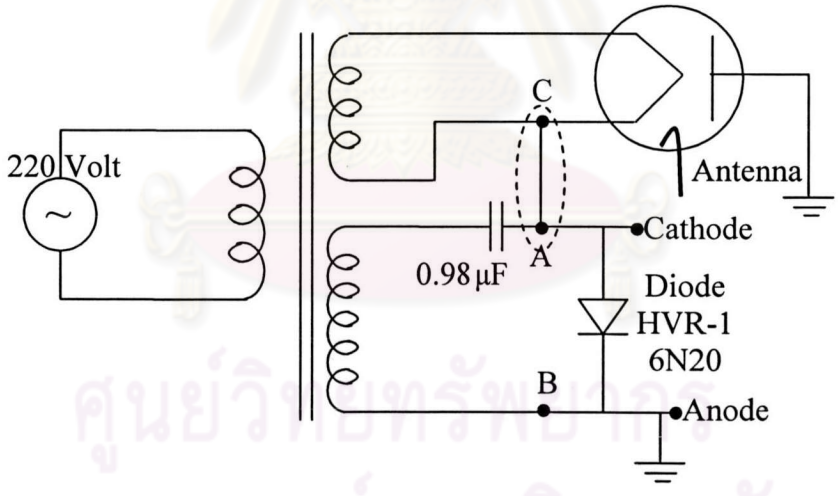
รูปที่ 4.2 สัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอน

ลักษณะของสัญญาณจะวิเคราะห์ได้ดังนี้

การกระเพื่อมของสัญญาณในขณะที่แรงดันมีค่ามากกว่า 0 โวลต์ (ส่วนที่วง) คาดว่าเกิดเนื่องจากขณะที่วงจรทำงานในลักษณะ forward bias ในวงจรจะมีแรงดันไปตกคร่อมไดโอดไฟแรงสูงไว้ประมาณ 200 โวลต์ สาเหตุที่มีแรงดันไปตกคร่อมที่ไดโอดไฟแรงสูง 200 โวลต์ เนื่องจากไดโอดไฟแรงสูง จะมีสมบัติคล้ายกับการนำไดโอดหลายตัวมาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้ทนแรงดันได้มากในช่วง reverse bias ผลทำให้ไดโอดมีความต้านทานภายในเกิดขึ้น แล้วเมื่อแรงดันขาออกจากหม้อแปลงเป็นบวก จะมีแรงดันไปตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุไว้ค่าหนึ่ง ประมาณ 2,800 โวลต์ สาเหตุ

เนื่องจากมีแรงดันบางส่วนไปตกคร่อมที่ตัวไดโอด 200 โวลต์ ในช่วง forward bias จึงเห็นสัญญาณกระเพื่อมของแรงดันที่มียอดคลื่นมากกว่าแกน 0 โวลต์ ในทางบวกขึ้นไปอีกประมาณ 200 โวลต์ หรือกล่าวโดยละเอียดได้ว่า การกระเพื่อมของสัญญาณในช่วง -2,800 โวลต์ เกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลแรกของแรงดันไฟฟ้าสลับ ยอดคลื่น 3,000 โวลต์ ทางด้านทุติยภูมิ วงจรทำงานในลักษณะ forward bias ไดโอดไฟแรงสูงมีแรงดันตกคร่อมผนวกกับมีความต้านทานภายในรวมกันเป็น 200 โวลต์ ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟแรงสูงมีค่าเท่ากับ 3,000 ลบ 200 โวลต์ เท่ากับ 2,800 โวลต์ และเมื่อวงจรทำงานในลักษณะ reverse bias ในช่วงครึ่งไซเคิลหลังทำให้แรงดันที่ตกคร่อมหม้อแปลงขาออกมีค่า -3,000 โวลต์ รวมกับแรงดันที่สะสมในตัวเก็บประจุซึ่งมีค่า -2,800 โวลต์ เป็น -5,800 โวลต์ จึงทำให้สัญญาณที่รวมกันมีการกระเพื่อมในช่วง -2,800 โวลต์ขึ้นได้ นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณมีค่าไม่ถึง -6,000 โวลต์ ซึ่งจากการทดลองวัดได้จริงมีค่า -5,800 โวลต์ เป็นไปตามเหตุผลที่ได้กล่าวไว้

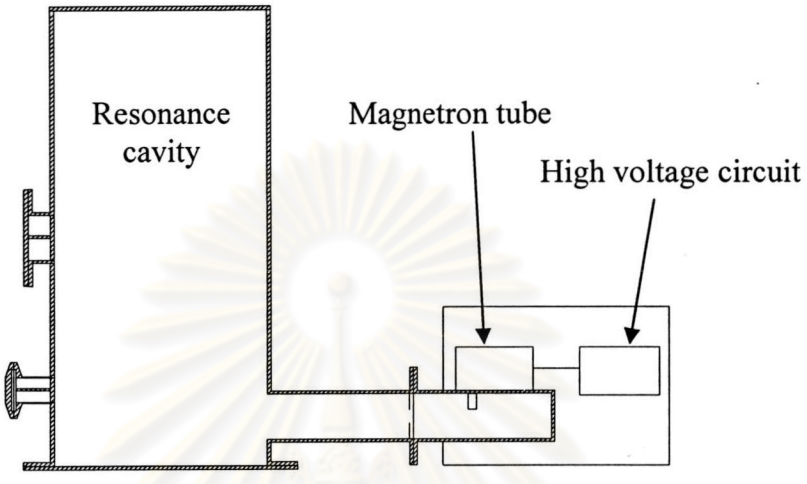
4.1.2 การวัดสัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ขณะที่ต่อหลอดแม็กนีตรอน



รูปที่ 4.3 การจัดการทดลองวัดสัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ขณะที่ต่อกับหลอดแม็กนีตรอน

เมื่อต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 4.1 และทำการเชื่อมวงจรระหว่างจุด A กับจุด C ซึ่งจะได้วงจรตามรูปที่ 4.3 ซึ่งการต่อวงจรลักษณะนี้จะทำให้มีความต่างศักย์จ่ายให้แก่หลอดแม็กนีตรอน จึงต้องทำการติดตั้งหลอดแม็กนีตรอนเข้ากับโพรงเรโซแนนซ์ ตามรูปที่ 4.4 (เพื่อป้องกันคลื่นไมโครเวฟหากหลอดแม็กนีตรอนจ่ายคลื่นไมโครเวฟออกมา) เมื่อทำการจ่ายไฟกระแสสลับให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ วัดสัญญาณแรงดันขาออกที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด (วัดคร่อมจุด

A กับจุด B) ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ด้วยหัววัดความต่างศักย์สูง โดยแสดงผลการวัดผ่านหน้าจอออสซิโลสโคป เก็บผลการทดลองเข้าคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Wavestar ผ่านพอร์ต RS-232 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Excel หรือ Origin วิเคราะห์ผลที่ได้ต่อไป



รูปที่ 4.4 การต่อหลอดแม็กนีตรอนเข้ากับโพรงเรโซแนนซ์

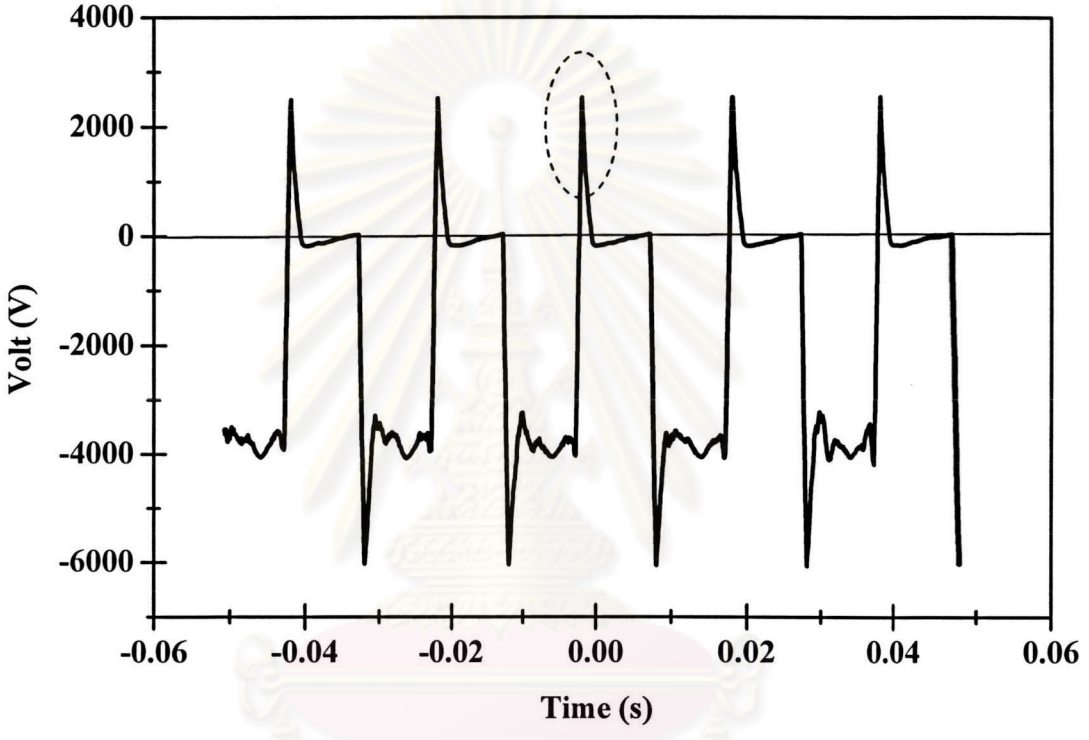
จากการจัดการทดลองตามรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นการจ่ายแรงดันไฟ 220 โวลต์ให้แก่หม้อแปลงด้านปฐมภูมิ และแรงดันขาออกของหม้อแปลงจะต่อกับตัวเก็บประจุไฟแรงสูง ผ่านไดโอดไฟแรงสูงและลงสายดิน (ต่อขั้วแคโทดของส่วนจ่ายไฟแรงดันสูงนี้เข้ากับหลอดแม็กนีตรอน เพิ่มจากการทดลองตอนที่ 4.1.1) แล้วทำการวัดสัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด (วัดคร่อมจุด A กับจุด B) ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ผลสัญญาณของแรงดันที่วัดได้จะแสดงดังรูปที่ 4.5

ผลการทดลองพบว่า เมื่อจ่ายแรงดันให้แก่หม้อแปลงด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด (วัดคร่อมจุด A กับจุด B) ขณะที่ต่อกับหลอดแม็กนีตรอน จะมีลักษณะคล้ายสัญญาณทวีแรงดันลบแบบครึ่งคลื่น ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการจัดการทดลองที่เป็นวงจรทวีแรงดันลบแบบครึ่งคลื่น โดยมีแรงดันขาเข้าเป็นแรงดันไฟบ้าน ที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์

ลักษณะของสัญญาณจะวิเคราะห์ได้ดังนี้

ขณะวงจรทำงานในลักษณะ reverse bias จะมีการเปลี่ยนแรงดันอย่างรวดเร็วจาก 0 ถึง -6,000 โวลต์โดยประมาณ ซึ่งการเปลี่ยนแรงดันอย่างรวดเร็วนี้จะทำให้มีกระแสไหลในหลอดแม็กนีตรอน ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนมีค่าลดลงเหลือประมาณ -4,000 โวลต์ ซึ่ง

ขณะนี้อิเล็กตรอนในหลอดแม็กนีตรอนจะเกิดการสั่น หลอดแม็กนีตรอนจะมีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น หรืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด และเมื่อขณะที่วงจรทำงานในลักษณะ forward bias จะมีการเปลี่ยนแรงดันอย่างรวดเร็วในหลอดแม็กนีตรอน สังเกตได้จากมีชาร์ป (ส่วนที่วง) เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของการนำไฟฟ้าในหลอดแม็กนีตรอน ผลทำให้หลอดแม็กนีตรอนจะกำเนิดคลื่นไมโครเวฟออกมาได้



รูปที่ 4.5 สัญญาณของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ขณะที่ต่อหลอดแม็กนีตรอน

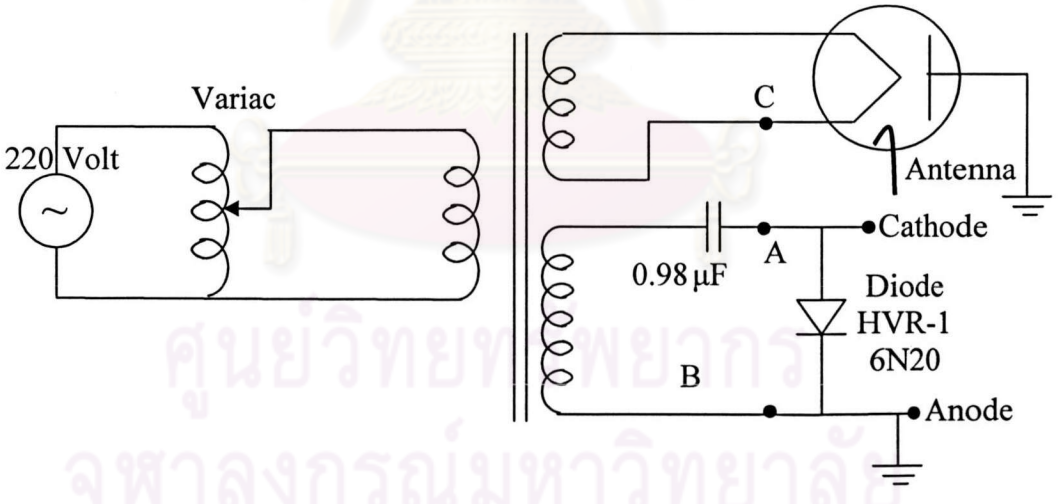
โดยสรุป หลอดแม็กนีตรอนจะสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้ เมื่อมีแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนขนาด -4,000 โวลต์

4.2 การวัดการทำงานส่วนควบคุมการส่งกำลังคลื่นไมโครเวฟ

การควบคุมกำลังคลื่นไมโครเวฟเป็นสิ่งที่จำเป็น สำหรับการใช้เครื่องไมโครเวฟพลาสมา เพราะกำลังคลื่นเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการเกิดพลาสมาในเครื่องไมโครเวฟพลาสมา จากหัวข้อ 3.2 ในส่วนควบคุมกำลังคลื่น จะเห็นว่า การที่จะควบคุมกำลังคลื่นได้ จะต้องควบคุม

แรงดันในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง โดยใช้ตัวปรับแรงดันควบคุมแรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ จึงจัดการทดลอง เพื่อศึกษาการควบคุมกำลังคลื่นของหลอดแม็กนีตรอน โดยใช้ตัวปรับแรงดันควบคุมแรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ แล้ววัดค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ในขณะที่ต่อกับหลอดแม็กนีตรอน และในขณะที่ไม่ต่อกับหลอดแม็กนีตรอนซึ่งจัดการทดลองได้ดังนี้

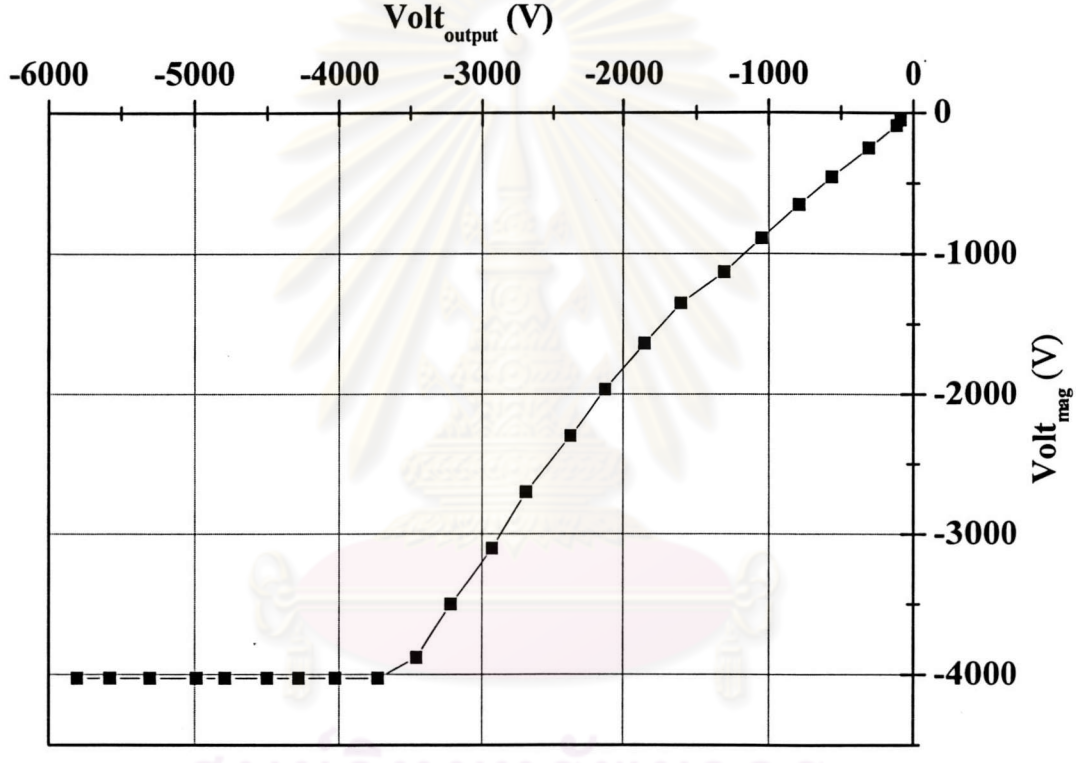
เมื่อต่อวงจรตามรูปที่ 4.1 และติดตั้งตัวปรับแรงดันเพิ่มเข้ากับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิตามรูปที่ 4.6 และต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 4.4 เพื่อป้องกันคลื่นไมโครเวฟ หากหลอดแม็กนีตรอนทำงาน ทำการปรับค่าแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ตั้งแต่ 0 ถึง 220 โวลต์ แล้ววัดค่าแรงดันขาออกที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด (วัดคร่อมจุด A กับจุด B) ในส่วนจ่ายไฟแรงสูง ด้วยหัววัดความต่างศักย์สูง ขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอน (ไม่ต่อจุด A กับจุด C) และขณะที่ต่อหลอดแม็กนีตรอน (ต่อจุด A กับจุด C) แสดงผลการวัดผ่านหน้าจอออสซิโลสโคป อ่านค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณที่วัดได้ และบันทึกผล นำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันสูงสุดขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอนกับค่าแรงดันสูงสุดขณะที่ต่อหลอดแม็กนีตรอน (เป็นแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอน)



รูปที่ 4.6 การจัดการทดลองวัดค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด ในส่วนจ่ายไฟแรงดันสูง ของวงจรควบคุมการจ่ายแรงดัน เมื่อมีการปรับแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงระหว่าง 0-220 โวลต์

จากการจัดการทดลองข้างต้น เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันสูงสุดขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอน ($Volt_{output}$) กับแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอน ($Volt_{mag}$) ซึ่งจะได้ผลดังกราฟที่ 4.7

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 พบว่า แรงดันสูงสุด ขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอนมีค่าระหว่าง 0 ถึง -3,750 โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนมีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0 ถึง -4,000 โวลต์ แสดงว่า บริเวณนี้หลอดแม็กนีตรอนจะไม่สามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้ แต่เมื่อแรงดันสูงสุด ขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอนมีค่าระหว่าง -3,750 ถึง -5,800 โวลต์ แรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนมีค่า -4,000 โวลต์ ช่วงนี้เป็นการจ่ายแรงดันให้แก่อิเล็กตรอนในหลอดแม็กนีตรอน ทำให้มีพลังงานไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในหลอดแม็กนีตรอน ทำให้หลอดแม็กนีตรอนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ



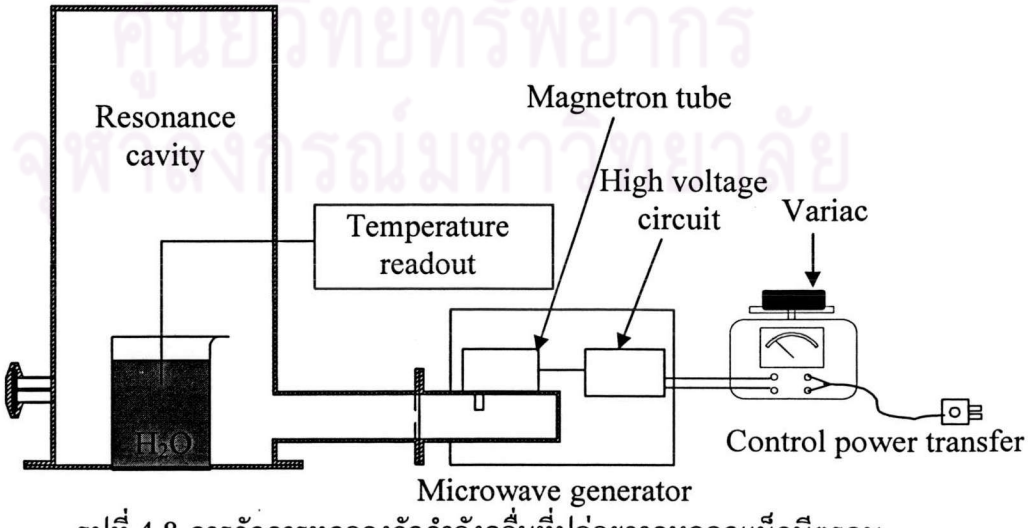
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันสูงสุด ที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ($Volt_{output}$) ในส่วนจ่ายไปแรงสูง ในขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอน กับแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอน ($Volt_{mag}$)

สรุปค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ในขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอนมีค่าระหว่าง -3,750 ถึง -5,800 โวลต์ จะทำให้มีแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอน -4,000 โวลต์ หลอดแม็กนีตรอนจะกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้ และการเพิ่มค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ในขณะที่ไม่ต่อหลอดแม็กนีตรอนระหว่าง -3,750 ถึง -5,800 โวลต์ จะทำให้หลอดแม็กนีตรอนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟกำลังขนาดต่างๆ ได้

4.3 การวัดกำลังคลื่นไมโครเวฟของระบบ

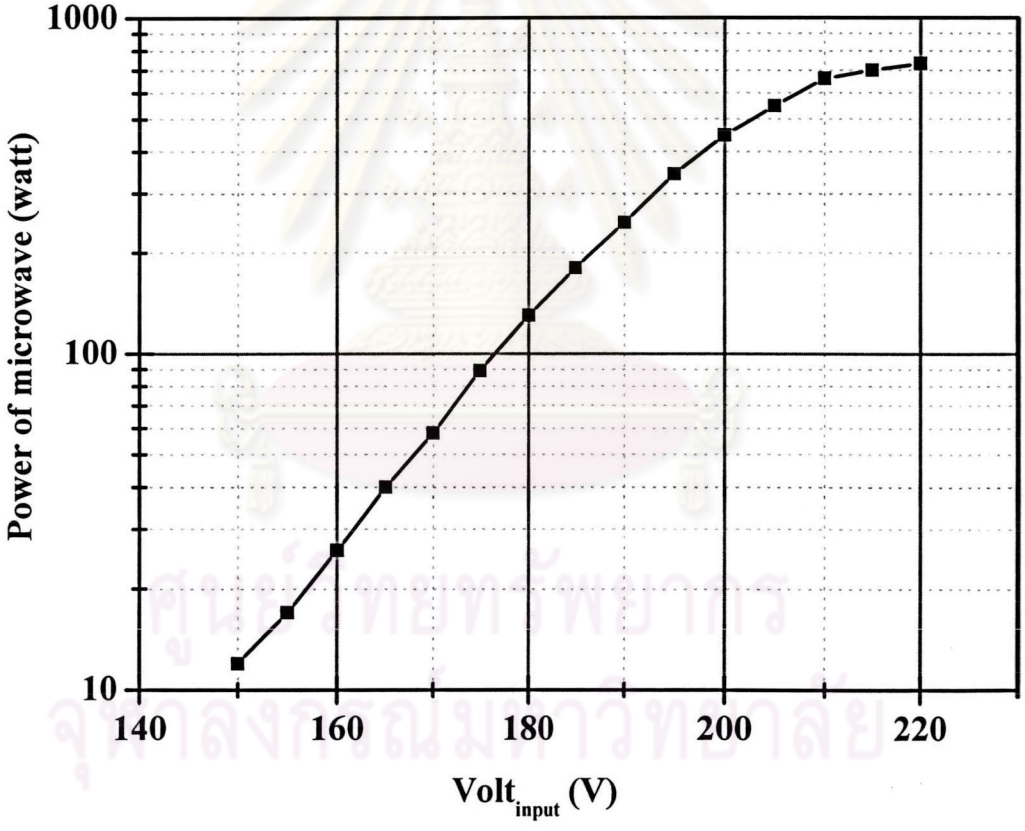
การวัดกำลังคลื่นไมโครเวฟ เพื่อหากำลังคลื่นไมโครเวฟที่หลอดแม็กนีตรอนกำเนิด และเลือกใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟที่หลอดแม็กนีตรอนกำเนิดได้ตามต้องการ จากผลการทดลองที่ 4.2 ทำให้รู้ว่าสามารถควบคุมกำลังที่ให้แก่หลอดแม็กนีตรอนได้ เมื่อมีแรงดันตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนเท่ากับ -4,000 โวลต์ หลอดแม็กนีตรอนจะกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ จึงได้มีการจัดการทดลอง เพื่อทดสอบว่าแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินนี้ถูกเปลี่ยนเป็นกำลังของคลื่นไมโครเวฟจริง และหาค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ปล่อยออกมาจากหลอดแม็กนีตรอน การวัดกำลังคลื่นไมโครเวฟ ทำโดยวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ค่าอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงจะใช้หากำลังคลื่นไมโครเวฟได้ การคำนวณกำลังคลื่นไมโครเวฟ (P) หาได้จาก [30] $P = \frac{4.19\,V\Delta T}{t}$ โดย V เป็นปริมาตรของน้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร), T เป็นอุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียล), t เป็นเวลา (วินาที) การวัดแบบนี้เป็นการวัดในมาตรฐานสากลของการวัดกำลังของหลอดแม็กนีตรอน ซึ่งมีการกำหนดไว้ในอันดับที่ IEC705 [30]

ขั้นตอนในการทดลอง เริ่มจากต่อวงจรตามรูปที่ 4.6 ทำการต่อส่วนจ่ายไฟแรงสูงเข้ากับหลอดแม็กนีตรอน (ต่อจุด A กับจุด C) เพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานของหลอดแม็กนีตรอน และต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 4.8 โดยนำบีกเกอร์ใส่น้ำกลั่นปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร วางในโพรงเรโซแนนซ์แล้วปิดโพรงเรโซแนนซ์ทั้งสองข้าง นำหัววัดอุณหภูมิมาวัดอุณหภูมิของน้ำ บันทึกค่าอุณหภูมิ จากนั้นให้พลังงานแก่หลอดแม็กนีตรอนเป็นเวลา 60 วินาที โดยปรับค่าแรงดันด้านปฐมภูมิ 0 ถึง 220 โวลต์ นำหัววัดอุณหภูมิมาวัดอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลง บันทึกค่าอุณหภูมิ นำค่าอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดอุณหภูมิไปคำนวณหากำลังของคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 4.8 การจัดการทดลองวัดกำลังคลื่นที่ปล่อยจากหลอดแม็กนีตรอน

จากการจัดการทดลองตามรูปที่ 4.8 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 จากการทดลองพบว่า ในช่วงแรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิระหว่าง 0 ถึง 150 โวลต์ ไม่สามารถวัดกำลังคลื่นได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2 ในช่วงที่มีแรงดันที่ตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนไม่ถึง -4,000 โวลต์ ช่วงนี้อิเล็กตรอนในหลอดแม็กนีตรอนจะไม่มีพลังงานมากพอที่จะกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้ ทำให้ไม่สามารถวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำในบีกเกอร์ไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อแรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิมีค่า 150 โวลต์ จะเริ่มวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟได้เท่ากับ 10 วัตต์ แสดงว่าเริ่มมีกำลังจ่ายให้กับหลอดแม็กนีตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในหลอดแม็กนีตรอนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2 ในช่วงที่มีแรงดันตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนเท่ากับ -4,000 โวลต์ หลอดแม็กนีตรอนจะกำเนิดคลื่นไมโครเวฟได้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ ($Volt_{input}$) กับกำลังคลื่นไมโครเวฟ

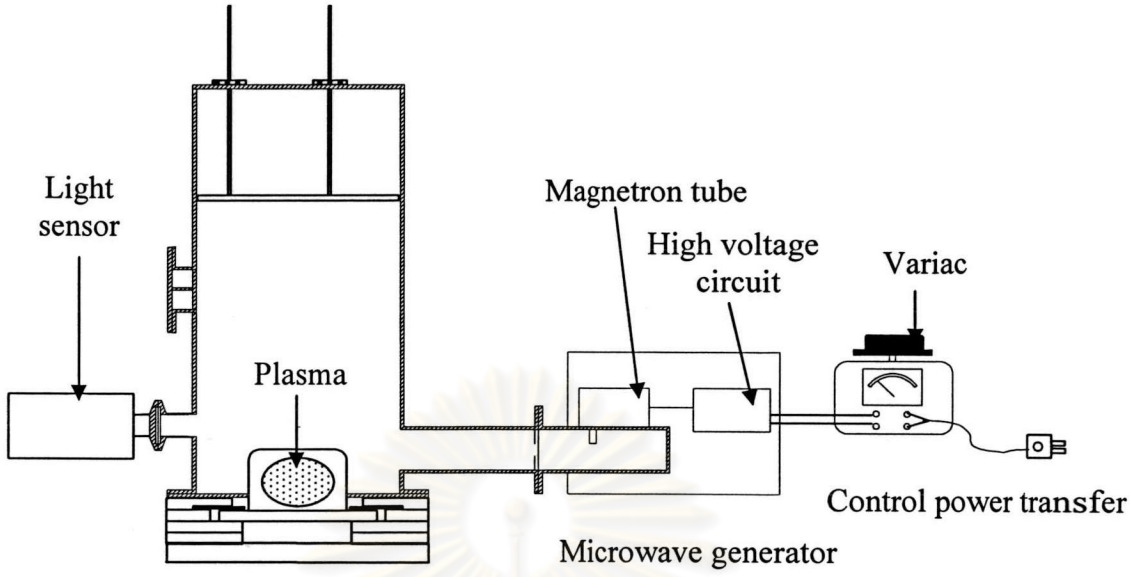
เมื่อแรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 150 ถึง 220 โวลต์ กำลังของคลื่นไมโครเวฟมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10 ถึง 730 วัตต์ แสดงว่า แรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิช่วงนี้จะทำให้มีกำลังจ่ายให้แก่หลอดแม็กนีตรอน เพื่อเร่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วแคโทด ให้วิ่งไปยัง

ขั้วแอโนด อิเล็กตรอนในหลอดแม็กนีตรอนจะได้รับพลังงานสูงขึ้น และอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมาได้สูงขึ้น ซึ่งจะพิจารณาได้จากการวัดกำลังคลื่นไมโครเวฟได้สูงขึ้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2 คือแรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิมีค่ามากกว่า 150 โวลต์ จะยังคงมีแรงดันตกคร่อมหลอดแม็กนีตรอนเท่ากับ -4,000 โวลต์ และการปรับแรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิมีค่ามากกว่า 150 โวลต์ จะทำให้มีกำลังจ่ายให้แก่หลอดแม็กนีตรอนสูงขึ้น ให้อิเล็กตรอนในหลอดแม็กนีตรอนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังสูงขึ้น

โดยสรุปแล้ว การใช้งานระบบไมโครเวฟพลาสมาที่สร้างขึ้นจะเลือกขนาดกำลังคลื่นไมโครเวฟได้ โดยการปรับแรงดันของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ และการปรับแรงดันของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 150 ถึง 220 โวลต์ จะทำให้หลอดแม็กนีตรอนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังเพิ่มขึ้น มีค่าระหว่าง 10 ถึง 730 วัตต์

4.4 การวัดประสิทธิภาพการเรโซแนนซ์ของโพรงเรโซแนนซ์

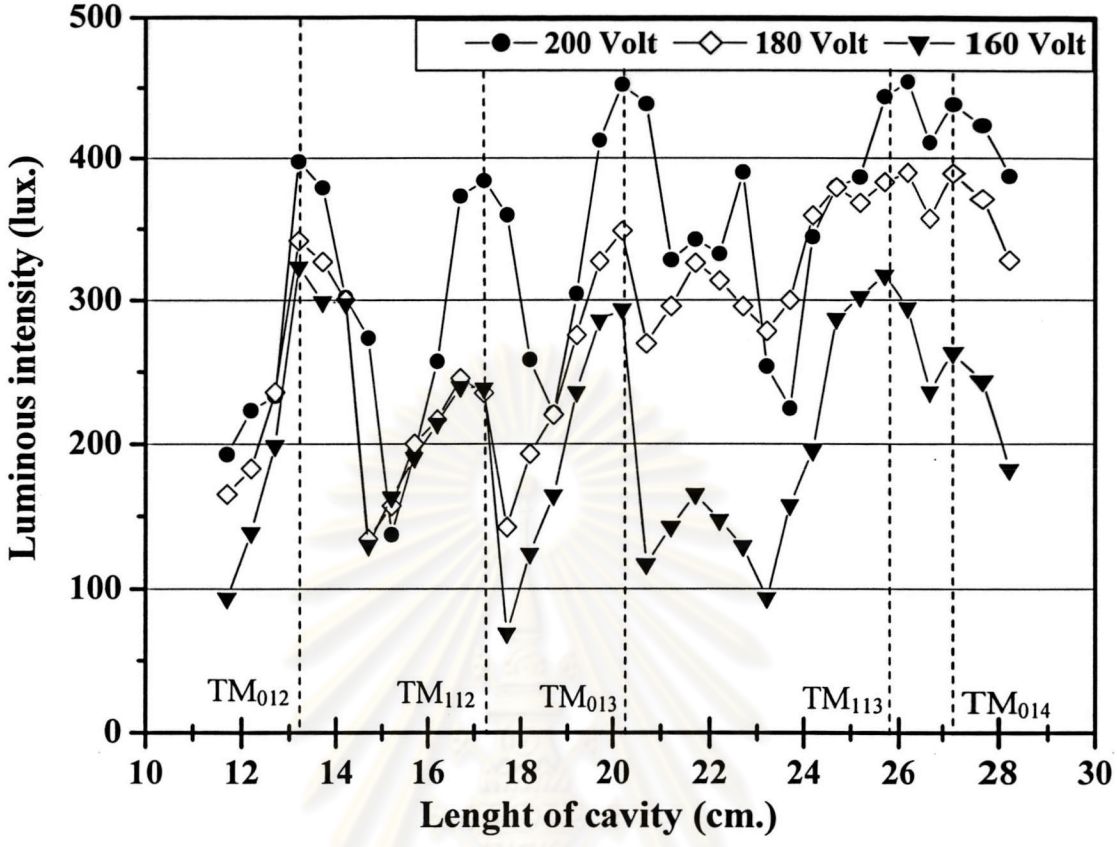
การเกิดเรโซแนนซ์ของคลื่นไมโครเวฟในโพรงทรงกระบอก ในหัวข้อที่ 3.2.3 จะเห็นว่า ตำแหน่งที่เกิดเรโซแนนซ์ของคลื่นภายในโพรง จะมีการส่งผ่านพลังงานได้สูงสุดทำให้คาดว่าเมื่อเกิดเรโซแนนซ์ จำนวนอิเล็กตรอนของก๊าซที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงจะมีจำนวนมากกว่าตอนไม่เกิดเรโซแนนซ์ และเมื่อเกิดพลาสมา อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะมีคายพลังงานออกมาในรูปของแสง ทำให้ที่ตำแหน่งที่เกิดเรโซแนนซ์ น่าจะมีความเข้มของการเรืองแสงสูงกว่าตำแหน่งที่ไม่เกิดเรโซแนนซ์ และคาดว่าความยาวของโพรงที่เกิดเรโซแนนซ์ น่าจะสอดคล้องกับความยาวที่คำนวณตำแหน่งเรโซแนนซ์ ในหัวข้อที่ 3.2.3 จึงจัดการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพการเกิดเรโซแนนซ์ภายในโพรงเรโซแนนซ์ โดยพิจารณาจากค่าความเข้มของการเรืองแสงของพลาสมาที่ความยาวโพรงขนาดต่างๆ นอกจากนี้ได้มีการปรับแรงดันของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิขนาดต่างๆ (ที่ใช้ในการทดลองนี้มี 160, 180, 200 โวลต์) ซึ่งคาดว่าน่าจะทำให้ความเข้มของการเรืองแสงเปลี่ยนไป เพราะจากการทดลองที่ 4.3 จะเห็นว่า แรงดันที่จ่ายให้กับหลอดแม็กนีตรอน มีผลต่อกำลังคลื่นไมโครเวฟ จึงคาดว่าเมื่อแรงดันมีค่ามากขึ้น ความเข้มของการเรืองแสงก็น่าจะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.10 การจัดการทดลองวัดความเข้มของการเรืองแสง

เมื่อใช้วงจรตามรูปที่ 4.6 ทำการต่อส่วนจ่ายไฟแรงสูงเข้ากับหลอดแม็กนีตรอน (ต่อจุด A กับจุด C) เพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานของหลอดแม็กนีตรอน และต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 4.10 โดยนำโพรงเรโซแนนซ์ต่อเข้ากับภาชนะสุญญากาศ และติดตั้งหัววัดความเข้มแสงที่ช่องด้านข้างของโพรงเรโซแนนซ์ ทำการสร้างสภาวะสุญญากาศของก๊าซอาร์กอนในภาชนะสุญญากาศ ที่ระดับความดัน 1.50 ทอร์ แล้วจ่ายพลังงานให้แก่หลอดแม็กนีตรอนโดยปรับค่าแรงดันของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิให้มีค่าเท่ากับ 160, 180 และ 200 โวลต์ ปรับความยาวของโพรงเรโซแนนซ์ และวัดความเข้มของการเรืองแสงของพลาสมาอาร์กอน ด้วยหัววัดความเข้มแสง บันทึกค่าความเข้มของการเรืองแสงของพลาสมาอาร์กอน ด้วยโปรแกรม DataStudio

จากการจัดการทดลอง ตามรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อปรับความยาวโพรงเรโซแนนซ์ขนาดต่างๆ แล้วใช้หัววัดความเข้มแสงวัดค่าความเข้มของการเรืองแสงของพลาสมาอาร์กอน ที่ความดัน 1.5 ทอร์ โดยมีแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิมีขนาดต่างๆ 160, 180, 200 โวลต์ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความยาวโพรงเรโซแนนซ์กับค่าความเข้มของการเรืองแสงของพลาสมาอาร์กอน จะแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวโพรงเรโซแนนซ์กับค่าความเข้มของการเรืองแสงของพลาสมา

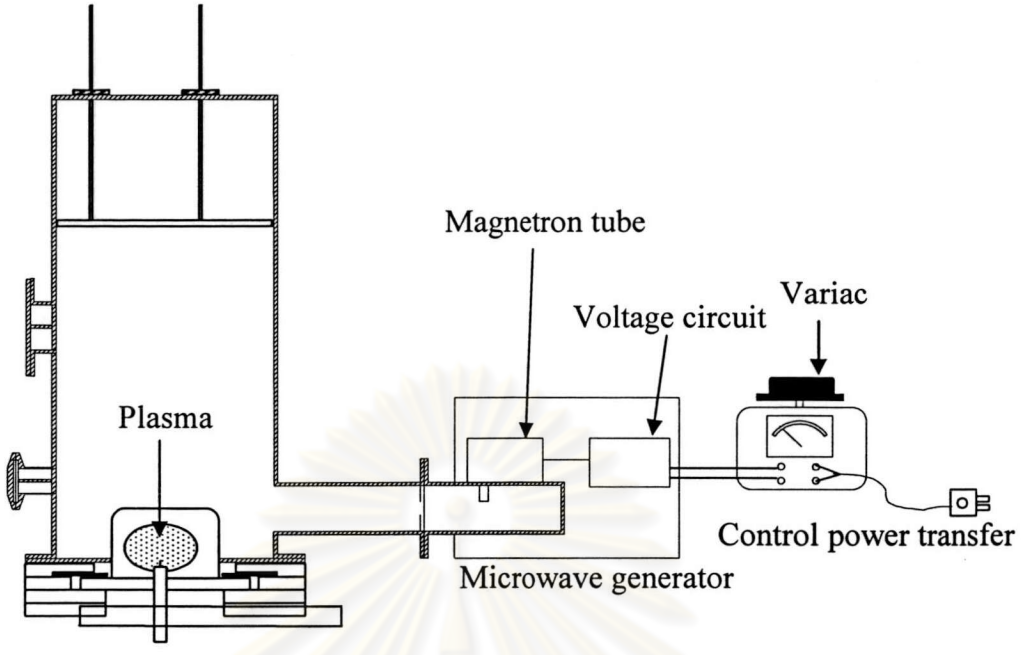
ผลของการเรืองแสงของพลาสมาอาร์กอน ในรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อปรับความยาวของโพรงเรโซแนนซ์ พลาสมาจะมีความเข้มของการเรืองแสงแตกต่างกัน และความเข้มของการเรืองแสงทุกแรงดันจะมีค่าสูงขึ้นในตำแหน่งที่สอดคล้องกับโหมด TM ของการเกิดเรโซแนนซ์ ตามตารางที่ 3.1 เพราะว่าที่ตำแหน่งเกิดเรโซแนนซ์พลังงานที่ส่งผ่านจะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวได้มากกว่าตำแหน่งอื่น ดังนั้นจึงเห็นความเข้มของการเรืองแสงของพลาสมาสูงกว่าตำแหน่งอื่น นอกจากนี้จะเห็นว่า ณ ความยาวของโพรงที่ตำแหน่งเดียวกัน แรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิที่มีค่าสูงจะให้ความเข้มของการเรืองแสงสูงกว่าแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิที่มีค่าต่ำ เพราะแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิที่มีค่าสูง จะทำให้มีก๊าซถูกกระตุ้นสูง และก๊าซจะคายพลังงานออกมาในรูปของความเข้มแสงได้มากกว่าที่แรงดันต่ำ จึงเห็นความเข้มของการเรืองแสงที่แรงดันสูงมีค่าสูงกว่าที่แรงดันต่ำ

โดยสรุปโพรงเรโซแนนซ์ที่สร้างขึ้นจะมีการปรับความยาวของโพรงเรโซแนนซ์ให้เกิดการเรโซแนนซ์ของคลื่นไมโครเวฟได้ และที่ตำแหน่งของการเกิดเรโซแนนซ์จะสามารถส่งผ่านพลังงานได้สูงกว่าบริเวณที่ไม่เกิดการเรโซแนนซ์ และการจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิที่มีค่าสูงกว่า ก็จะสามารถส่งผ่านพลังงานได้มากกว่า

4.5 การวัดหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไมโครเวฟพลาสมา

จากหัวข้อที่ 2.3 การหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมา จะหาได้จากการนำหัววัดลางมัวร์ใส่เข้าไปในพลาสมา และทำการไบอัสหัววัด จะทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสและศักย์ของพลาสมาที่หัววัดได้ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสและศักย์ที่ได้นี้จะนำไปคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนตามสมการที่ 2.27 คือ $\frac{kT_e}{e} = \frac{\Delta V}{\Delta \ln I_e}$ และเมื่อทราบค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจะนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพลาสมาต่อไป ตามสมการที่ 2.28 คือ $n_p = \frac{I_{is}}{0.61eA\sqrt{\frac{m_i}{kT_e}}}$ ในการทดลองนี้จะมีการเปลี่ยนความดันของก๊าซ และชนิดของก๊าซที่ใช้เป็นพลาสมา ซึ่งคาดว่า ในการเปลี่ยนความดัน ถ้าความดันมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของพลาสมาน่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ก๊าซจะมีค่าหนาแน่นมากขึ้น ผลทำให้ความหนาแน่นของพลาสมามีค่าเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนน่าจะมีค่าลดลง เพราะว่าเมื่อความดันสูงขึ้น ความหนาแน่นของก๊าซก็จะเพิ่มขึ้นตาม แต่พลังงานที่จ่ายให้กับอนุภาคของก๊าซยังคงเท่าเดิม ดังนั้นน่าจะมีผลทำให้พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนภายในพลาสมาได้รับพลังงานน้อยลง อุณหภูมิของอิเล็กตรอนจึงน่าจะมีค่าลดลง และในการเปลี่ยนชนิดของก๊าซ เมื่อความดันคงที่ คาดว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลใหญ่ น่าจะมีค่าความหนาแน่นของพลาสมาสูงกว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อย และก๊าซที่มีมวลโมเลกุลใหญ่ น่าจะมีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนน้อยกว่า ก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อย เพราะก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อย เมื่อได้รับพลังงานน่าจะแตกตัวเป็นพลาสมา และเคลื่อนที่ได้เร็วว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลใหญ่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 การจัดการทดลองวัดพารามิเตอร์ของพลาสมา

ในการทดลองเมื่อต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 4.12 โดยนำหัววัดลางมัวร์ใส่ให้ปลายหัววัดอยู่ในตำแหน่งที่เกิดพลาสมา สร้างสภาวะสุญญากาศของก๊าซอาร์กอน ที่ความดัน 0.3 ทอร์ จ่ายคลื่นไมโครเวฟ 730 วัตต์ แล้วทำให้เกิดอาร์กอนพลาสมา บันทึกค่าความต่างศักย์และกระแสที่ได้จากหัววัดลางมัวร์ เข้าคอมพิวเตอร์ ทำการเปลี่ยนความดันตั้งแต่ 0.3 ทอร์ ถึง 0.9 ทอร์ และเปลี่ยนชนิดของก๊าซอาร์กอน เป็นไฮโดรเจน และเป็นก๊าซผสมระหว่างไฮโดรเจนและมีเทน นำสัญญาณกระแสและศักย์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ตามสมการที่ 2.27 และคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพลาสมา ตามสมการที่ 2.28 โดยมีขั้นตอนการคำนวณตามหัวข้อที่ 3.3

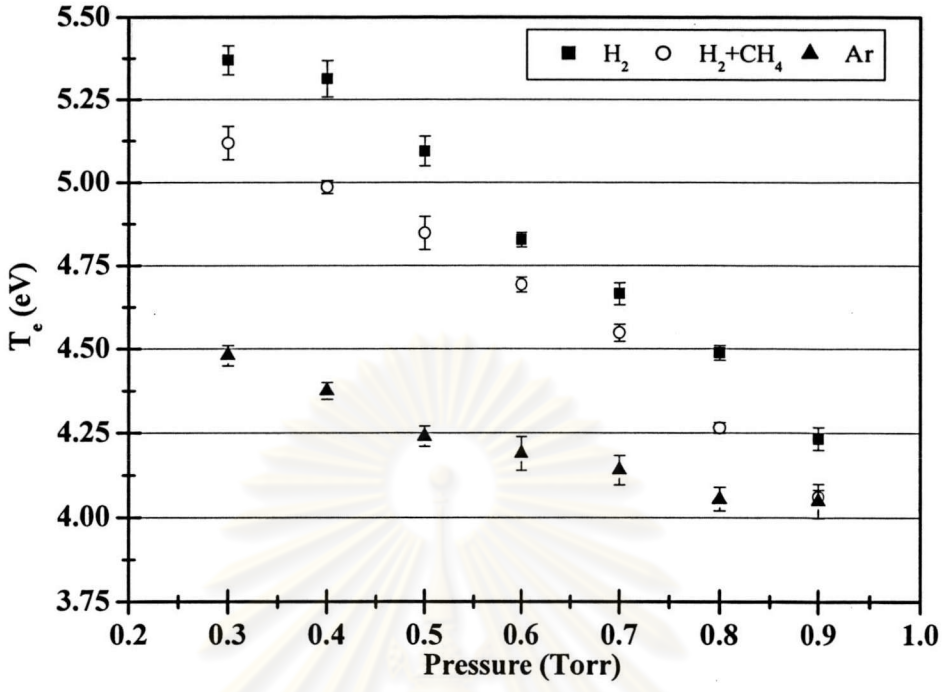
จากการจัดการทดลอง ตามรูปที่ 4.12 ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำหัววัดลางมัวร์ใส่เข้าในพลาสมา แล้วทำการไบแอสศักย์ต่างๆ กันให้กับหัววัดลางมัวร์ บันทึกค่ากระแสและศักย์ที่ได้จากหัววัดลางมัวร์ นำค่ากระแสและศักย์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิ และความหนาแน่นของพลาสมา ในการทดลองได้มีการเปลี่ยนความดันและชนิดของก๊าซ ผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นของพลาสมาของก๊าซแต่ละชนิดที่ความดันต่างๆ จะแสดงได้ดังตาราง 4.1 และกราฟแสดงอุณหภูมิของอิเล็กตรอนของพลาสมาของก๊าซอาร์กอน ก๊าซไฮโดรเจนผสมกับก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดันต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 4.13 และกราฟแสดงความหนาแน่นของพลาสมาของก๊าซอาร์กอน ก๊าซไฮโดรเจนผสมกับก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดันต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 4.14

ความดัน (ทอร์)	ก๊าซอาร์กอน		ก๊าซไฮโดรเจน ผสมกับก๊าซมีเทน		ก๊าซไฮโดรเจน	
	T_e (eV)	$n_e \times 10^{11}$ (cm^{-3})	T_e (eV)	$n_e \times 10^{11}$ (cm^{-3})	T_e (eV)	$n_e \times 10^{10}$ (cm^{-3})
0.30	4.48	1.70	5.12	1.26	5.37	8.21
0.40	4.37	1.72	4.99	1.28	5.31	8.33
0.50	4.24	1.75	4.85	1.30	5.09	8.55
0.60	4.19	1.76	4.69	1.32	4.83	8.72
0.70	4.14	1.77	4.55	1.34	4.67	8.81
0.80	4.05	1.79	4.27	1.38	4.49	8.99
0.90	4.05	1.79	4.06	1.42	4.23	9.25

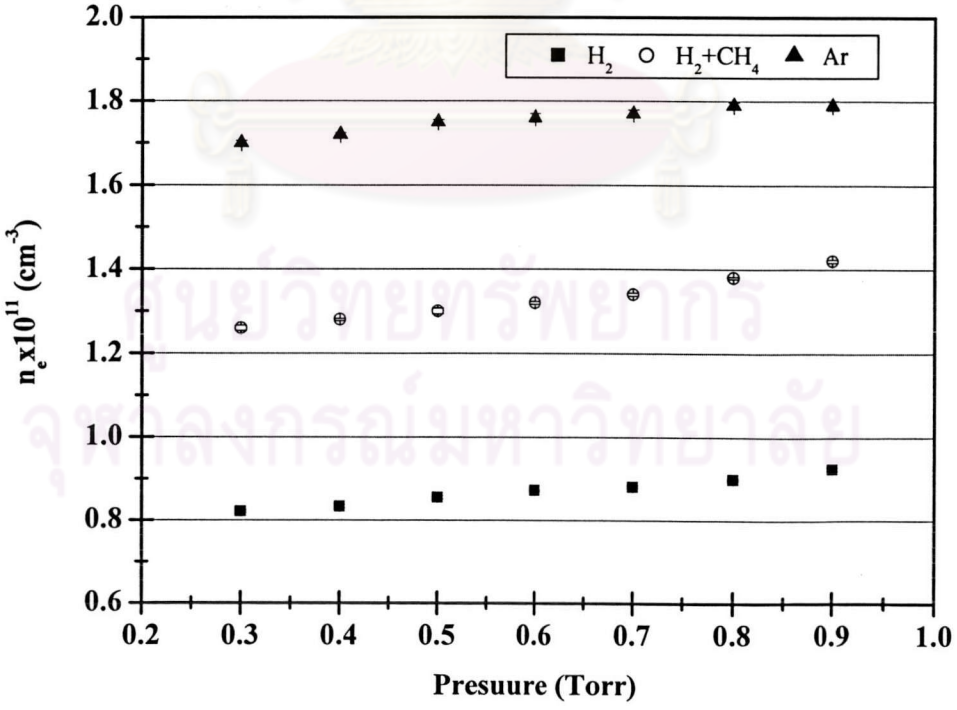
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมา ของก๊าซอาร์กอน ก๊าซไฮโดรเจนผสมกับก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดันต่างๆ

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อความดันสูงขึ้น ก๊าซทุกชนิดจะมีค่าความหนาแน่นของพลาสมาสูงขึ้น แต่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนจะลดลง เพราะว่าเมื่อความดันสูงขึ้น ก๊าซจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้พลาสมามีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความดันสูงขึ้น พลังงานที่จ่ายให้กับอนุภาคของก๊าซยังคงเท่าเดิม ทำให้พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนภายในพลาสมาได้รับน้อยลง อุณหภูมิของอิเล็กตรอนจึงมีค่าลดลง และในการเปลี่ยนชนิดของก๊าซ เมื่อความดันคงที่ ก๊าซที่มีมวลโมเลกุลใหญ่ จะมีค่าความหนาแน่นของพลาสมาสูงกว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อย แต่จะมีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนน้อยกว่า ก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อย เพราะก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อย เมื่อได้รับพลังงานจะแตกตัวเป็นพลาสมา และเคลื่อนที่ได้เร็วว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลใหญ่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 อุณหภูมิของอิเล็กตรอนของพลาสมาของก๊าซอาร์กอน ก๊าซไฮโดรเจนผสมกับก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดันต่างๆ



รูปที่ 4.14 ความหนาแน่นของพลาสมาของก๊าซอาร์กอน ก๊าซไฮโดรเจนผสมกับก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดันต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนของพลาสมาของก๊าซอาร์กอน ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซไฮโดรเจนผสมกับมีเทน มีค่าอยู่ในช่วง 4.00 ถึง 5.50 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีค่าความหนาแน่นของพลาสมาอยู่ในช่วง 8×10^{10} ถึง 1.8×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

หากพิจารณาค่าพารามิเตอร์ในระบบไมโครเวฟพลาสมาด้วยเทคนิคหัววัดลางมัวร์ที่ได้มีการศึกษามาแล้วเช่น ในงานของ Brockhaus [12] และคณะ ได้ศึกษาค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากระบบไมโครเวฟพลาสมาที่วัดจากเครื่อง SLAN โดยเครื่องดังกล่าวมีการส่งพลังงานผ่านโพรงทรงกระบอก ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยในครั้งนี้ แต่แตกต่างกันตรงที่เครื่อง SLAN จะมีช่องสำหรับจ่ายพลังงานเพื่อกระตุ้นพลาสมาอยู่จำนวน 10 ช่อง ในการศึกษาของ Brockhaus และคณะ ได้จัดการทดลองก๊าซอาร์กอน ที่ความดัน 1.5 ทอร์ กำลังคลื่นไมโครเวฟมีค่าตั้งแต่ 200 ถึง 1800 วัตต์ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของพลาสมาอาร์กอนอยู่ในช่วง 7×10^{10} ถึง 3×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หากเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเครื่องที่สร้างในห้องปฏิบัติการกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเครื่อง SLAN จะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สร้างในห้องปฏิบัติการมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่อง SLAN

และในงานของ Rousseau [10] และคณะได้ศึกษาหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมาที่เกิดจากเครื่อง SWG เครื่องดังกล่าวมีการจ่ายคลื่นไมโครเวฟเป็นพัลส์ ซึ่งลักษณะการจ่ายพลังงานจะแตกต่างจากงานวิจัยนี้ (ที่มีจ่ายพลังงานต่อเนื่อง) ในระบบดังกล่าวนี้จะได้ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 2 ถึง 7 อิเล็กตรอนโวลต์ และความหนาแน่นของพลาสมาอยู่ในช่วง 2×10^{10} ถึง 1.5×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาที่วัดได้จากเครื่องที่สร้างในห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยครั้งนี้ จะเห็นว่า มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Rousseau เช่นกัน

ดังนั้นจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของพลาสมาที่วัดได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมาด้วยความถี่ไมโครเวฟที่สร้างในห้องปฏิบัติการ มีค่าพารามิเตอร์ใกล้เคียงกับเครื่องกำเนิดพลาสมาด้วยความถี่ไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรม

โดยสรุปการทดลองวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของพลาสมาอาร์กอน ไฮโดรเจน และไฮโดรเจนกับมีเทน ด้วยเทคนิคหัววัดลางมัวร์พบว่า อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่าอยู่ในช่วง 4.00 ถึง 5.50 อิเล็กตรอนโวลต์ และความหนาแน่นของพลาสมาอยู่ในช่วง 8×10^{10} ถึง 1.8×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจะลดลง เมื่อความดันเพิ่มขึ้น และที่ความดันเท่ากัน ก๊าซที่ใช้เป็นพลาสมาที่มีมวลโมเลกุลใหญ่จะมีค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนน้อยกว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อย สำหรับความหนาแน่นของพลาสมา จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น และที่ความดันเท่ากัน ก๊าซที่ใช้เป็นพลาสมาที่มีมวลโมเลกุลใหญ่จะมีค่าความหนาแน่นของพลาสมาสูงกว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย