

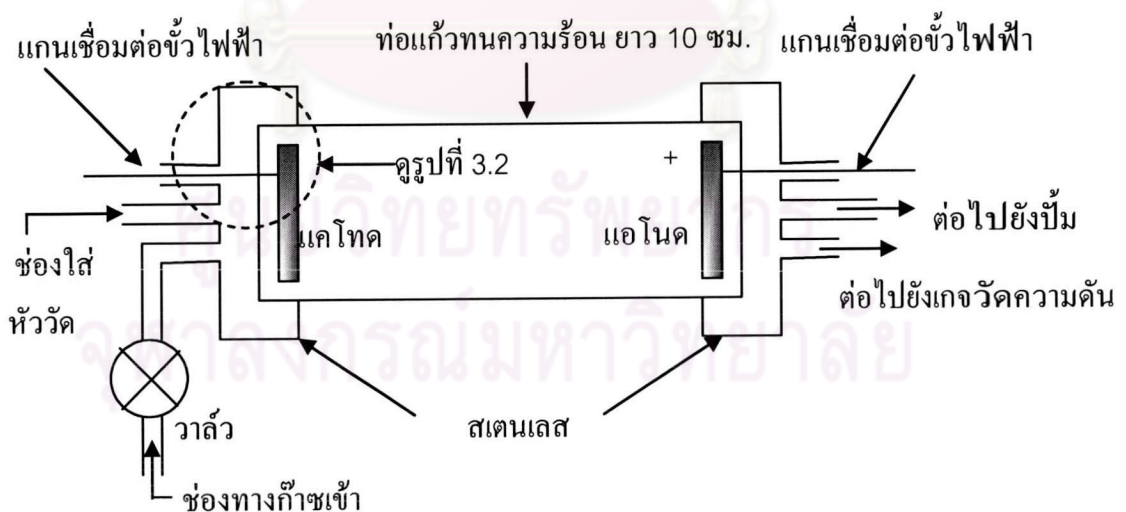
บทที่ 3

ระบบพลาสมาดีสชาร์จและหัววัด

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดและการสร้างระบบทดลอง ซึ่งประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศ แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. plasma generator) หัววัด ลางมัวร์ทั้งแบบหัววัดเดี่ยวและหัววัดคู่ และระบบพัลส์ (pulsed system)

3.1 ภาชนะสุญญากาศ

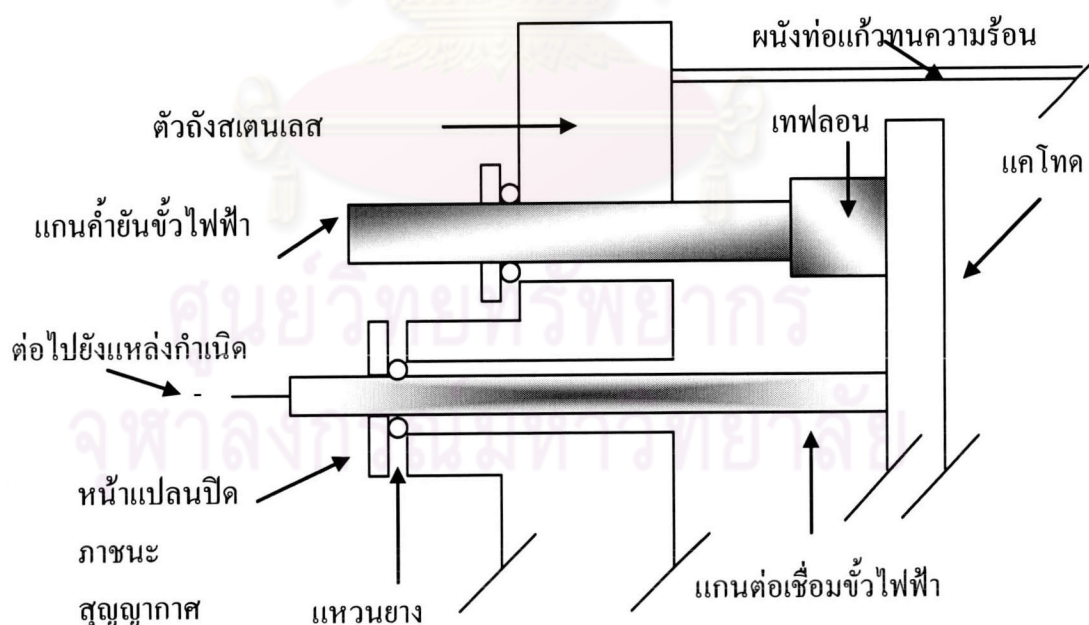
ภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) เป็นภาชนะที่ใช้บรรจุก๊าซ ที่เราต้องการให้เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ ควรจะต้องมีความทนทานสูง เพราะเมื่อเกิดพลาสมาขึ้น จะมีความร้อนเกิดขึ้นมาก ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้ทำภาชนะทดลองหรือภาชนะสุญญากาศ คือ สแตนเลส (stainless steel) เพราะเป็นโลหะที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศจนเป็นสนิมอย่างหนักแล้วยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อนและมีจุดหลอมเหลวที่สูงมากคือ 1420°C [29] อีกทั้งยังทำความสะอาดได้ง่าย จากสมบัติที่ได้เปรียบเหล่านี้ของสแตนเลส จึงทำให้ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้สแตนเลสมาสร้างเป็นส่วนหนึ่งของภาชนะสุญญากาศ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองภาชนะสุญญากาศที่ใช้ในงานทดลอง

ภาชนะสุญญากาศที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ไม่ได้ใช้สเตนเลสปิดที่ทั้งหมด โดยที่ส่วนกลางภาชนะใช้ท่อแก้วทนความร้อนซึ่งทำจากบอโรซิลิเกต (borosilicate, SiO_2) หนา 3.5 mm ยาว 10 cm เพื่อใช้สังเกตความเปลี่ยนแปลงภายในภาชนะสุญญากาศเมื่อมีพลาสมาเรืองแสงเกิดขึ้น โดยทางด้านแคโทด จะมีช่องต่อไปยังภายนอก 3 ทาง คือช่องที่ต่อไปยังวาล์วซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการไหลของก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ช่องสำหรับใส่หัววัดทางไฟฟ้า ซึ่งจะใส่ทะลุผ่านแอโนดกลวง (hollow cathode) เข้าไปสู่บริเวณด้านในของภาชนะสุญญากาศ และช่องทางสำหรับต่อเชื่อมสายไฟจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขั้วแคโทด ส่วนด้านแอโนดก็มีช่องต่อไปยังภายนอก 3 ทางเช่นเดียวกัน คือ ช่องทางสำหรับต่อกับเกจวัดความดัน (pressure gauge) ซึ่งจะต่อยังเครื่องอ่านความดัน (gauge reader) เพื่อแสดงค่าความดันภายในภาชนะสุญญากาศออกมา ช่องทางสำหรับต่อไปยังปั๊ม ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ปั๊มเบอร์ 1 ของเอ็ดเวิร์ด (Edward) เพื่อสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ โดยการทำงานที่ควบคุมกันระหว่างวาล์วที่ปล่อยก๊าซเข้า (gas in) และปั๊มที่สูบอากาศออก (gas out) จะทำให้เราปรับค่าความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ และช่องเปิดสำหรับต่อเชื่อมสายไฟจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขั้วแอโนด โดยที่หน้าแปลนของช่องทางเหล่านี้ เป็นหน้าแปลนมาตรฐาน (NW) ดังรายละเอียดในภาคผนวก ข

ส่วนขั้วไฟฟ้าทั้งแอโนดและแคโทดนั้น จะอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศ โดยมีวัสดุที่เป็นฉนวนค้ำยันไว้ 2 ชิ้น เรียกว่าแกนค้ำยันขั้วไฟฟ้า (electrode supporter) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพขยายการเชื่อมต่อแกนค้ำยันขั้วไฟฟ้ากับขั้วแคโทด ภายในภาชนะสุญญากาศ

ซึ่งในที่นี้ใช้แท่งเทฟลอน (Teflon) ต่อกับแท่งสแตนเลสเป็นแกนค้ำยันอีกที เพราะว่าเทฟลอนเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ทำให้ขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดไม่ไปสัมผัสกับโลหะชิ้นอื่น นอกจากสายไฟที่มาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งต่อเข้ามาจากแกนต่อเชื่อมขั้วไฟฟ้า (feed through) เท่านั้น

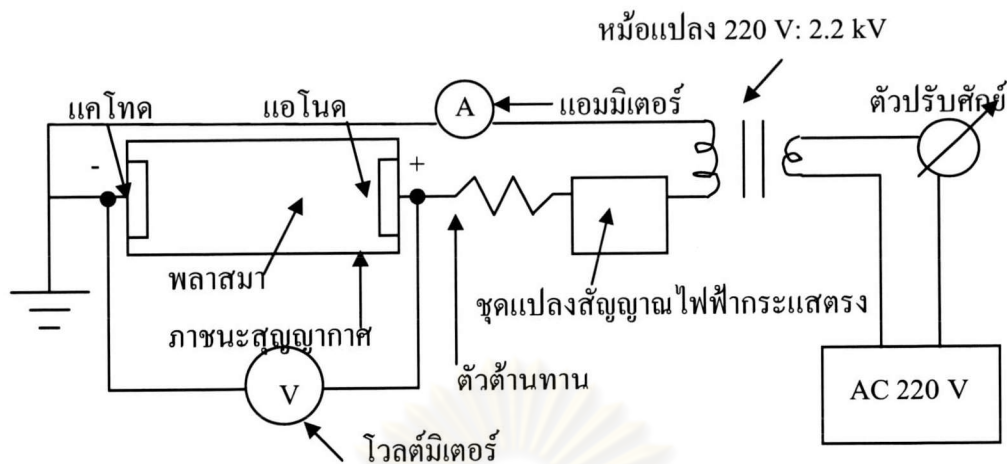
รูปที่ 3.2 นี้ เป็นการขยายให้เห็นรายละเอียด บริเวณวงกลมเส้นประในรูปที่ 3.1 โดยที่สายไฟที่ผ่านมาทางแกนต่อเชื่อมขั้วไฟฟ้า จะถูกหุ้มอยู่ในฉนวนที่ทำมาจากท่อแก้ว เพื่อให้แน่ใจว่า เมื่อใส่แกนต่อเชื่อมขั้วไฟฟ้าเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะไปยังขั้วไฟฟ้าแต่เพียงอย่างเดียว สำหรับภาชนะสุญญากาศที่สร้างขึ้นมาใช้ในการทดลองนี้ สามารถทำความดันได้ต่ำสุดที่ 0.042 torr ส่วนรายละเอียดของแบบแปลนและขนาดของภาชนะสุญญากาศที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้สำหรับการทดลอง แสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก ก

3.2 ระบบพลาสมาดิสชาร์จเรืองแสงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

ในการทำให้เกิดพลาสมานั้นมีวิธีการกระทำได้หลายวิธี เช่นการใช้คลื่นวิทยุ [17,30] การใช้คลื่นไมโครเวฟ [31] หรือวิธีที่ใช้ในการทดลองคือการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น

กระบวนการสร้างพลาสมาด้วยการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง นับว่าเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนน้อย เมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว โดยระบบพลาสมาที่เกิดจากการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงนี้ อาศัยการจ่ายศักย์สูงให้แก่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างแอโนดและแคโทดมาก ๆ และเมื่อความต่างศักย์ระหว่างแอโนดและแคโทดมีมากพอ จะส่งผลให้ก๊าซที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าคู่นี้ เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอน ดังแสดงระบบการกำเนิดพลาสมาด้วยไฟฟ้ากระแสตรงไว้ในรูปที่ 3.3

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

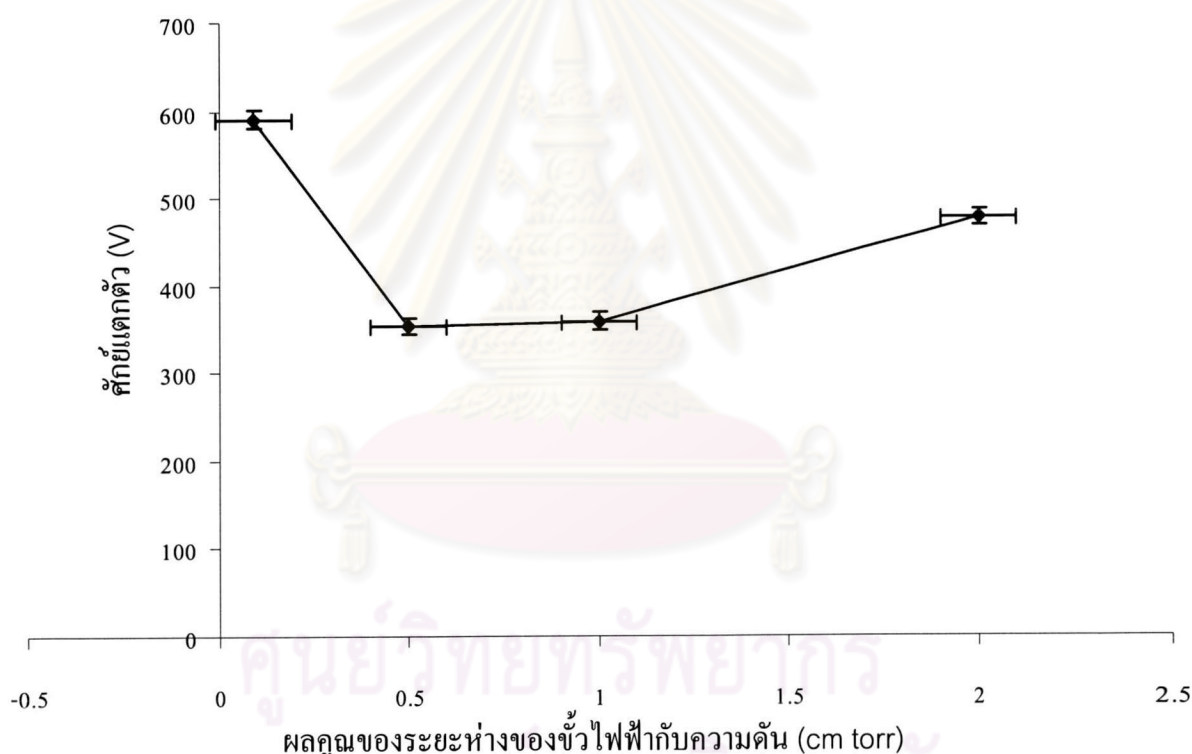


รูปที่ 3.3 แผนภาพการกำเนิดพลาสมาโดยวิธีดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 3.3 ชุดกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูง ที่ใช้ทำให้เกิดพลาสมา ดิสชาร์จในการทดลองนี้ ประกอบด้วยตัวปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ (voltage regulator) หรือ วาริแอค (variable AC; Variac) ยี่ห้อ Union รุ่น TDGC2 2kVA, 8A ทำหน้าที่ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ จ่ายในระบบ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านวาริแอคมานั้นจะนำมาผ่านหม้อแปลง 220V: 2.2kV ยี่ห้อ TRON เพื่อขยายแอมป์จูดของสัญญาณให้มีศักย์สูงขึ้นอีก 10 เท่า สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกขยายแล้ว จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงโดยชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (rectifier) ที่ ประกอบด้วยไดโอดสำหรับไฟฟ้าศักย์สูง SanKen รุ่น HVR- 5 A จำนวน 1 ตัว สัญญาณไฟฟ้า กระแสตรงศักย์สูงที่ได้ จะถูกแบ่งภาระงานไว้ โดยผ่านตัวต้านทานกระแสสูง ขนาด 0.1Ω 10 A เพื่อไม่ให้ระบบสุญญากาศที่ใช้กำเนิดพลาสมาได้รับภาระมากเกินไป หลังจากนั้นสัญญาณไฟฟ้า กระแสตรงศักย์สูงนี้จะถูกจ่ายให้แก่ขั้วไฟฟ้าคือ แอโนดและแคโทด ซึ่งทำมาจากแผ่นทองเหลือง กลมแบน รัศมี 6 ซม. บรรจุอยู่ในภาชนะสุญญากาศ จากนั้นความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศ เกิดเป็นพลาสมา เรียกกระบวนการ ดังกล่าวว่าการกำเนิดพลาสมาโดยการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. discharge plasma production)

ในระบบดังกล่าว จะมีมาตรวัดกระแส (Ammeter) และมาตรวัดศักย์ (Volt meter) ต่ออยู่ เพื่อใช้สังเกตค่ากระแสและศักย์ในวงจร ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขที่ทำให้ เกิดการแตกตัวของก๊าซเป็นพลาสมาภายในภาชนะสุญญากาศ ในการทดลองนี้ พบว่าสามารถทำให้เกิดพลาสมาดิสชาร์จเรืองแสงของอากาศ ที่ความดัน 0.18 torr ได้ตั้งแต่ที่ความต่างศักย์ระหว่าง แอโนดและแคโทด มีค่าประมาณ 145 V ซึ่งภายหลังจากที่ก๊าซเกิดการแตกตัวแล้ว พบว่าความต่างศักย์ ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 จะลดลงมาอยู่ประมาณ 100 V นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อความดันของอากาศ เป็น 0.28 torr จะต้องใช้ความต่างศักย์อย่างน้อยประมาณ 140 V โดยมีความต่างศักย์หลังเกิดการ

แตกตัวแล้วอยู่ที่ประมาณ 80 V และในกรณีที่ใช้โอกาสความดัน 0.38 torr ต้องใช้ความต่างศักย์อย่างน้อยประมาณ 153 V โดยมีความต่างศักย์หลังเกิดการแตกตัวแล้วอยู่ที่ประมาณ 87 V จึงจะทำให้ให้อากาศภายในภาชนะสุญญากาศเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาเรืองแสงได้ สาเหตุที่สามารถทำให้เกิดพลาสมาดีสชาร์จเรืองแสงได้ที่ความต่างศักย์ไม่สูง เป็นเพราะขนาดของภาชนะสุญญากาศที่เล็ก ทำให้ระยะห่างของขั้วไฟฟ้ามีค่าน้อยทำให้การส่งผ่านพลังงานทำได้ง่าย และความดันภายในภาชนะสุญญากาศที่ต่ำกว่าความดันของบรรยากาศมาก ทำให้อะตอมของก๊าซมีจำนวนไม่มากเกินไป จึงสรุปได้ว่า ที่ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าเท่ากัน ถ้าความดันของก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศมีค่ามาก จะต้องใช้ความต่างศักย์มากขึ้น จึงจะสามารถทำให้เกิดการดีสชาร์จเรืองแสงได้ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าแตกตัวกับความดันที่ใช้ นั้น พบว่ามีลักษณะดังรูปที่ 3.4 นี้

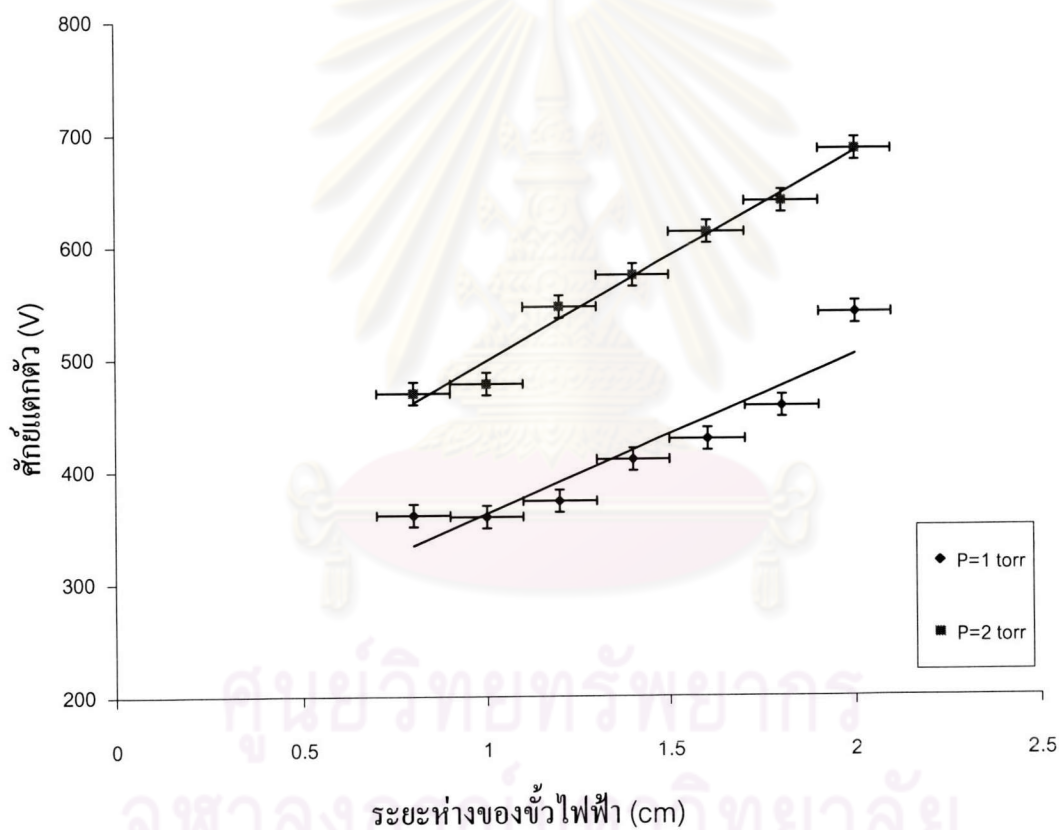


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าแตกตัว และผลคูณของความดันกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้า

จากกราฟที่ได้ในรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นการทดลองกับอากาศ มีลักษณะเดียวกันกับกราฟของพาสเซน ในรูปที่ 2.2 ซึ่งเราพบว่าสำหรับก๊าซชนิดหนึ่ง ๆ แล้ว จะมีเงื่อนไขหนึ่งซึ่งสามารถทำให้ก๊าซแตกตัวได้ง่ายที่สุด หรือใช้ความต่างศักย์น้อยที่สุดนั่นเอง ซึ่งหมายความว่า ไม่ใช่เวลาที่ความดันยิ่งต่ำ การแตก

ตัวจะเกิดขึ้นได้ง่ายเสมอไป เพราะถ้าความดันต่ำมาก จำนวนอนุภาคมีน้อยเกินไปที่จะทำให้การแตกตัวของแสงดำรงคงอยู่ได้ ในขณะที่ความดันที่สูงเกินไปก็ทำให้ก๊าซแตกตัวได้ยาก เพราะว่าการส่งผ่านพลังงานจากอนุภาคหนึ่งไปยังอนุภาคที่อยู่ถัดไป จะมีการสูญเสียไปยังอนุภาคที่อยู่แวดล้อม ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานมากขึ้นจึงจะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวได้ ดังเช่นในกรณีนี้ พบว่าค่าต่ำสุดที่ทำให้อากาศแตกตัวมีค่าประมาณ 330 V ที่ความดันประมาณ 0.7 torr เมื่อระยะห่างของขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ 1 cm

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของขั้วไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าแตกตัวเมื่อความดันคงที่ แสดงได้ดังรูป 3.5

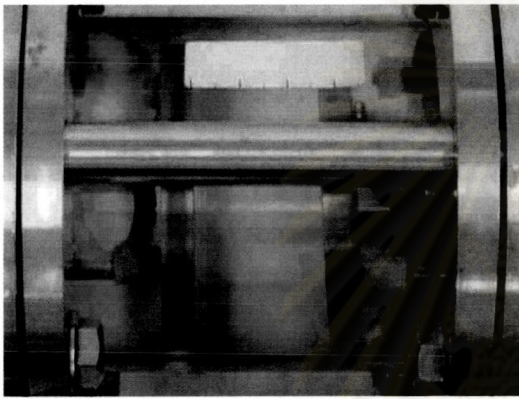


รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าแตกตัวกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เมื่อความดันคงที่

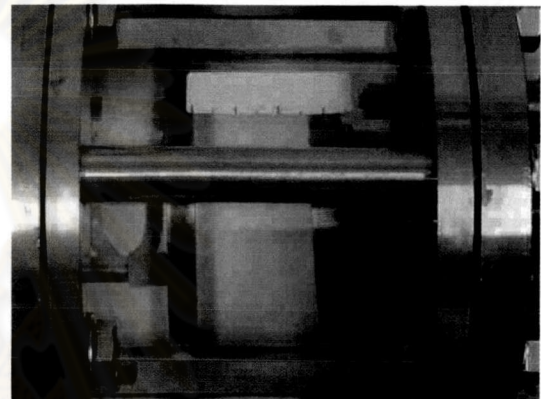
จากรูปที่ 3.5 เป็นผลการทดลองระหว่างศักย์แตกตัวกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้า เมื่อความดันคงที่ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อย ศักย์ไฟฟ้าที่จะต้องใช้เพื่อทำให้ก๊าซในภาชนะสูญญากาศเกิดการแตกตัวนั้นก็ค่าน้อยตามไปด้วย เช่นในกรณีที่ระยะห่างของขั้วไฟฟ้ามีค่าเป็น 1 cm นั้น เราต้องใช้

ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 359 V จึงจะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวได้ เมื่อเทียบกับในกรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นเช่นที่ระยะห่าง 2 cm ศักย์ไฟฟ้าที่จะต้องใช้เพื่อทำให้ก๊าซในภาชนะสุญญากาศเกิดการแตกตัวนั้นมีค่าถึง 540 V นั่นคือศักย์ไฟฟ้าแตกตัวที่ใช้มีค่ามากขึ้นตามระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างความดันที่ต่างกันแล้ว พบว่าที่ความดันสูง เราจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อจะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัว

สีและความเข้มของการเรืองแสงของพลาสมาอากาศและอาร์กอนนั้น แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6 ดังนี้



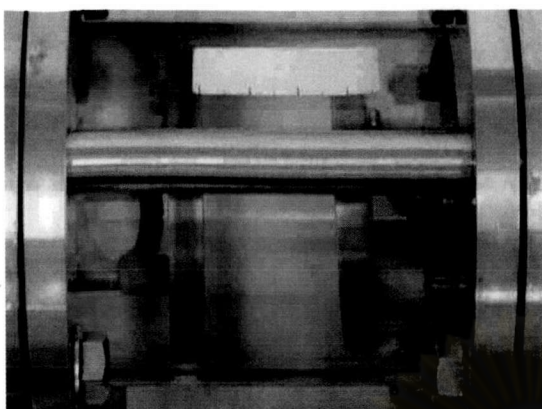
ก. อากาศ



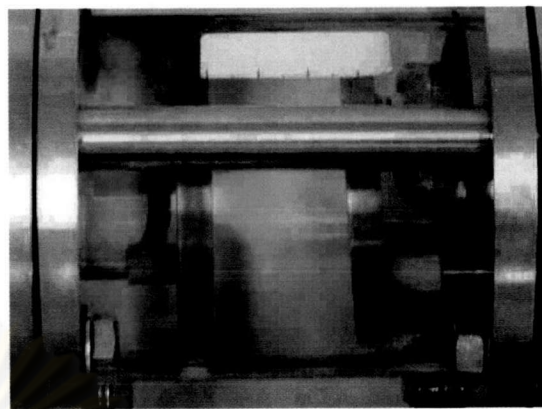
ข. อาร์กอน

รูปที่ 3.6 การเรืองแสงของพลาสมา ที่ความดัน 0.18 torr ศักย์ไฟฟ้าของการดิสชาร์จ 360 V

รูปที่ 3.6 ก และรูปที่ 3.6 ข คือพลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวของอากาศและอาร์กอนตามลำดับ ที่ความดัน 0.18 torr เมื่อศักย์ไฟฟ้าของการดิสชาร์จคือ 360 V จากรูปทั้ง 2 นี้ พบว่าสีของการเรืองแสงที่ได้ในช่วงลำสว่างด้านขั้วบวก (positive column) มีสีออกเป็นสีชมพูเช่นเดียวกัน ในขณะที่ส่วนที่มีความเข้มมากที่สุดนั้น จะอยู่ใกล้แคโทด คือช่วงการเรืองแสงด้านขั้วลบ (negative glow) สำหรับช่วงการเรืองแสงด้านขั้วลบของพลาสมาอากาศ มีชมพูเข้มปนส้ม ในขณะที่ช่วงการเรืองแสงด้านขั้วลบของอาร์กอนพลาสมานั้นมีสีชมพูเข้ม จากผลการทดลองครั้งนี้พบว่า สีของการเรืองแสงที่เกิดจากพลาสมาของอากาศและอาร์กอนนั้น เหมือนกับที่ Wong [10] ได้ทำการทดลองไว้ ดังนั้นสีของการเรืองแสงจึงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของก๊าซชนิดนั้น ๆ แต่สิ่งที่ส่งผลต่อการเรืองแสงอย่างชัดเจนคือศักย์ไฟฟ้างดิสชาร์จ ซึ่งส่งผลต่อความเข้มของการเรืองแสงอย่างชัดเจน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 โดยรายละเอียดของลำสว่างด้านขั้วบวกและช่วงการเรืองแสงด้านขั้วลบนั้น แสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก



ก. V = 360 V



ข. V = 400 V

รูปที่ 3.7 การเรืองแสงของพลาสมาอากาศ ที่ความดัน 0.18 torr

รูปที่ 3.7 นี้ เกิดจากการแตกตัวเรืองแสงของพลาสมาอากาศ ที่ความดัน 0.18 torr โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าของการดิสชาร์จต่างกัน ซึ่งพบว่าเมื่อเราทำให้การแตกตัวเรืองแสงคงอยู่ด้วยศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ความเข้มของการเรืองแสงโดยรวมก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.7 ข พบว่าความเข้มของการเรืองแสงบริเวณ ช่วงการเรืองแสงด้านซ้ายลบบ ที่มีความสว่างมากกว่า ในรูปที่ 3.7 ก อย่างชัดเจน จากการทดลองครั้งนี้ พบว่าลักษณะเฉพาะของการดิสชาร์จเรืองแสงที่สังเกตได้ชัดเจนคือ ช่วงลำสว่างด้านบวก และช่วงการเรืองแสงด้านซ้ายลบบ เพราะเป็นช่วงที่มีความเข้มของการเรืองแสงมากกว่าบริเวณอื่น

3.3 หัววัดทางไฟฟ้า

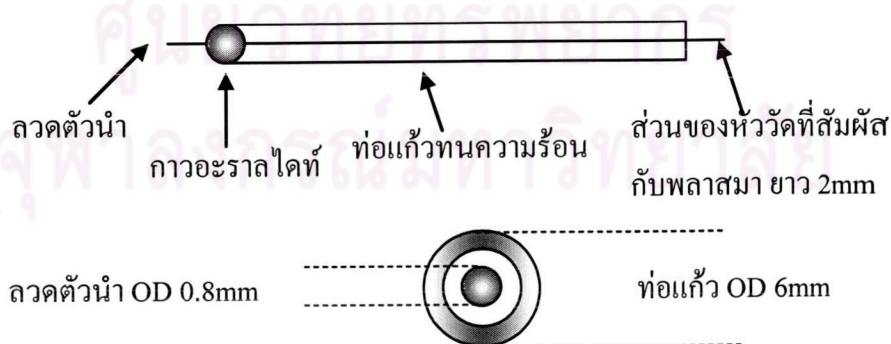
หลักการของหัววัดทางไฟฟ้าคือ การใช้โลหะตัวนำใส่เข้าไปสัมผัสกับบริเวณที่ต้องการวัด แต่เนื่องจากอุณหภูมิของพลาสมามีค่าสูง ดังนั้นการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำหัววัดจึงต้องพิจารณาถึงสมบัติด้านการทนความร้อนของวัสดุด้วย ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ในการทดลองนี้ เลือกใช้ขดลวดความร้อน (นิกเกิล-โครเมียม) ซึ่งหาได้ง่ายและมีราคาไม่สูง แม้ว่าสมบัติบางอย่างจะด้อยกว่าโมลิบดีนัม แต่ด้วยสมบัติที่ขดลวดชนิดนี้สามารถทนความร้อนและทนต่อการสึกหรอสูง จึงสามารถนำมาทำเป็นหัววัดพลาสมาได้

ในการสร้างหัววัดนั้น โดยทั่วไปจะใช้วัสดุทึบร้อนห่อหุ้มลวดตัวนำนั้น ๆ ไว้ โดยปล่อยให้ส่วนปลายให้อยู่นอกทึบร้อนนั้นไว้ประมาณ 2 ถึง 3 mm เพื่อใช้เป็นส่วนสัมผัสกับพลาสมา

สำหรับการดิสชาร์จทั่วไปนั้น วัสดุที่นำมาทำฉนวนอาจจะเป็นแก้วไพเรกซ์ (pyrex) หรือควอตซ์ (quartz) แต่ถ้าเป็นการดิสชาร์จที่มีความเข้มสูงก็ต้องใช้วัสดุที่สามารถทนความร้อนได้สูงขึ้นไปด้วย เช่นอะลูมินา (alumina) สำหรับการวัดที่มีการสั่น (oscillation) หรือมีการเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ปรกวน จำเป็นที่จะต้องมีการป้องกันสัญญาณปรกวนเหล่านั้น ไม่ให้มารบกวนสัญญาณที่ต้องการวัด โดยอาจจะใช้สายโคแอกเซียล (coaxial cable) หรือทำท่อโลหะที่ต่อกราวด์ (grounding) ไว้ ท่อหุ้มภายนอกหัววัดในบริเวณที่เป็นฉนวนอีกที เรียกหัววัดเช่นนี้ว่า หัววัดที่มีการกำบัง (shielded probe) ดังเช่น หัววัดลงมัวร์ที่ใช้ในการวัดพลาสมาที่เกิดจากคลื่นวิทยุ ของ Heintz [7], หมุดตอเล็บ นิสอ [23] และ Paosawatyanong [32]

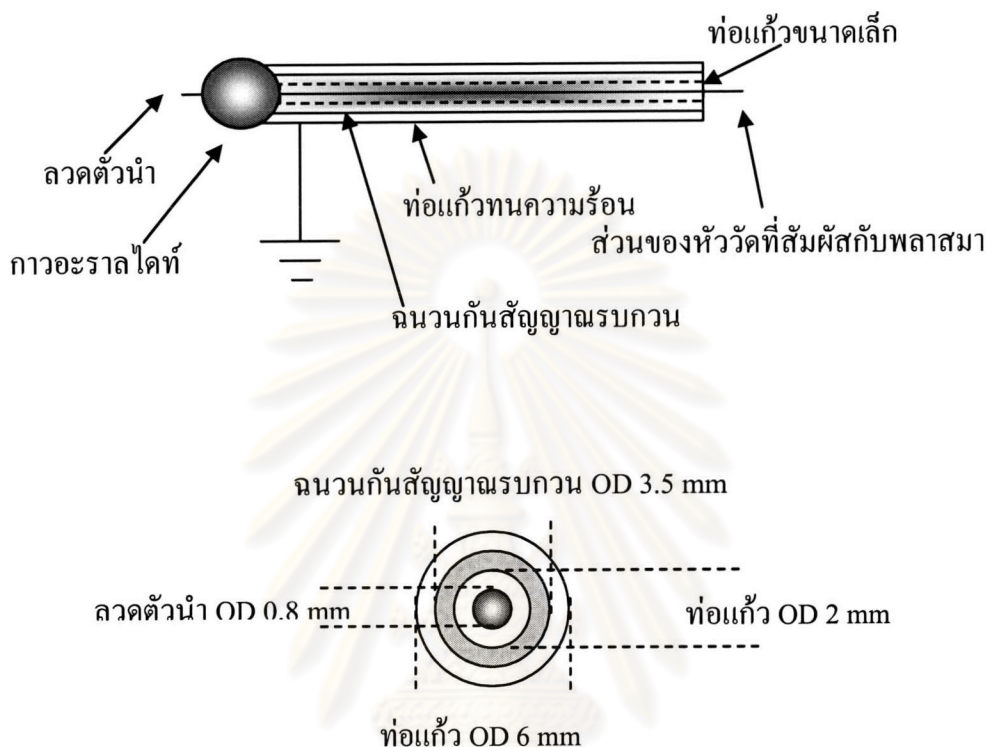
3.3.1 หัววัดเดี่ยว

จากทฤษฎีในบทที่ 2 ทำให้เราทราบว่า หัววัดควรมีขนาดโตกว่าระยะเดอบาย โดยทั่วไปแล้วมีขนาดอยู่ในระดับของ 0.1 mm ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ พบว่าระยะเดอบายมีขนาดประมาณ 0.8 mm ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงเลือกเส้นลวดความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (outer diameter, OD) 0.8 mm การที่ไม่เลือกใช้หัววัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโตมากเกินไป เพราะต้องการวัดพลาสมาแบบเฉพาะที่ (local measurement) จากนั้นจึงเป็นการนำลวดตัวนำที่ได้มาบรรจุในฉนวนไฟฟ้า ในการทดลองนี้เลือกใช้หลอดแก้วที่ทนความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm โดยใช้ท่อแก้วยาว 15 cm แล้วฉนีกส่วนท้ายด้วยกาวอะราลไคท์ (araldite glue) เพื่อไม่ให้ก๊าซภายในระบบรั่วออกมาทางหัววัด จนไม่สามารถคงความเป็นสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศตามที่ต้องการไว้ได้ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ภาพตัดขวางและภาพด้านหน้าของหัววัดเดี่ยว

หัววัดลงมัวร์แบบหัววัดเดี่ยวมักจะใช้กับพลาสมาที่มีพลังงานไม่สูง สำหรับระบบดิสชาร์จด้วยไฟฟ้านั้น ไม่จำเป็นต้องสร้างฉนวนกันสัญญาณรบกวน แต่หากว่าในการวัดนั้นมีสัญญาณรบกวนปนเข้ามาสู่หัววัดมากเกินไป จนทำให้การวิเคราะห์ผลกระทำไม่ได้ลำบาก จะมีการสร้างฉนวนกันสัญญาณรบกวนหุ้มหัววัดนั้น ๆ ไว้อีกที ดังรูปที่ 3.9

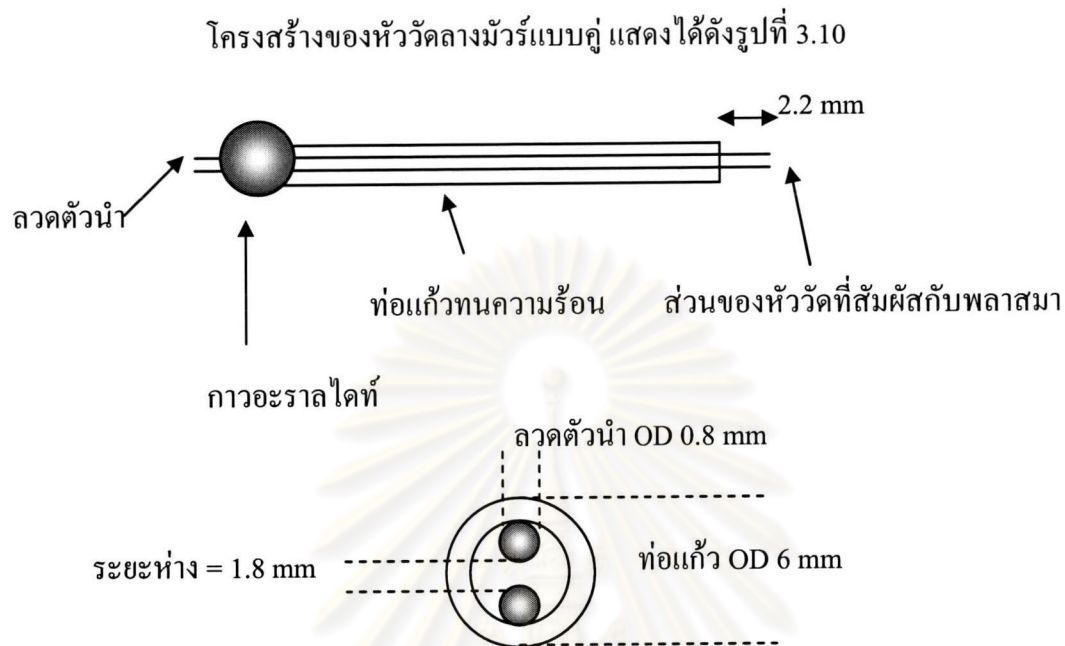


รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางและภาพด้านหน้าของหัววัดเดี่ยวที่มีฉนวนกันสัญญาณรบกวน

โดยฉนวนกันสัญญาณรบกวนนี้ ทำด้วยโลหะซึ่งต่ออยู่กับกราวด์ (ground) ในการทดลองนี้ใช้ท่อทองแดงกลวง เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 3.5 mm โดยมีท่อแก้วทนความร้อนหุ้มอยู่ในชั้นนอกสุดเช่นเดียวกับหัววัดที่ไม่มีฉนวนกันสัญญาณรบกวน โดยขนาดพื้นที่ผิวของหัววัดแบบหัววัดเดี่ยวที่สัมผัสกับพลาสมาในการทดลองนี้คือ 6.03 mm^2

เมื่อในระบบวัดมีสัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนที่จะสามารถเข้าสู่หัววัดได้ เฉพาะส่วนปลายของหัววัดที่ไม่ได้ทำฉนวนไว้เท่านั้น โดยสัญญาณรบกวนที่ส่วนอื่น ๆ จะถูกชักนำให้ลงสู่กราวด์ ผ่านโลหะทองแดงที่หุ้มอยู่ภายนอกของหัววัด

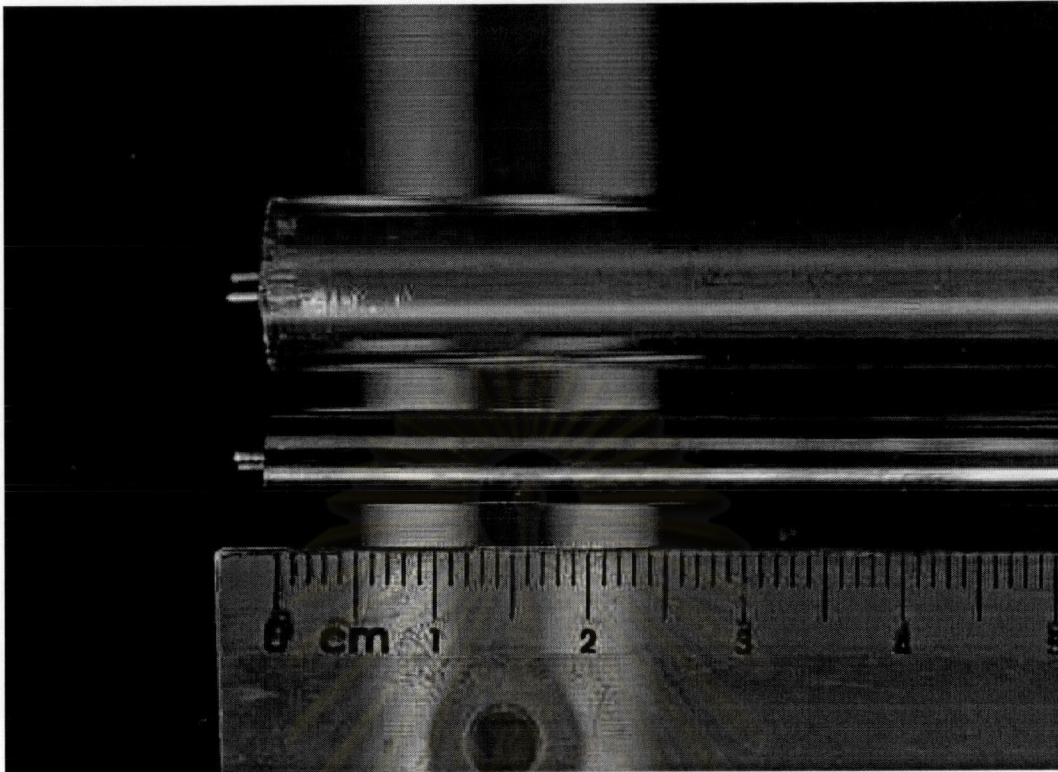
3.3.2 หัววัดคู่



รูปที่ 3.10 ภาพตัดขวางและภาพด้านหน้าของหัววัดคู่

โดยพื้นที่ผิวของหัววัดที่ใช้การทดลอง ซึ่งต้องสัมผัสกับพลาสมาคือ 6.03 mm^2 และสำหรับกรณีของการสร้างหัววัดที่มีฉนวนกันสัญญาณรบกวนนั้น สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ในกรณีของหัววัดเดี่ยว เพียงแต่มีข้อที่จะต้องพิจารณามากขึ้นในส่วนของขนาดของหัววัด เพราะในกรณีของหัววัดแบบคู่ เมื่อมีฉนวนกันสัญญาณรบกวนเพิ่มเข้าไป จะทำให้ขนาดโดยรวมของหัววัดเพิ่มขึ้น อย่างเช่นในการทดลองนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของหัววัดแบบคู่ที่ไม่มีฉนวนกันสัญญาณรบกวนคือ 6 mm ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของหัววัดแบบคู่ที่มีฉนวนกันสัญญาณรบกวนจะมีค่าประมาณ 1.5 cm ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถใช้อุปกรณ์จับยึดหัววัด (probe holder) ร่วมกันได้

ลักษณะและขนาดของหัววัดแบบคู่ ทั้งแบบที่มีและไม่มีฉนวนกันสัญญาณรบกวนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 3.11

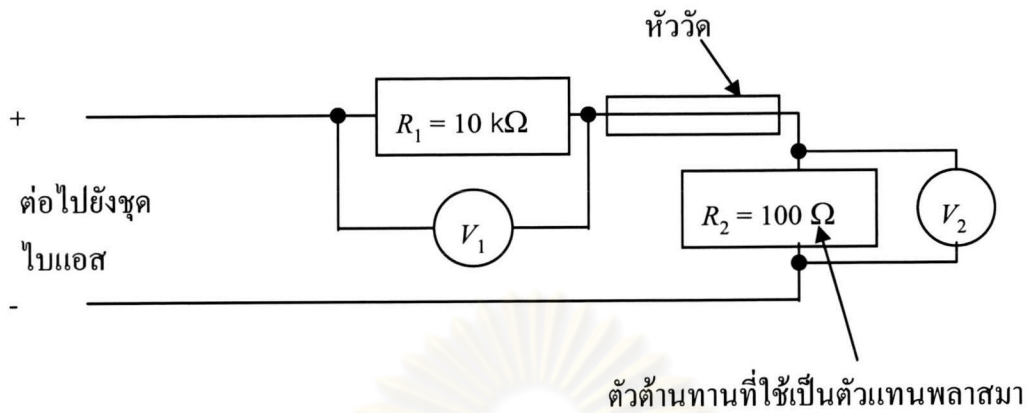


รูปที่ 3.11 หัววัดคู่แบบมีฉนวน (บน) และไม่มีฉนวนกันสัญญาณรบกวน (ล่าง) ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.11 คือรูปส่วนปลายของหัววัด ที่ต้องสัมผัสกับพลาสมา สำหรับการทดลองครั้งนี้ ขนาดของหัววัดที่มีฉนวนกันสัญญาณรบกวนนั้น มีขนาดใหญ่กว่าหัววัดที่ไม่มีฉนวนกันสัญญาณรบกวน ประมาณ 2 เท่า

3.4 การทดสอบวงจรของหัววัดลางมัวร์

ก่อนที่จะนำหัววัดที่สร้างไปใช้งานจริงนั้น ได้มีการทดสอบการทำงานของหัววัด ก่อนโดยใช้ตัวต้านทานขนาด 100Ω แทนพลาสมา ต่อเชื่อมกับหัววัดทำให่วงจรที่ต่ออยู่กับหัววัด เกิดการครบวงจรขึ้น ดังรูปที่ 3.12 จากนั้นจึงทำการไบแอสหัววัดด้วยศักย์ค่าต่าง ๆ กัน แล้วบันทึกค่ากระแสที่ได้จากหัววัด ซึ่งสอดคล้องกับศักย์ไบแอสนั้น ๆ จากนั้นจึงนำชุดข้อมูลกระแส-ศักย์เหล่านี้มาเขียนกราฟร่วมกัน ซึ่งกราฟระหว่างกระแส-ศักย์ที่ได้นั้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.13

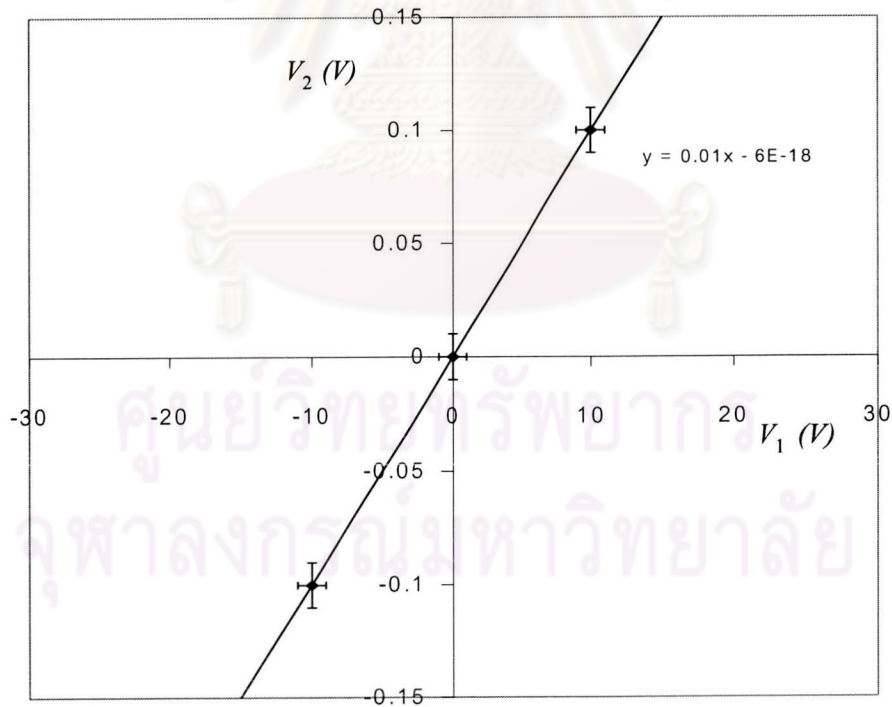


รูปที่ 3.12 วงจรที่ใช้ทดสอบวงจรของหัววัด

จากวงจรดังกล่าว เราจะหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์และความต้านทานได้เป็น

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

3.1



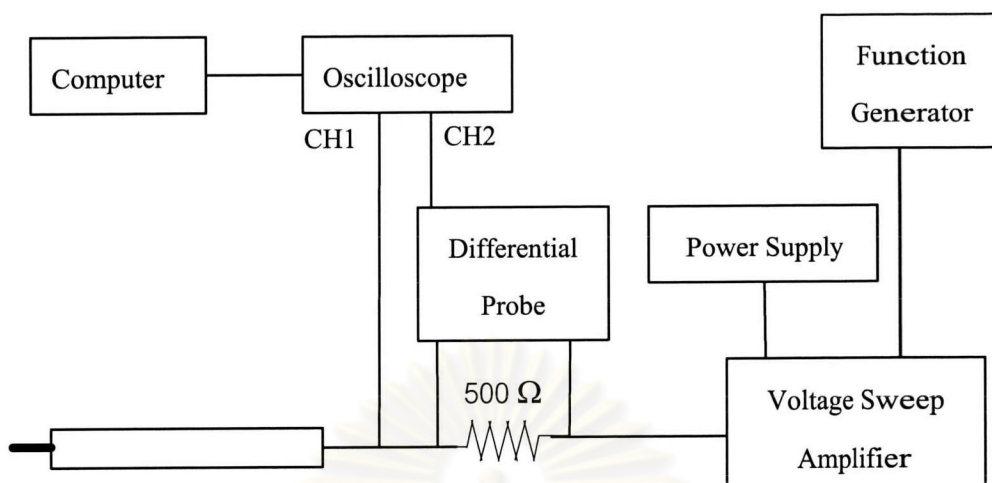
รูปที่ 3.13 กราฟศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในวงจรทดสอบหัววัด

จากรูปที่ 3.13 พบว่าอัตราส่วนของ V_2/V_1 ในกราฟ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความต้านทาน ที่ควรจะเป็นตามกฎของโอห์มพอดิ นั่นคือมีค่าเป็น 0.01Ω ทำให้เชื่อมั่นได้ว่าระบบหัววัดแบบLangmuir Probe นี้ เมื่อนำไปใช้กับระบบพลาสมาจริง จะยังให้ผลการวัดที่ถูกต้องเช่นกัน

3.5 ระบบหัววัดLangmuir Probe แบบพัลส์

การวิเคราะห์ข้อมูลพลาสมาด้วยหัววัดเดี่ยว และหัววัดคู่ต้องมีการไบแอสศักย์แก่หัววัด หากต้องไบแอสศักย์ให้แก่หัววัดทีละค่า จะเสียเวลามาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ระบบการวัดแบบพัลส์จึงเกิดขึ้น เรียกว่า ระบบหัววัดLangmuir Probe แบบพัลส์ (Pulsed Langmuir Probe System) ซึ่งอาศัยหลักการไบแอสหัววัดด้วยศักย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยจะทำการเปลี่ยนศักย์ที่ไบแอสให้แก่หัววัดด้วยสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวเอง ในการทดลองนี้ใช้สัญญาณรูปสามเหลี่ยม ส่งผลให้สามารถเก็บข้อมูลของกระแสและศักย์ได้หลายค่า ด้วยสัญญาณเพียงรอบเดียว

ในการทดลองนี้ เลือกใช้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมขนาด 10 Vpp จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ Metrix รุ่น MTX 3240 ความถี่ 320 Hz เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีขนาดเหมาะสมกับการแสดงผลบนเครื่องออสซิลอโคป Tektronix รุ่น TDS 220 โดยลักษณะสัญญาณที่ต้องการคือสามารถแสดงผลสัญญาณแบบครั้งคลื่น ได้เต็มหน้าจอของเครื่องออสซิลอโคป เพราะจะทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อเกิดพลาสมาขึ้นได้อย่างชัดเจน ความถี่ของสัญญาณไบแอสที่ใช้ต้องไม่สูงเกินไป เพราะจะทำให้รูปร่างของสัญญาณเมื่อเกิดพลาสมามีการบิดเบี้ยวและผิดเพี้ยนไป ในการทดลองนี้พบว่าสัญญาณจะเริ่มมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไป เมื่อใช้ความถี่ประมาณ 5 kHz ขึ้นไป และนอกจากนั้นแล้ว จากเงื่อนไขข้อ 3 ของการเป็นพลาสมาที่ได้กล่าวไปแล้วในตอน 2.2.3 มีใจความว่าความถี่ของแหล่งรบกวน ในที่นี้คือความถี่ของสัญญาณไบแอสที่หัววัด ซึ่งจะต้องมีค่าไม่มากกว่าความถี่ของพลาสมา และทั้งหมดนี้คือเหตุผลที่ไม่ควรเลือกความถี่ของสัญญาณไบแอสให้สูงเกินไป ส่วนการที่ไม่ใช้สัญญาณความถี่ต่ำมาก ๆ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนซึ่งเกิดจากความถี่ 50 Hz ของไฟบ้าน โดยระบบหัววัดแบบพัลส์นี้แสดงได้ดังรูป 3.14

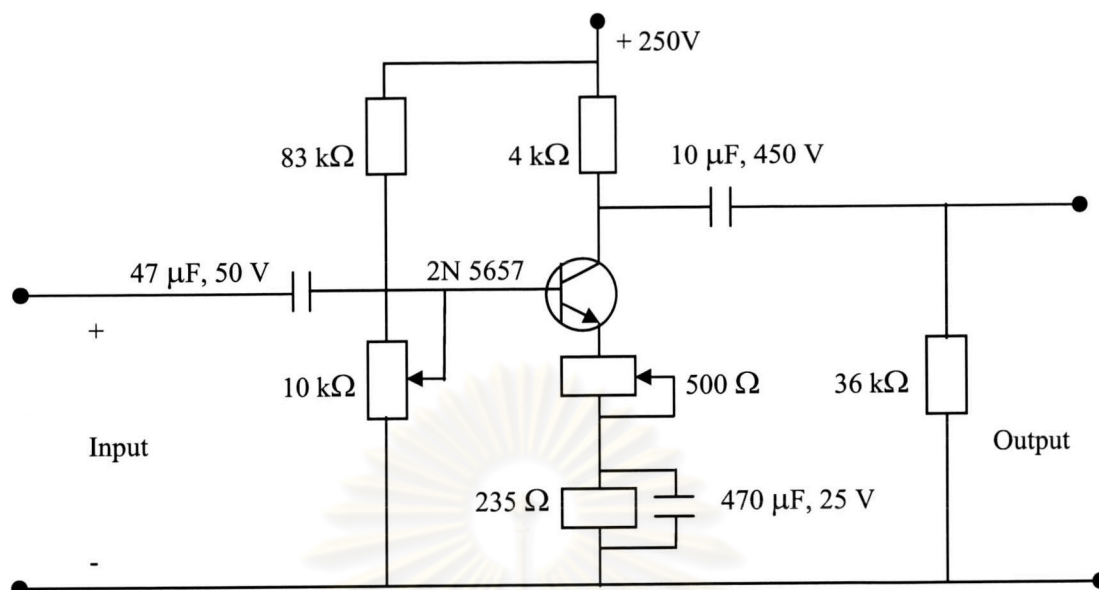


รูปที่ 3.14 ภาพรวมของระบบการวัดพลาสมาแบบพัลส์แสงมัวร์ของหัววัดเดี่ยว

รูปที่ 3.14 แสดงระบบไบแอสแบบพัลส์กับหัววัดแสงมัวร์แบบหัววัดเดี่ยว โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) จะจ่ายสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้กับชุดขยายสัญญาณ (voltage sweep amplifier) ซึ่งสัญญาณจะถูกขยายโดยชุดวงจรขยายสัญญาณ [1] ดังรูปที่ 3.15 สัญญาณที่ถูกขยายแล้วจะส่งต่อไปยังหัววัด ซึ่งวางไว้ในระบบที่มีพลาสมา โดยจะเก็บสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกระแส และศักย์ที่หัววัดด้วยออสซิลโลสโคป

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่หัววัด และความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน $500\ \Omega$ ซึ่งจะทำให้การบันทึกผ่านช่องบันทึกสัญญาณที่ 1 และ 2 บนเครื่องออสซิลโลสโคป ตามลำดับ จากนั้นนำผลที่ได้ ส่งผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรม WavestarTM ผ่านทางพอร์ต RS 232 เพื่อใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft ExcelTM และ OriginTM ช่วยวิเคราะห์ผลที่ได้เป็นลำดับต่อไป

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



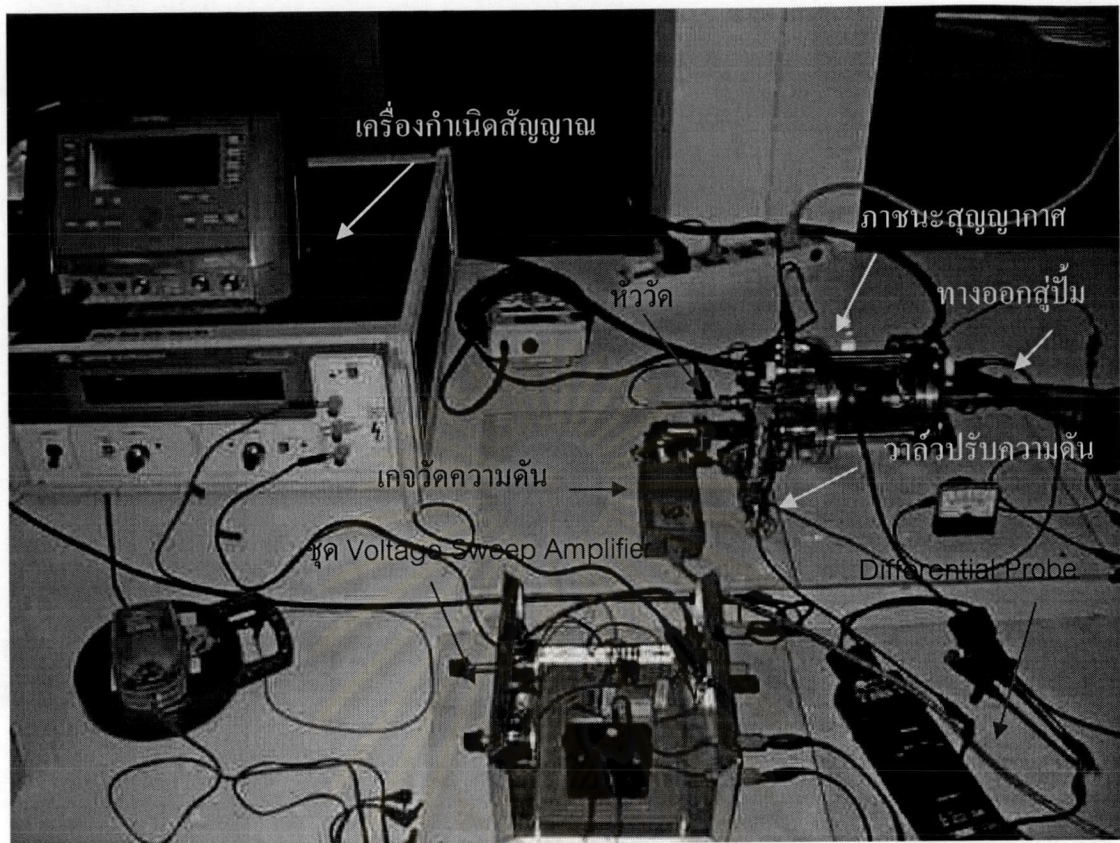
รูปที่ 3.15 วงจร Sweep Voltage Amplifier [1]

ในวงจรนี้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์ 2N 5657 ซึ่งมีช่วงการใช้งานที่ศักย์สูงถึง 350 V กระแสในช่วงไม่เกิน 3 A ตัวต้านทานปรับค่าได้ทั้ง 2 ตัว ทำหน้าที่ปรับขยายขนาดของสัญญาณ ให้ได้ตามที่ต้องการ โดยที่วงจรชุดนี้มีกำลังการขยายสัญญาณประมาณ 17.875 เท่า แต่ในการใช้งานจริงพบว่าศักย์ไบแอสเพียง ± 60 V ก็เพียงพอที่จะทำให้ได้ข้อมูลกระแส-ศักย์จากหัววัดที่ครบถ้วน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลอื่น ๆ ต่อไปได้

ในรูปที่ 3.14 นั้น จะเห็นว่าการต่อตัวต้านทาน 500Ω ไว้ ระหว่างหัววัดกับช่องการบันทึกผลที่ 1 ของเครื่องออสซิโลสโคป (CH1) เพื่อใช้วัดค่ากระแสที่ได้จากหัววัด ผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าหัววัดเปรียบเทียบ (differential probe) ซึ่งจะให้ค่าความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทานนั้นออกมา แล้วใช้กฎของโอห์มคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพลาสติกเข้าสู่หัววัดได้

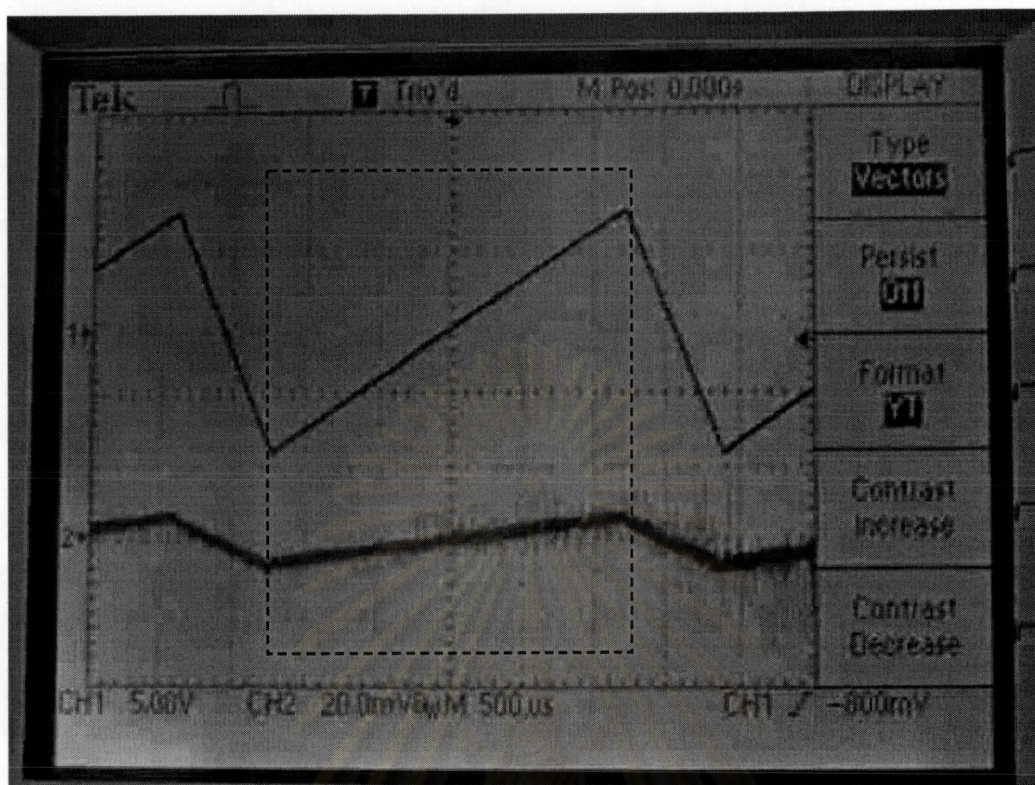
ระบบหัววัดกลางมัวร์แบบพัลส์ที่ใช้ในการทดลองนี้ มีลักษณะดังรูปที่ 3.16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



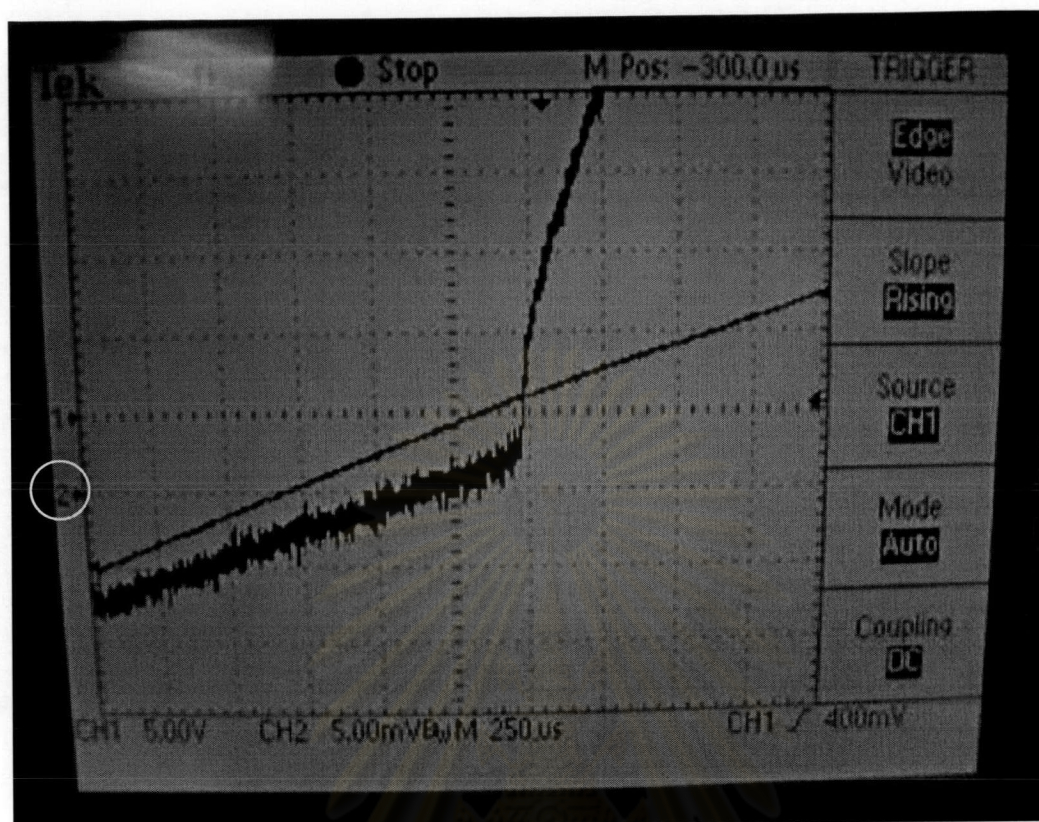
รูปที่ 3.16 ภาพรวมของระบบที่ใช้ในการทดลอง

สัญญาณไบแอสที่ผ่านการขยายจากชุดขยายสัญญาณ (sweep voltage amplifier) จะถูกจ่ายให้แก่หัววัด โดยมีเครื่องออสซิลอสโคป (oscilloscope) อุปกรณ์บันทึกสัญญาณที่ได้ ซึ่งช่องการบันทึกผลที่ 2 ของเครื่องออสซิลอสโคป (CH2) จะบันทึกสัญญาณของความต่างศักย์ที่คร่อมหัววัด และช่องการบันทึกผลที่ 1 ของเครื่องออสซิลอสโคป (CH1) จะบันทึกสัญญาณของความต่างศักย์ที่คร่อมตัวต้านทาน ซึ่งจะใช้คำนวณหากระแสที่ได้จากหัววัดต่อไป จากนั้นสัญญาณที่ได้จากช่องการบันทึกผลที่ 1 และ 2 บนเครื่องออสซิลอสโคป จะถูกส่งต่อไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Wavestar v1.2.2 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่อไป โดยลักษณะสัญญาณที่ได้จากช่องการบันทึกผลของเครื่องออสซิลอสโคปทั้ง 2 ขณะไม่มีพลาสมาของหัววัดเดี่ยวแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



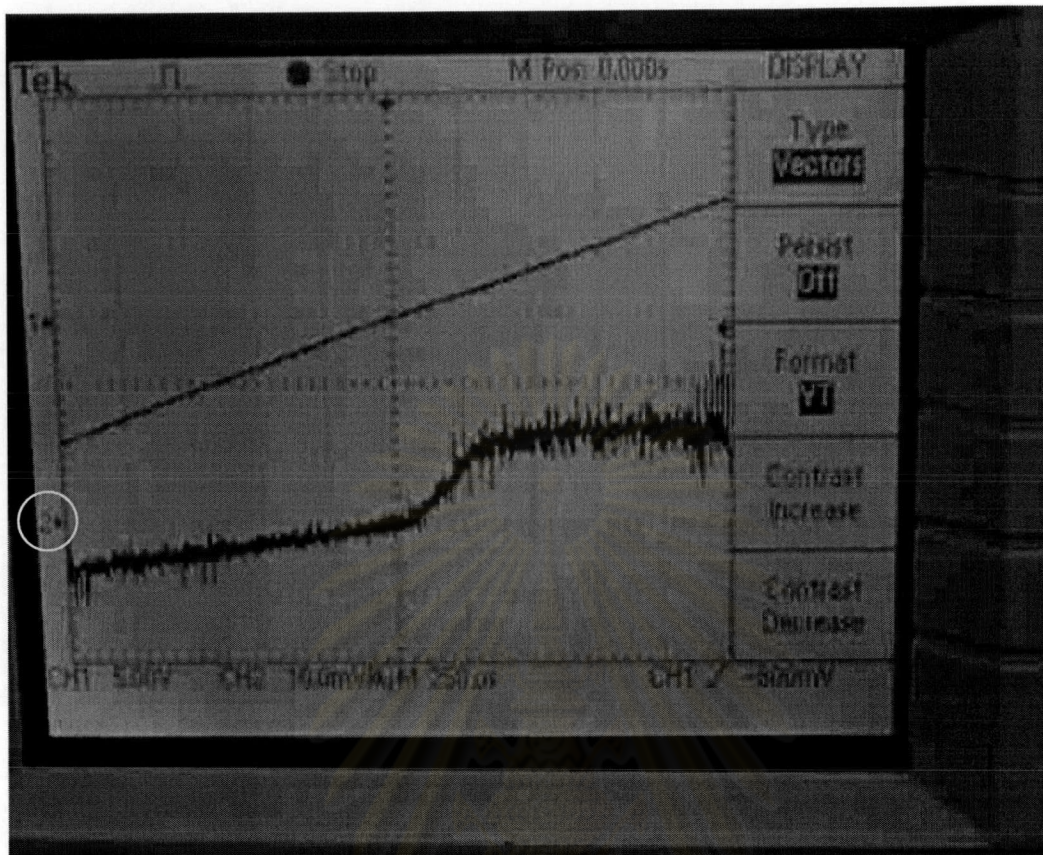
รูปที่ 3.17 สัญญาณที่บันทึกได้บนเครื่องออสซิโลสโคป เมื่อไม่มีพลาสมา

สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่อยู่ด้านบน คือสัญญาณของความต่างศักย์คร่อมหัววัด ซึ่งได้มาจากช่องรับสัญญาณที่ 1 ในขณะที่สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่อยู่ด้านล่าง คือสัญญาณของความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน 500Ω ซึ่งได้มาจากช่องรับสัญญาณที่ 2 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า สัญญาณที่ได้จากช่องทางที่ 2 นั้นเป็นสัญญาณมีขนาดต่ำมากและมีลักษณะไม่ชัดเจน เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ได้จากช่องทางที่ 1 เพราะว่าขณะนี้ไม่มีพลาสมาเกิดขึ้นนั่นเอง เมื่อทำการวัดพลาสมาจะปรับหน้าจอให้แสดงผลเพียง $\frac{1}{2}$ รอบสัญญาณ ดังกรอบสี่เหลี่ยมในรูปที่ 3.17 เพื่อให้การอ่านสัญญาณทำได้ชัดเจน โดยไม่มีผลของสัญญาณขาลงซึ่งไม่ได้ลดลงทันทีครบวง และเมื่อมีพลาสมาเกิดขึ้นสัญญาณที่ได้จะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 3.18 สำหรับหัววัดเดี่ยว และรูปที่ 3.19 สำหรับหัววัดคู่



รูปที่ 3.18 สัญญาณที่ปรากฏบนเครื่องออสซิลอโคป เมื่อใช้หัววัดเดี่ยววัดพลาสมาอาร์กอน

สัญญาณที่ได้ เกิดจากพลาสมาอาร์กอน ความดัน 0.38 torr ศักย์คิสชาร์จ 250 V โดยวางหัววัดที่ตำแหน่ง +1 cm ไปทางขวาจากแคโทด เมื่อมีพลาสมาเกิดขึ้น สัญญาณส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงไป คือ สัญญาณที่วัดคร่อมตัวต้านทาน หรือสัญญาณที่ได้จากช่องรับสัญญาณที่ 2 เพราะเมื่อมีพลาสมาเกิดขึ้นจะทำให้มีกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนและอิเล็กตรอนในพลาสมาไหลเข้าสู่หัววัด โดยส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ก็คือบริเวณด้านที่อยู่เหนือจุดอ้างอิง บริเวณที่หมายเลข 2 ซึ่ง ทางซ้ายมือ เพราะว่าช่วงนี้ศักย์ไบแอสเป็นบวก จึงดึงดูดอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนมากเข้าสู่หัววัด ในขณะที่ไอออนซึ่งเคลื่อนที่ช้ากว่านั้นยังถูกผลักออกไปไม่หมด ทำให้เราสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ได้อย่างชัดเจน ซึ่งตรงกันข้ามกับช่วงที่อยู่ใต้จุดอ้างอิง เพราะว่าบริเวณนี้ศักย์ไบแอสเป็นลบ จึงดึงดูดไอออนที่เคลื่อนที่ช้าเข้ามา ในขณะที่ผลักอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ได้เร็วกว่ามากออกไปจนหมด จึงทำให้สิ่งที่เหลืออยู่เป็นเพียงกระแสที่อิมตัวของไอออน ทำให้ไม่สามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงในบริเวณนี้ได้อย่างชัดเจน ส่วนสัญญาณที่บันทึกได้บนออสซิลอโคป เมื่อใช้หัววัดคู่วัดพลาสมาของอาร์กอน จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 สัญญาณที่ปรากฏบนเครื่องออสซิลอโคป เมื่อใช้หัววัดคู่วัดพลาสมาอาร์กอน

จากรูปที่ 3.19 เป็นสัญญาณที่ได้จากพลาสมาอาร์กอน ความดัน 0.38 torr ศักย์ดิสชาร์จ 250 V โดยวางหัววัดที่ตำแหน่ง +1 cm ไปทางขวาจากแคโทด จะเห็นว่าเมื่อมีพลาสมาเกิดขึ้น สัญญาณส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนคือ สัญญาณที่วัดคร่อมตัวต้านทาน หรือสัญญาณที่ได้จากช่องรับสัญญาณที่ 2 เช่นเดียวกันกับกรณีหัววัดเดี่ยว เพราะเมื่อมีพลาสมาเกิดขึ้นจะทำให้มีกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนและอิเล็กตรอนในพลาสมาไหลเข้าสู่หัววัดนั่นเอง โดยที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ช่องรับที่ 2 นั้นมีลักษณะสัญญาณอ้อมตัวปรากฏอย่างชัดเจน ทั้งด้านบนและด้านล่างของจุดอ้างอิง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีหมายเลข 2 ชี้ ทางซ้ายมือของรูปที่ 3.19